

На правах рукописи



**САЛТАНАЕВА ЕЛЕНА АНДРЕЕВНА**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ  
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРСУНОК ДЛЯ ПОДАЧИ ТОПЛИВА**

Специальность 05.02.07-Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Воронеж - 2019**

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

Научный руководитель: **Сафонов Сергей Владимирович**  
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Садыков Зуфар Барыевич** - доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им А.Н.Туполева – КАИ, кафедра «Летательные аппараты», профессор;  
**Коденцев Сергей Николаевич** - кандидат технических наук, Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики», главный инженер.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».**

Защита состоится 20 ноября 2019 г. в 15<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», по адресу: 394026, 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 «20» сентября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., проф.



Кириллов О.Н.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Технологические процессы машиностроения отличаются большим разнообразием лежащих в их основе видов воздействия на поверхность детали. В этой отрасли промышленности нашли свое применение технологические процессы, основой которых являются механические, тепловые, химические, магнитные и ядерные способы обработки поверхности материалов. Традиционные технологические процессы, однако, находятся на весьма высоком уровне развития, и дальнейшие разработки в этой области являлись локальными и имели несущественные улучшения показателей технологических процессов изготовления и характеристик показателей качества поверхностного слоя детали. В основе нетрадиционных технологических методов обработки материалов, интенсивное развитие которых пошло гораздо позднее, лежит возможность совместного использования электрической энергии и импульсных процессов для обработки сложнопрофильных деталей, а именно: электрохимическая обработка, электроэрозионный метод, лазерная, ультразвуковая импульсная обработка. Разработки последнего времени характеризуются новым подходом в формировании нетрадиционных технологий путем взаимной комбинации воздействий, которые лежат в основе как традиционных, так и нетрадиционных воздействий на материал детали. Следствием этого стала разработка новых методов обработки – комбинированных методов. В историческом плане большинство нетрадиционных технологических процессов разрабатывалось для нужд оборонных отраслей (авиационное и ракетно-космическое машиностроение), и накопленный здесь потенциал вызывает несомненный интерес специалистов всех отраслей машиностроения. В современных условиях хозяйствования перечисленные производства подразумевают развитие с широким использованием накопленного опыта в применении и разработке нетрадиционных технологических процессов создания высокоресурсной продукции мирового уровня отечественным производителем.

Работа выполнялась в соответствии с постановлением Правительства РФ №2164-П «О проведении государственной программы «Мобильный комплекс» (раздел «Техническое перевооружение»), с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и научным направлением ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

**Целью** работы является создание эффективных способов комбинированной обработки сложнопрофильной проточной части керамических форсунок с обеспечением повышенных эксплуатационных характеристик при их применении в тепловых агрегатах различного назначения.

В работе поставлены и решены **задачи**:

1. Раскрыть технологические особенности и обосновать требования к эффективным способам комбинированной обработки проточной части керамических форсунок.
2. Обосновать целесообразность использования керамических форсунок с учетом технологичности их изготовления комбинированными способами с наложением высокочастотных воздействий.
3. Исследовать механизм локального растворения металлических технологических вставок в каналах форсунок с различным профилем и моделирование комбинированного процесса анодного растворения вставок при импульсных воздействиях на рабочую среду.
4. Разработать способы и режимы для технологии интенсивного комбинированного удаления вставок в каналах форсунок с различной геометрией проточной части.
5. Обосновать область эффективного использования керамических форсунок в различных отраслях машиностроения.

**Научная проблема.** Отсутствие экономически обоснованных технологических методов и средств для формирования каналов проточной части керамических форсунок, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, что ограничивает использование таких материалов при создании высокоресурсных теплонапряженных тепловых агрегатов для создания изделий новых поколений энергетических машин.

**Методы и достоверность исследований.** При проведении работы использовались классические закономерности технологии машиностроения, импульсных методов обработки, закономерности массовыноса и проектирования комбинированных технологических процессов, теоретические положения подобия в технике, обоснование выбора воздействий в новых способах изготовления каналов в керамических материалах.

Достоверность результатов подтверждена воспроизводимыми результатами экспериментов различных исследователей опытом использования разработанных способов и технологических процессов в авиадвигателестроении и энергетическом машиностроении.

**Объект исследования.** Высокоресурсные теплонапряженные керамические форсунки, получаемые методом прессования порошковых материалов с последующим удалением металлических технологических вставок в каналах проточной части.

**Предмет исследования.** Технологические способы и техническое обеспечение для комбинированного удаления технологических вставок воздействием анодного растворения и ультразвукового концентрированного луча по способам, предложенными соискателем, с обеспечением эксплуатационных характеристик форсунок, перспективных для использования в создаваемых энергетических машинах.

### **Научная новизна:**

1. Теоретическое обоснование путей интенсификации процесса анодного растворения технологических вставок с удалением места обработки от катода в каналах различного профиля путем локального воздействия ультразвукового луча, регламентированного по времени с периодом удаления продуктов обработки, и обеспечением сохранности внутренних поверхностей керамических форсунок.

2. Новые способы технологического обеспечения интенсивного удаления технологических вставок с сохранением геометрии каналов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства форсунок в энергетических машинах.

