

На правах рукописи



СКРЫГИН Олег Викторович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
В КАВИТАЦИОННОМ РЕЖИМЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)

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

Официальные оппоненты: **Иванов Владимир Витальевич**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Донской государственный технический
университет», профессор кафедры «Технология
машиностроения»

Козлов Андрей Александрович
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Липецкий государственный технический
университет», доцент кафедры «Технология
машиностроения»

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

Защита состоится 20 мая 2020 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 19 марта 2020 г.

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



Кириллов Олег Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В электрических методах обработки технологические показатели процессов зависят от скорости и равномерности массовыноса продуктов из зоны съема припуска. В большинстве известных методов в качестве рабочих сред используют жидкости, от режима течения которых зависит интенсивность удаления припуска и возможность протекания процесса обработки. Для этого в большинстве способов применяется жидкая рабочая среда, протекающая через межэлектродное пространство. Для интенсификации массовыноса продуктов обработки при комбинированных способах может дополнительно использоваться постоянное или импульсное механическое воздействие электрода-инструмента, концентрированное влияние энергии теплового луча, ультразвука и другое. Традиционно считалось, что для стабилизации процесса необходимо стремиться к получению ламинарного постоянного или дискретного течения потока в межэлектродном зазоре. Однако при этом не удавалось повысить массовынос продуктов обработки, что ограничивало возможности электрических методов обработки в основном по повышению производительности обработки. Известно большое количество изобретений ученых и практиков Москвы, Тулы, Самары, Перми, Казани, Санкт-Петербурга, Воронежа, Рыбинска, Ростова-на-Дону по ускорению массовыноса загрязнений из зазора путем турбулизации потока в зоне обработки, например, введением жидких и газообразных сред. Наблюдалось ускорение съема припуска, но сопутствующее нарушение стабильности процесса и усложнение оборудования практически не позволили широко применять такие методы в производстве. Нестабильность вызывалась ограничениями близкорасположенных сторон межэлектродного зазора и образованием в них местных перекрытий каналов течения жидкости газообразными продуктами обработки, которые разделяли поток и создавали зоны с пониженным съемом металла. Попытки создания импульсного течения рабочей среды за счет кавитационного воздействия показали перспективность метода, но для этого потребовались серьезные исследования процесса, выполненные в рассматриваемой работе и реализованные для расширения области использования электрических методов обработки при создании перспективных изделий новых поколений.

Работа выполнялась по тематическим карточкам на научные исследования Роскосмоса России 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 одним из научных направлений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Научная задача включает необходимость создания новых методов и средств для ускорения массовыноса продуктов обработки при комбинированных методах формообразования с импульсным течением рабочей среды, формируемым от

кавитационных воздействий, создаваемых вне зоны протекания процесса съема припуска.

Целью работы является расширение технологических возможностей электрических методов обработки путем интенсификации массовыноса продуктов обработки рабочей средой, подаваемой в зону обработки при кавитационном течении жидкости.

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

1. Описание механизма суммарного постоянного давления на продукты обработки рабочей средой и импульсного воздействия потока в режиме кавитации на стабильное ускорение массовыноса продуктов обработки из удаленных и труднодоступных для подвода инструмента обрабатываемых участков заготовки.

2. Создание системы управления процессом импульсного воздействия кавитационного потока для интенсификации массовыноса при комбинированной обработке профильным инструментом и разделении непрофилированным электродом заготовок повышенной толщины.

3. Обоснование граничных режимов для создания импульсных воздействий от кавитационного потока на переходных участках с гарантией сохранности их геометрии в процессе обработки.

4. Разработка методики выбора и расчета технологических режимов для проектирования процессов комбинированной обработки с кавитационной интенсификацией массовыноса.

5. Создание новых способов и средств технологического оснащения для расширения возможностей комбинированных методов обработки труднодоступных для профильного инструмента участков деталей и разделения непрофилированным электродом заготовок повышенной толщины.

Объект исследований – глубокие каналы и отверстия, сложнопрофильные труднодоступные для профильного инструмента участки металлических заготовок и детали повышенной толщины при необходимости их разделения непрофилированным проволочным электродом.