3. Механизм и модель формирования сложнопрофильных каналов проточной части форсунок путем комбинированного растворения технологических вставок с удалением продуктов обработки локальным ультразвуковым лучом, ограниченным подвижными границами, регулируемые циклическими изменениями импульсных воздействий ультразвукового луча.

**Вклад в технологическую науку** - создание новых способов, методов расчета технологических режимов и управления интенсивными комбинированными процессами, совмещающими анодное растворение труднодоступных участков в каналах проточной части форсунок с импульсным управляемым воздействием ультразвукового луча.

### **Практическая значимость включает:**

1. Комбинированные технологические процессы изготовления керамических форсунок с усовершенствованным профилем проточного тракта, обеспечивающим требования разработчиков перспективных конструкций энергетических машин для различных отраслей машиностроения.

2. Новые средства технологического обеспечения для эффективного применения ультразвуковых импульсов с целью удаления продуктов анодного растворения из труднодоступных и удаленных участков каналов в керамических форсунках, что позволило расширить технологические возможности созданных комбинированных методов обработки по созданию керамических форсунок с новыми эксплуатационными характеристиками.

3. Технологические режимы ультразвукового облучения, применение которых обеспечивает получение каналов различного сечения в керамических форсунках и надежно защищает от разрушения концентрированным воздействием переходные участки внутренней поверхности изделий.

4. Новые виды энергетического оборудования с керамическими форсунками, изготовление которых стало возможным с разработкой и применением комбинированных методов обработки по патентам с участием соискателя.

**Вклад соискателя в выполнение работы.** Личное участие при решении всех поставленных задач и получении результатов, имеющих научную и практическую значимость, для обеспечения существенного вклада в развитие технологической науки в машиностроении.

**Автор защищает:**

1. Новые способы и устройства для проектирования комбинированных технологий, совмещающих анодные процессы и импульсные воздействия ультразвукового луча на вставки в каналах керамических форсунок различного профиля, обработка которого ранее считалась неосуществимой или экономически невыгодной, что сдерживало развитие энергетического машиностроения.

2. Механизм локального растворения металлических технологических вставок в каналах форсунок с различным профилем и моделирование комбинированного процесса анодного растворения вставок при импульсных воздействиях на рабочую среду.

3. Методы расчета технологических параметров для проектирования технологических процессов изготовления качественных керамических форсунок, отвечающих запросам разработчиков топливных агрегатов.

4. Опыт применения керамических форсунок и перспективы расширения области их использования в различных отраслях машиностроения.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: XVI Аспирантско-магистерском семинаре (Казань, КГЭУ, 2012 г.); VIII Международной молодежной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2013» (МНТК «ИМТОМ – 2013», Казань, 2013 г.); XVII Аспирантско-магистерском семинаре (Казань, КГЭУ, 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении» (МТЕТ-2014, Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2014 г.); VI Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – основа технологического развития России» (Барнаул, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2014» (МНТК «ИМТОМ-2014», Казань, 2014 г.); XVIII Аспирантско-магистерском семинаре (Казань, КГЭУ, 2014 г.); X Международной

молодежной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2015 г.); 7-й Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015)» (Брянск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2015» (МНТК «ИМТОМ-2015», Казань, 2015 г.); VII Межвузовской научно-методической конференции, посвященной 70-летию Ю.Г. Назмеева «Актуальные вопросы инженерного образования: содержание, технологии, образование» (Казань, КГЭУ, 2016 г.); 8-й Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016)» (Москва, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» в рамках IV Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2017 г.); IX Международной научно-технической конференции ТМ-2017 (ВолгГТУ, 2017 г.); X Международной научно-технической конференции ТМ-2018 (Воронеж, ВГТУ, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 44 научные работы общим объемом 19,4 п.л., где соискателю принадлежит 8,0 п.л. В их число входят монография, 2 патента, 11 публикаций в изданиях по списку ВАК РФ и 1 в системе «Scopus».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, 5 приложений, списка литературы из 109 наименований. Работа изложена на 142 страницах с 34 рисунками и 6 таблицами.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты работы прошли проверку в цехах ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и внедрены в серийное производство для ракетных двигателей, а также на ООО ВСЗ «Холдинг» г. Воронеж с реальным экономическим эффектом. Материалы проведенных исследований используются в учебном процессе Воронежского государственного технического университета, Донского государственного технического университета, Казанского государственного энергетического университета.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности поставленной проблемы, дана формулировка цели и задач исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

**В первой главе** приведен анализ технологических воздействий на эксплуатационные характеристики высоконагруженных изделий.

В результате установлено:

1. Анализ доступных публикаций показал, что наибольший вклад в развитие науки по комбинированным методам обработки внесли академики Б.Р. Лазаренко, Ю.Н. Петров, профессора Седыкин Ф.В., Смоленцевы В.П. и Е.В, а по использованию ультразвуковой технологии - член-корреспондент РАН Приходько В.М., профессора Марков А.И., Сиротюк М.Г., Смоленцев В.П. и ученые их научных школ страны и зарубежья.

2. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что область применения форсунок охватывает не только авиакосмическую отрасль машиностроения, но и энергетику, бытовую технику, технический контроль и другие области промышленности. Проблема повышения ресурса форсунок при подаче горючих жидкостей объективно существует, и поиск новых материалов для изготовления жаропрочных деталей требует решения.

3. Существующие технологические приемы для обработки жаропрочных керамических материалов слабо изучены и имеют большую трудоемкость, что ограничивает их использование в машиностроении, особенно при изготовлении глубоких каналов сложного профиля в соплах форсунок. Поэтому требуется создание новых способов и средств технологического оснащения, из которых наиболее перспективными являются комбинированные методы обработки.

4. Для разработки комбинированных технологических процессов изготовления проточной части форсунок необходимы исследования механизма процесса размерной обработки каналов различного профиля, требуемого разработчиками для обеспечения высокого ресурса технологичных перспективных изделий транспортного и энергетического машиностроения.

5. Требуются детальные исследования технологических режимов и возможностей локального лучевого ультразвукового воздействия с целью интенсификации процесса массовыноса и при анодном растворении металла из глубоких каналов различного профиля и формы оси с переменным межэлектродным зазором. При положительных результатах исследований имеются основания для расширенного использования керамических форсунок для подачи горючих смесей, а также совершенствования технологических процессов обработки керамических материалов.

Проведенный анализ дал возможность формулировать цель и задачи работы, описанные во введении.

**Во второй главе** обоснованы научные гипотезы, позволяющие решить поставленные в работе задачи. Основные из них:

1. В комбинированном процессе, включающем анодное растворение и ультразвуковое локальное воздействие, процесс массовыноса можно интенсифицировать путем создания

кавитационного режима на границе зоны растворения, увеличив за счет этого на порядок и более предельную величину межэлектродного зазора, что дает возможность получения глубоких каналов, в том числе малого сечения, собственных форсунок.

2. При использовании комбинированной обработки могут быть спроектированы технологические режимы, обеспечивающие поддержание массовыноса и гарантирующие сохранность каналов сопел в хрупких керамических материалах под действием ультразвукового луча.

3. Технология комбинированной обработки каналов позволяет обеспечить получение широкого диапазона типоразмеров и формы осей каналов сопел для создания высокоэффективных форсунок, применение которых экономически обосновано во многих отраслях народного хозяйства страны.

4. Интенсивность массовыноса под действием ультразвукового луча зависит от состояния рабочей среды в зоне комбинированной обработки и характеризуется вязкостью среды, а скорость удаления продуктов обработки по глубине канала - от амплитуды колебаний в импульсе.

В главе проанализированы типовые минералокерамические форсунки и обоснован выбор объекта исследований (рис. 1) со сменными диэлектрическими элементами, приведенными на рис. 2.



Рис. 1. Корпуса форсунок для испытаний со сменными вставками



Рис. 2. Сменные вставки для проведения исследований:  
а - полистироловая вставка для проведения холодных испытаний;  
б - керамическая вставка для горячих испытаний.

а

б

Исследования проводились на установке, приведенной на рис. 3.

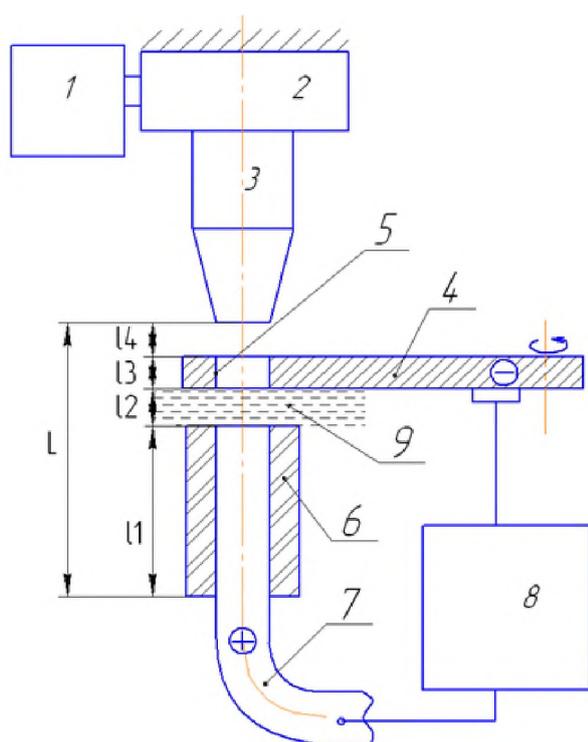


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- 1 - ультразвуковой генератор;
- 2 - преобразователь;
- 3 - излучатель;
- 4 - электрод-инструмент;
- 5 - отверстие для прохождения ультразвукового луча;
- 6 - втулка из минералокерамики;
- 7 - металлическая вставка;
- 8 - генератор тока для электрохимической обработки;
- 9 - электролит;
- $l_1 - l_4$  - участки системы, формирующие межэлектродный зазор с длиной  $l$ .

В главе раскрыты известные ранее исследованные способы комбинированной обработки биматериалов, что послужило научной базой для создания новых способов и устройств для формирования каналов в соплах минералокерамических форсунок.