Предмет исследований – механизм комбинированной обработки с интенсификацией массовыноса импульсами кавитационного воздействия жидкости на продукты обработки

Методы исследований и достоверность результатов

В процессе выполнения работы соискатель базировался на теоретических материалах классических закономерностей в области технологии машиностроения, электрических методов обработки, закономерностях проектирования комбинированных технологических процессов, теоретических положениях о подобии в технике, теории кавитационных течений жидкостей, регулирования процессов в условиях ограничений. Достоверность результатов обоснована высокой сходимостью

расчетных и экспериментальных результатов и положительными показателями при испытании изделий в производственных условиях.

Научная новизна исследований:

1. Разработан механизм массовыноса для интенсификации процессов электрических методов обработки путем импульсных воздействий на рабочую среду от очагов кавитационного перемещения жидкости вне зоны обработки детали.

2. Проведено моделирование процесса интенсификации массовыноса при обработке труднодоступных для профильного инструмента участков заготовок и разделении непрофилированным электродом деталей повышенной толщины путем создания насосного эффекта от кавитационного импульсного воздействия на поток жидкой рабочей среды.

3. Созданы новые, защищенные патентами, способы получения кавитационного течения рабочей среды с импульсными воздействиями на загрязнения в зоне обработки с учетом условий течения жидкости через межэлектродное пространство.

Практическая значимость результатов исследований включает:

1. Методику проектирования процессов электрических методов обработки в жидкой рабочей среде с повышенными технологическими показателями за счет интенсификации процесса массовыноса продуктов обработки импульсными воздействиями при кавитационном течении рабочей среды.

2. Создание методов и средств технологического оснащения для реализации разработанных способов интенсификации процесса с использованием возможностей кавитационного режима течения рабочей среды.

3. Адаптация механизма массовыноса к условиям обработки профильным и непрофилированным инструментом при комбинированных методах обработки металлических заготовок.

4. Возможности расширения технологических показателей электрических методов обработки за счет интенсификации процесса массовыноса и повышения технологических показателей процессов с использованием результатов исследований в других отраслях машиностроения при создании перспективных изделий машиностроения.

Вклад в области физико-технической обработки

Впервые исследован и реализован механизм обработки в кавитационном режиме течения через межэлектродное пространство жидкой рабочей среды с направленным воздействием на твердые и газообразные загрязнения импульсами различных (от низких до ультразвуковых) частот.

Личный вклад соискателя

Личное участие в постановке и решении поставленных задач, получение и анализ результатов, составляющих теоретическое и практическое содержание

научных исследований по теме диссертации, реализация материалов при внедрении их в промышленное производство.

Автор защищает:

1. Новые способы и устройства для создания и реализации разработанных процессов электрических методов обработки в кавитационной рабочей среде при импульсных воздействиях на загрязнения, что расширило технологические возможности комбинированных методов на эффективное использование процессов в различных отраслях машиностроения.

2. Механизм создания насосного эффекта импульсным воздействием на загрязнения в межэлектродном пространстве за счет кавитационного течения рабочей среды при формировании зоны кавитации до места удаления припуска, что позволило снизить влияние обработанных поверхностей в зазоре на стабильность съема материала профильным и непрофилированным индивидуальным и многоэлектродным инструментом.

3. Теорию интенсификации массовыноса с управляемым изменением режимов при различных видах электрических методов обработки.

4. Методики расчета технологических режимов и проектирование процессов комбинированной обработки с интенсификацией массовыноса продуктов обработки и с учетом обеспечения получения заданных технических условий на деталь

5. Пути повышения технико-экономических показателей предложенных методов обработки и средств технологического обеспечения при изготовлении освоенных и вновь создаваемых изделий авиакосмической отрасли и продукции других отраслей машиностроения.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: Международной научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» в рамках IV Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017); X Международной научно-технической конференции (ТМ-2018), (Воронеж, 2018); IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (от получения до утилизации), (Иркутск, 2019); Международной научно-технической конференции ССП-2019 (Воронеж: 2019); Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Совершенствование технологических процессов в машиностроении» (Чебоксары, 2019); XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (Калининград, 2019); X Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (ИнМаш-2019) (Кемерово-Шерегеш, 2019); Научном симпозиуме технологов–машиностроителей (с международным участием) «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких

технологических систем формообразования и сборки изделий» (Ростов-на-Дону, п. Дивноморское, 2019).