Для измерения параметров ультразвукового концентрированного воздействия использовались лазерные измерительные установки оценки величины амплитуды колебаний, встроенные измерители и регуляторы частоты, излучатели, аналогичные применяемым для навигационных систем морских судов.

Разработаны пути автоматизации и алгоритм проведения исследований для достижения поставленной цели, где рассмотрена последовательность проведения исследований, обоснованы потребность и состав материальной и научной баз, пути внедрения результатов в авиакосмической отрасли, станкостроении и энергетике.

**В третьей главе** на основе ранее изложенной при анализе механизма процесса физической модели предлагаются механизм и технологические режимы, требуемые к соблюдению при получении в форсунках каналов определенного качества. В процессе моделирования на углубленных участках каналов постоянного и переменного сечения начальным условием будет являться обеспечение поддержания анодного растворения с сохранением геометрии и качества проточной части форсунок.

Граничными условиями до полного растворения вставки следует взять достаточную для очистки обработанной части канала интенсивность ультразвукового луча, но не

превышающую предела, достижение которого приводит к такому повышению температуры рабочей среды, что начинается ее кипение и выделение паров, прекращающих анодный процесс.

Массовынос продуктов обработки зависит от вязкости рабочей среды, которая без учета массовыноса возрастает по мере съема материала вставки, т.е. углубления канала. Установлено, что предельный уровень загрязнения продуктами обработки достигает 50% по массе, после чего анодное растворение вставки затухает.

Наибольшая величина ультразвукового давления зависит от свойств облучаемой среды, в частности, ее вязкости, снижение которой по мере массовыноса определяется амплитудой ультразвуковых колебаний, снижающихся по мере углубления формируемого канала и рассчитываемого в зависимости от соотношения глубины к диаметру канала в конце обработки канала, с учетом других показателей режимов ультразвукового и анодного процессов.

Наибольшее за каждый цикл звуковой волны давление ( $P_m$ , МПа) составит:

$$P_m = \gamma_c C \omega A \cos \omega(\tau - x/c), \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  - плотность среды, через которую поступают ультразвуковые колебания. Рабочую среду при комбинированной обработке можно принять близкой к воде. Тогда  $\gamma_c = 1$  г/см<sup>3</sup>;  $C$  - скорость звука в среде (для воды  $C = 1490$  м/с);  $\omega$  - угловая частота, 1/с (рассчитывается как отношение максимальной скорости ( $V_m$ , м/с) при цикле движения конца излучателя к наибольшей амплитуде ( $A_m$ , м) смещения конца излучателя);  $\tau$  - время (сек.) одного цикла;  $x$  - расстояние от торца излучателя до зоны анодного растворения (м).

Расстояние  $l$ , определяющее условия анодного растворения вставки, будет постоянно возрастать:

$$l_1 = \sqrt{(l_2 + l_3 + l_4)^2 + 2\eta \frac{\alpha}{\gamma_m} \chi (U - \Delta U) \tau}, \quad (2)$$

где  $\eta$  - выход по току;  $\alpha$  - электрохимический эквивалент обрабатываемого материала (А/мм<sup>3</sup>.сек);  $\gamma_m$  - плотность материала (г/мм<sup>3</sup> (1/ом.м));  $\chi$  - удельная электропроводность рабочей среды (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $U$  - напряжение на электродах (В);  $\Delta U$  - потери напряжения (В);  $\tau$  - время (сек.) протекания процесса. Величины  $\eta$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma_m$ ,  $\chi$ ,  $\Delta U$ , рекомендации по выбору  $U$  приведены в литературе.

Звуковое давление (в том числе и его наибольшее значение в цикле) снижается по мере увеличения расстояния  $l$ .

Затухание колебаний происходит по экспоненциальному закону:

$$P|_{l_1} = P_M|_{l_4+l_2+l_3} \exp \alpha l_1, \quad (3)$$

где  $a$  - коэффициент поглощения энергии в канале, зависящий от характеристик среды, формы, геометрии канала. Величина " $a$ " приведена в справочных материалах.

Тогда закон изменения звукового давления для комбинированной обработки каналов примет вид:

$$P = \gamma_c C \omega A \cos \omega \left( \tau - \frac{\sqrt{(l_2 + l_3 + l_4)^2 + 2\eta \frac{\alpha}{\gamma_M} \chi(U - \Delta U) * \tau}}{C} \right) * \exp a l_1, \quad (4)$$

Из разработанной физической модели комбинированной обработки и механизма очистки изделий в ультразвуковом поле следует, что удаление загрязнений с их стенок происходит за счет импульсных воздействий при кавитации, вызывающей образование и взрыв газовых пузырьков в районе нахождения частиц осадков. При обработке начальной части глубоких отверстий малого сечения однозначно имеет место кавитация, однако она скорее всего гасится боковыми стенками узкого канала при увеличении его глубины. В работе приведен механизм удаления образовавшихся продуктов обработки при комбинированном формообразовании проточной части форсунок.

В любом случае звуковое давление должно быть достаточным для преодоления гравитационных сил, действующих на продукты обработки, образовавшихся в период между соседними импульсами ультразвукового луча, проходящего через отверстие в электроде-инструменте. Это позволяет сформулировать математическую модель массовыноса под действием импульсов ультразвуковой частоты. Граничными условиями модели является предельно допустимая концентрация продуктов обработки, имеющих плотность продуктов обработки  $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$ , и составляет не более 5% по объему.

Тогда съем  $\Delta l$  за каждый цикл в конце формирования отверстия во втулке составит:

$$\Delta l = l - \sqrt{l^2 - \frac{2\eta\alpha\chi(U - \Delta U)}{\gamma_M} \cdot \frac{1}{n} \cdot \tau}, \quad (5)$$

где  $n$  - частота вращения электрода-инструмента при наличии в нем одного отверстия для поступления ультразвукового луча.

Объем ( $V_1$ ) снятого с вставки металла (за один цикл):

$$V_1 = F \cdot \Delta l, \quad (6)$$

где  $F$  - площадь сечения канала.

Для круглого отверстия диаметром  $D_0$ :  $F = \frac{\pi D_0^2}{4}$ .

Сопротивление ( $P_n$ ) выносу продуктов обработки из зоны анодного растворения составит:

$$P_n = g\gamma_M V_1 \cdot K_T = g\gamma_M FK_T \left( l - \sqrt{l^2 - \frac{2\eta\alpha\chi(U - \Delta U)}{\gamma_M} \cdot \frac{1}{n} \cdot \tau} \right), \quad (7)$$

где  $K_T$  - коэффициент, учитывающий трение продуктов обработки о стенки канала.

Тогда критерием массовыноса может служить:

$$P = K_B P_n, \quad (8)$$

где  $K_B$  - коэффициент запаса энергии в импульсе для компенсации местных и путевых потерь в канале ( $K_B = 2 - 3$ ).

Можно установить технологический параметр - величину амплитуды  $A$  импульса ультразвукового облучения, смещенного относительно границы прекращения анодного растворения вставки:

$$A = \frac{g\gamma_M FK_T \left( l - \sqrt{l^2 - \frac{2\eta\alpha\chi(U - \Delta U)\tau}{\gamma_M} \cdot \frac{1}{n}} \right)}{\gamma_c C \omega \cos \varpi \left( \tau - \frac{\sqrt{(l_2 + l_3 + l_4)^2 + 2\eta \frac{\alpha}{\gamma_M} \chi(U - \Delta U)\tau}}{C} \right) \cdot \exp al_1}, \quad (9)$$

Амплитуда изменяется от нескольких до 20 - 30 мкм, что является граничным условием при назначении технологического режима ультразвуковой составляющей процесса комбинированной обработки.

На рис. 4 показано влияние величины амплитуды ( $A$ ) продольных колебаний на предельную глубину ( $L$ ) отверстия, получаемого после удаления вставки.

Изменение амплитуды достигалось путем регулирования частоты колебаний в рабочем диапазоне работы излучателя. Этот параметр является настроечным в установке для комбинированной обработки глубоких отверстий.

На рис. 4 точками показаны расчетные амплитуды для различных размеров и глубины отверстий в керамических форсунках.

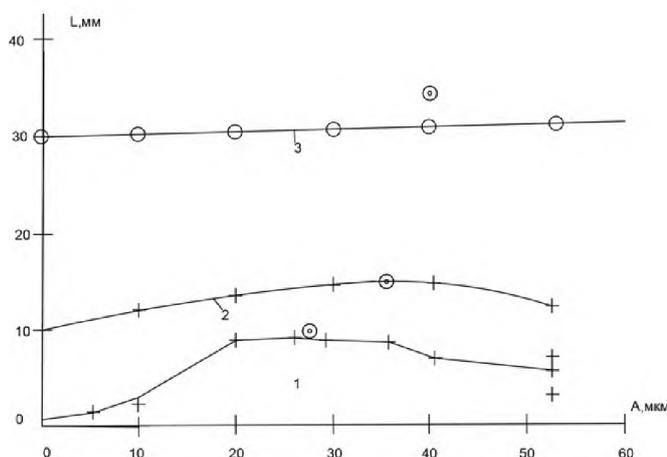


Рис. 4. К определению амплитуды ультразвуковых колебаний в водных электролитах для комбинированной обработки.

Диаметр отверстия, мм:  
1 - 0,3 мм; 2 - 1 мм; 3 - 3 мм.

Как видно из рис. 4, экспериментальные показатели подтверждают правомерность модели.

В главе предложен новый подход к описанию процесса массовыноса продуктов обработки при комбинированной прошивке глубоких отверстий малого сечения путем локального воздействия концентрированного ультразвукового луча, подаваемого в зону обработки в паузах между циклами анодного растворения металлической вставки в керамическом сопле.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили правомерность разработанного механизма массовыноса, что дало возможность спроектировать достоверный процесс обработки проточного тракта в минералокерамических форсунках. Погрешность форсунок укладывается в установленный допуск  $\pm 0,04$  мм при длине канала до 30-50 диаметров.

Раскрыты новые, защищенные патентами России, способы и устройства для комбинированной обработки каналов, используемых в керамических форсунках, что подтверждает новизну и полезность выполненных исследований.