Реализация и внедрение результатов работы. Материалы диссертации реализованы в цехах ВМЗ – филиала ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева и внедрены в серийное производство для ракетных двигателей, а также нашли использование в АО КБХА с реальным экономическим эффектом. Результаты применяют ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ общим объемом 11,38 п. л., где соискателю принадлежит 4,51 п. л. В их число входит монография, 5 патентов, 7 публикаций в изданиях по списку ВАК РФ и 2 публикации в системе «Scopus».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, приложений, списка литературы из 102 наименований. Работа изложена на 144 страницах, содержит 37 рисунков и 8 таблиц.

Основное содержание работы

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

В первой главе приведен анализ информации по массовыносу продуктов обработки путем импульсных воздействий, формирующихся в кавитационной среде.

Анализ состояния исследований по рассматриваемой проблеме показал: исследования по массовыносу при течении рабочей среды в кавитационном режиме, направленные на интенсификацию процессов комбинированной и других электрических методов обработки в жидкой рабочей среде, проводятся учеными научных школ Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Уфы, Тулы, Орла, Воронежа, Ростова-на-Дону, Рыбинска, Саратова, Самары, Новосибирска и других городов России, а также в США, Японии, Англии, Германии, Китае и в других странах.

Анализ доступных литературных источников дает основания утверждать, что вопросами исследований процессов комбинированной обработки с учетом кавитации и проводимости рабочей среды практически не исследована и часть полученных в работе результатов представлена впервые на примерах использования в авиакосмической отрасли машиностроения. Наиболее близкими материалами являются исследования в области кавитационных явлений при ультразвуковой промывке деталей от загрязнений. Показано, что применение полученных результатов исследований по теме диссертации может заметно расширить технологические возможности электрических методов обработки, служить базой для уточнения требования к приобретаемому или вновь создаваемому оборудованию. Приведенное в работе направление исследований является новым и перспективным

для технологии комбинированных методов обработки, а поставленная в работе цель и решенные задачи актуальны для промышленности.

Во второй главе обоснованы пути и последовательность решения поставленных задач путем интенсификации процесса массовыноса при комбинированной обработке в кавитационном режиме.

Предложены и обоснованы научные гипотезы, положенные в основу научных исследований по теме работы:

1. Формирование очагов кавитационного течения возможно выполнять вне зоны протекания процесса обработки путем создания импульсных воздействий на твердые и газообразные продукты обработки в межэлектродном пространстве, обеспечивающих интенсификацию массовыноса загрязнений.

2. Ядрами кавитации при течении жидкой среды являются твердые и газообразные продукты обработки, возникающие в процессе тепловых и химических преобразований в зоне протекания процесса и переносимые жидкостью от очагов формирования кавитации.

3. Перемещения продуктов обработки в межэлектродном пространстве под действием импульсов можно рассматривать как составляющие скорости течения рабочей среды, поэтому для увеличения массовыноса следует при проектировании технологических процессов обеспечивать сближения векторов течения от прокачки жидкости и импульсных перемещений в направлении вывода ее из межэлектродного зазора.

4. Верхняя граница плотности энергии импульса кавитации не может превышать предельного значения, вызывающего разрушение поверхностей обработанной части детали при любой траектории течения потока по межэлектродному пространству.

5. Импульсное силовое воздействие на продукты обработки при кавитационном течении может создавать на них давление, превышающее сопротивление трения между границами детали в зоне обработки, загрязнениями и электродом. Это позволяет интенсифицировать массовынос и снизить ограничения на скорость удаления припуска при электрических методах обработки, в том числе при комбинированных процессах.

6. Если процесс обработки протекает в электролите, то можно снизить напряжение подаваемого импульса тока и формировать очаг кавитации при напряжении от генератора оборудования без комплектации установок отдельными источниками питания.

7. Сечение газообразной составляющей продуктов обработки может быть принято круглым с диаметром, равным величине межэлектродного зазора. Эта составляющая может включать твердые частицы и при больших импульсных давлениях при кавитации ведет себя как твердое тело, поэтому в нашей работе следует называть ее «газовая гранула», что расширяет принятую терминологию, но

вполне отвечает ее функциональному назначению при электрических методах обработки.

8. Давление от импульса на твердые и газообразные элементы в каждом сечении межэлектродного пространства одинаково и действует в одном направлении.