**В четвертой главе** предложена технология комбинированной обработки минералокерамических проточных частей форсунок. Проведены испытания спроектированного процесса на опытной установке для комбинированной обработки, разработаны рекомендации по проектированию промышленных установок с использованием модульного принципа для комплектации изделия из стандартных узлов ранее известных и выпускаемых промышленностью агрегатов.

На рис. 5 показана эффективность применения ультразвукового воздействия для интенсификации массовыноса при удалении вставок с получением отверстий большой глубины.

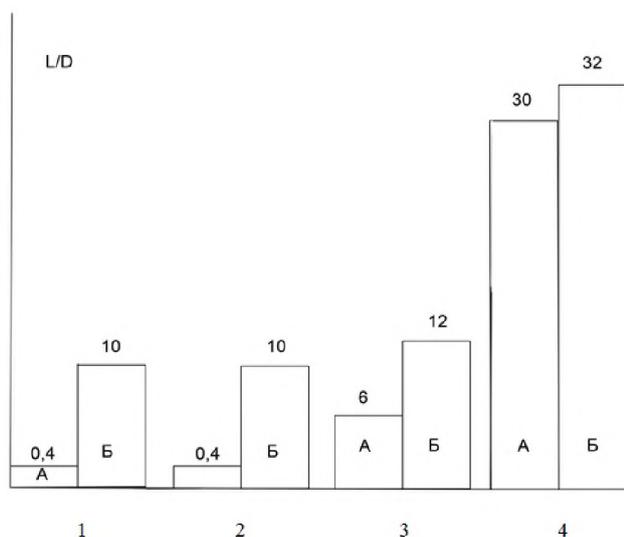


Рис. 5. Предельная глубина снятого участка вставки при формировании канала в керамической форсунке (L - глубина отверстия; D - диаметр отверстия в керамическом сопле). Диаметр отверстия: 1 - 0,25 мм; 2 - 0,45 мм; 3 - 1,0 мм; 4 - 3 мм. А - при электрохимической прошивке; Б - с массовыносом ультразвуковым лучом.

Анализ рис. 5 показывает эффективность облучения зоны обработки (Б на рис. 5). Это наиболее полно проявляется при малых диаметрах вставок, т.е. для размеров, наиболее употребительных для форсунок.

На рис. 6 показано повышение скорости удаления вставки за счет интенсификации массовыноса продуктов обработки импульсами ультразвукового воздействия (Б) для отверстий с диаметром: 0,45 мм (1); 1 мм (2); 3 мм (3).

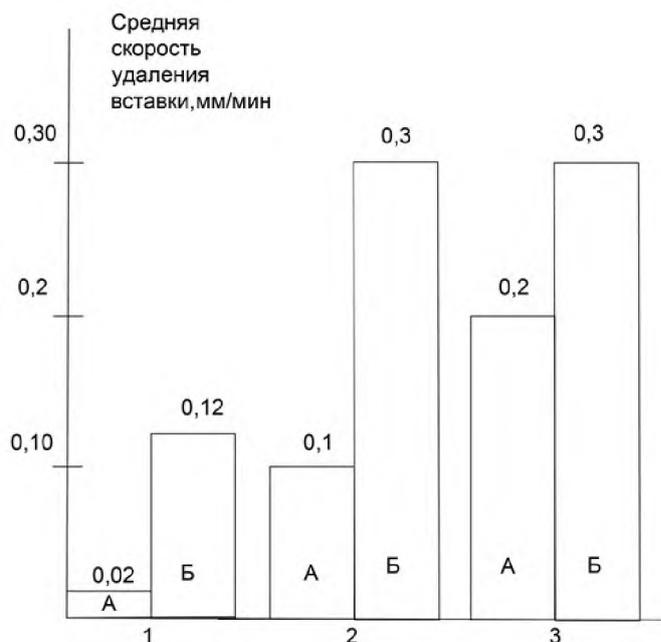


Рис. 6. Средняя скорость (мм/мин) удаления вставок из керамических форсунок

При комбинированной обработке напряжение на электродах имеет переменную величину и увеличивается по мере анодного растворения металлических вставок пропорционально глубине канала в диапазоне от 6-8 В в начале обработки и до 36-40 В в конце формирования канала. В качестве рабочей среды рекомендованы электролиты, применяемые для электрохимической размерной обработки материала металлической вставки.

Интенсификация массовыноса ультразвуковым воздействием (рис. 6) обеспечивает допустимую для анодного растворения вязкость рабочей среды до 50 % по массе и ускоряет скорость растворения вставки независимо от ее диаметра, но наибольшая эффективность воздействия луча имеет место при изготовлении керамических форсунок с малым сечением канала.

Разработана методика расчета энергетических параметров излучателя, в частности, интенсивность излучения (в диапазоне 10-15 Вт/мм<sup>2</sup>), требуемая для получения глубоких отверстий после удаления вставки, что позволяет с учетом изменения коэффициента

полезного использования энергии от глубины обработки (снижение от 0,6-0,7 до 0,07-0,08) выбрать излучатель требуемой мощности из объектов, выпускаемых промышленностью.

Приведены результаты успешного использования керамических форсунок в изделиях машиностроения.

Холодные и горячие испытания проводились по методике и на образцах, приведенных в главе 2 работы. Было выяснено, что расход и распыл форсунок при горячих сравнительных испытаниях практически не изменялся для всех видов форсунок с одинаковой геометрией сопла, хотя при замене проточной части на минералокерамические наблюдалось возрастание стабильности процесса течения жидкого топлива и снижение количества загрязнений канала. Основным оценочным показателем полезности использования минералокерамических форсунок была выбрана работоспособность при рабочей температуре изделия. Оценку назначали по времени износа на срезе сопла, при котором образуется завышенное скругление, что обнаруживается при испытаниях по изменению распыла. При диаметре отверстия в форсунке на рис. 7 скругление кромки (испытания проводились без принудительного охлаждения форсунки) при температуре 1300К не должно превышать 0,09 мм, что позволяет оценить период ее работоспособности и назначить ресурс на стадии отработки технологичности изделия. При этом следует учитывать, что при эксплуатации изделий температура может быть (например, за счет охлаждения) значительно ниже применяемой при испытаниях. Поэтому величина ресурса может возрастать в несколько раз, и ее выбирают как соотношение с базовым вариантом испытаний.

Результаты испытаний приведены на рис. 7.

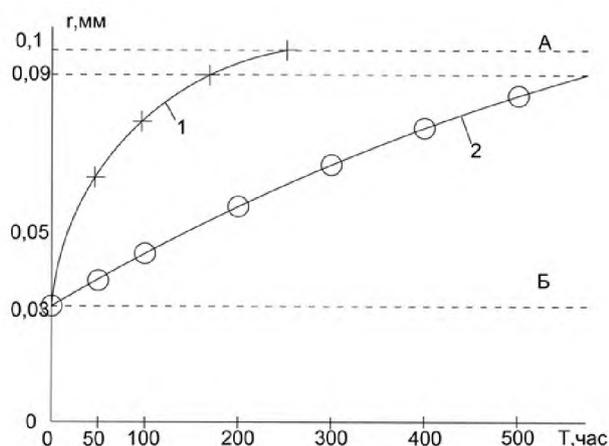


Рис. 7. Изменение радиуса (r) скругления кромки сопла по мере наработки (T) форсунки (межремонтный период)  
1 - из нержавеющей стали;  
2 - из минералокерамики.  
А, Б - верхняя и нижняя границы изменения радиуса (r) скругления кромки сопла.

Анализ рис. 7 показал, что при исследуемых условиях эксплуатации ресурс минералокерамической форсунки более, чем в 3 раза превышает тот же показатель, полученный для штатной металлической форсунки.

Стоимость керамического изделия выше на 15-20%, но повышение ресурса доказывает целесообразность использования новых форсунок и обоснованность исследований по рассматриваемым в работе методам обработки каналов в керамических материалах. При этом наиболее эффективно применение таких форсунок в энергетическом машиностроении.

**Заключение.** Разработаны новые способы и устройства для проектирования комбинированных технологий, совмещающих анодные процессы и импульсные воздействия ультразвукового луча на вставки в каналах керамических форсунок различного профиля.

Создана методика расчета технологических режимов и проектирования технологических процессов комбинированной обработки сложнопровильной проточной части керамических форсунок с обеспечением повышенных эксплуатационных характеристик при их применении в тепловых агрегатах различного назначения.

Приведен опыт применения керамических форсунок и перспективы расширения области их использования в различных отраслях машиностроения.

#### **Общие выводы**

1. Проведен аргументированный анализ возможностей разработанных комбинированных технологических процессов для изготовления каналов требуемого профиля в керамических форсунках, разрабатываемых для перспективных конструкций энергетических машин.

2. Раскрыт механизм воздействия ультразвукового луча на массовынос продуктов анодного растворения, что стало базой для моделирования процесса комбинированной обработки и создания методики расчета технологических режимов изготовления каналов проточной части керамических форсунок с учетом условий их эксплуатации.

3. Обоснован выбор амплитуды ультразвуковых импульсов в пределах 20-30 мкм для обеспечения массовыноса продуктов обработки из глубоких отверстий малого сечения.

4. Установлено, что эффективность ультразвуковой интенсификации процесса снижается по мере увеличения площади проходного сечения канала и наибольший эффект комбинированная обработка имеет при изготовлении каналов, применяемых в керамических форсунках.

5. Установлены рациональные режимы комбинированного удаления металлических технологических вставок в глубоких каналах малого сечения керамических форсунок с сохранением качества их поверхностного слоя. При расчете мощности излучателя для большинства применяемых жаростойких керамических материалов минимальную интенсивность ультразвуковых колебаний рекомендовано выбирать в диапазоне 10-15 Вт/мм<sup>2</sup>, а рассогласование границ отверстия защитного диска и канала в форсунке – не более

10% от наибольшей величины сечения в месте анодного растворения металлической вставки. Частоту ультразвуковых колебаний выбирают в диапазоне 16-22 кГц в зависимости от стабилизированных значений на ультразвуковом генераторе.

Напряжение на электродах имеет переменную величину и увеличивается по мере анодного растворения металлических вставок пропорционально глубине канала в диапазоне от 6-8 В в начале обработки, до 36-40 В в конце формирования канала. В качестве рабочей среды рекомендованы электролиты, применяемые для электрохимической размерной обработки материала металлической вставки.

6. Создана опытная установка для комбинированной обработки, позволившая разработать рекомендации по проектированию промышленных установок. Особенностью таких проектов является использование модульного принципа для комплектации изделия из стандартных узлов ранее известных и выпускаемых промышленностью агрегатов.

7. Проведены опытные и промышленные испытания предложенного комбинированного способа обработки и созданного оборудования, что доказало возможность получения каналов в минералокерамике с погрешностью  $\pm 0,04$  мм при их глубине до 30 - 50 диаметров, что ранее считалось неосуществимым. Полученные результаты отвечают запросам разработчиков энергетических машин, применяющих керамические форсунки для подачи топлива.

8. Раскрыты перспективы применения керамических форсунок, каналы в которых могут обрабатываться предложенным комбинированным методом, для создания высокоресурсных тепловых агрегатов новых поколений техники.

### **Публикации по теме диссертации**

#### **Публикации по Scopus:**

1. Skrygin O.V. Preparing automated of the software complex for technological processes with imposition of an electric field / O.V. Skrygin, V.P. Smolentsev, E.A. Saltanaeva // ICE 2019. // IOP Conferece Series:Materials Science and Engineering /IOP Pulishing, 2019.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

2. Смоленцев В.П. Технология получения нанопокровтий в каналах малого сечения / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, И.И. Коптев, Е.А. Салтанаева // Наноинженерия. – 2012. - №10. С. 3-7.

3. Смоленцев В.П. Технология электрохимического получения теплообменных поверхностей для интенсивного охлаждения / В.П. Смоленцев, А.А. Коровин, И.И. Коптев, Е.А. Салтанаева // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. - №1. – С. 34-40.

4. Коптев И.И. Изготовление и комплектация форсунок для подачи горючих смесей / И.И. Коптев, В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, Е.А. Салтанаева // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013 – №1. - С 3-11.

5. Смоленцев В.П. Разработка ультразвукового блока для комбинированной обработки каналов / В.П. Смоленцев, И.Г. Дроздов, Е.А. Салтанаева // Научные технологии в машиностроении. - 2013. - №10. – С.13-18.

6. Салтанаева Е.А. Изготовление отверстий в керамических форсунках системы подачи топлива энергетических установок / Е.А. Салтанаева, К.М. Газизуллин // Проблемы энергетики. – 2013. - №11-12. – С.68-76.

7. Таймаров М.А. Исследование режимных параметров работы котлов при сжигании мазута с повышенным содержанием воды / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Е.А. Салтанаева, Р.Г. Сунгатуллин, Д.Г. Хусаинов // Вестник КГЭУ. - 2017. - №2 (34). - С. 68-75.

8. Таймаров М.А. Тепловые потоки от факела в котлах с различной компоновкой горелок / М.А. Таймаров, Е.А. Салтанаева, Е.А. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин, Аль Зубайди Али Талиб Салих // ИВУЗ. Проблемы энергетики. - 2017. - Т.19. - № 9-10. - С. 50-58.

9. Салтанаева Е.А. Информационные аспекты понятия "Сценарий аварийной ситуации" в области промышленной безопасности / Е.А. Салтанаева // International Journal of Advanced Studies. 2018. Т. 8. № 4-2. С. 117-121.

10. Сафонов С.В. Технология комбинированной обработки рабочего канала в высокоресурсных форсунках из минералокерамических материалов / С.В. Сафонов, Е.А. Салтанаева, О.В. Скрыгин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. - № 1. - Т.15. - С. 91-95.

11. Таймаров М.А. Радиационные характеристики факела в топках котлов при сжигании высокообводненного мазута / М.А. Таймаров, Е.А. Салтанаева // Вестник КГЭУ. - 2019

12. Смоленцев В.П. Комбинированная обработка каналов в керамических деталях / В.П. Смоленцев, А.А. Широкожухова, С.В. Сафонов, Е.А. Салтанаева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. - № 5.

#### **Монография:**

13. Таймаров М.А. Тепловое излучение в топках котлов / М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, С.М. Маргулис, Е.А. Салтанаева - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – 126 с.

#### **Патенты:**

14. Патент 2537410. Российская Федерация. 23Н. Электрод-инструмент для прошивки отверстий / В.П. Смоленцев, Е.А. Салтанаева и др.; заявитель и патентообладатель

Воронежский государственный технический университет. - № 2012140004/02; заявл. 18.09.2012; опуб.10.01.2015, Бюл. № 1.

15. Патент 2537409. Российская Федерация. 23Н. Инструмент и способ калибровки отверстий малого сечения в форсунках / В.П. Смоленцев, И.И Коптев, Е.А. Салтанаева, Е.В. Смоленцев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2012140003/02; заявл. 18.09.2012; опуб.10.01.2015; Бюл. № 1.

Подписано в печать 12.09.2019.  
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 80 экз. Заказ № 96

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