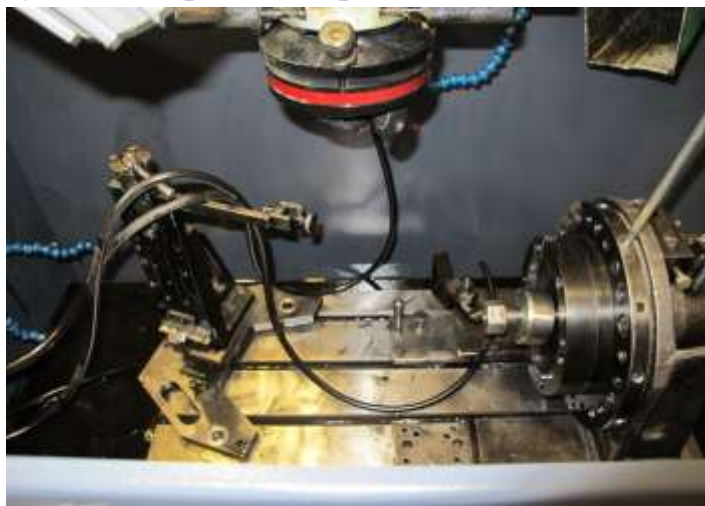
9. Объемная концентрация продуктов обработки на входе в межэлектродный зазор не изменяется по периметру зазора в течение всего периода протекания процесса.

Обоснованы основные направления исследований, выбор материальной базы и выбор объектов для проведения экспериментальных работ.

При выборе средств технологического оснащения для проведения экспериментальных исследований использовалось серийное отечественное и зарубежное оборудование, где используются новые методы струйной подачи рабочей среды. Для создания кавитационного режима течения жидкости были созданы новые блоки (рисунок 1, а) с регулируемым давлением подаваемой жидкости и возможностью ее импульсной подачи в зону течения рабочей среды.



а)



б)

Рисунок 1 – Экспериментальное оборудование:

- а) узел с форсункой для импульсной подачи рабочей среды;
- б) установка для исследования кавитационного течения рабочей среды

Некоторые эксперименты выполняли на специально созданной установке (рисунок 1, б) с индивидуальной форсункой. Кроме того, применялись ультразвуковые установки с блоками для локальной очистки деталей от загрязнений концентрированным лучом.

В качестве объекта исследования выбраны монолитные фильтры тонкой очистки с глубокими каналами многогранного сечения со сквозными отверстиями и детали с глухими отверстиями, сложнопрофильные труднодоступные для профильного инструмента участки металлических заготовок и металлические детали повышенной толщины при необходимости разделения их непрофилированным проволочным электродом.

Сформирована последовательность решения поставленных задач, необходимых для достижения поставленной цели. Разработан алгоритм выполнения работы, позволяющий ускоренно достичь поставленной цели. В нем учтены основные этапы проведения требуемых исследований, связь между этапами при выполнении работы, создание новых способов и устройств для реализации результатов в проектируемых технологических процессах.

В третьей главе приведен механизм интенсификации массовыноса из межэлектродного пространства продуктов обработки, который содержит новый подход к интенсификации массовыноса путем импульсного воздействия на рабочую среду с целью формирования вне зоны обработки кавитационного течения жидкости.

Рассмотренные в работе этапы массовыноса позволяют разработать модель массовыноса при комбинированной обработке в жидкой рабочей среде. Здесь в качестве начальных условий построения модели принято, что перед кавитационным процессом уже имеются необходимые для этого условия, в частности, присутствуют частицы газа и твердых продуктов обработки, образующихся в процессе вскипания при электрических разрядах или как результат химических реакций.

Граничным условием существования кавитационного течения может служить критерий массовыноса. Применительно к комбинированным методам обработки перемещение жидкости в межэлектродном зазоре возможно только до полного запираания течения газообразными продуктами обработки, наличие которых было убедительно подтверждено скоростными съемками. При этом рост газовых пузырей ограничивается границами межэлектродного зазора, после чего массовынос затухает. Тогда критерий массовыноса может быть представлен в виде

$$\tau_1 \geq \tau_2 \quad (1)$$

где τ_1 – время роста в межэлектродном зазоре газового пузыря от его образования и увеличения диаметра за счет слияния с другими или пополнения объема до достижения диаметра, равного межэлектродному зазору;

τ_2 – время протекания жидкости с газовыми пузырями через зазор от зоны обработки, где возникают пузырьки, до выхода из зазора.

Критерий (1) определяется интенсивностью массовыноса и характером течения рабочей среды. Время τ_1 зависит от режимов обработки, длины тракта, условий течения жидкости и многих других факторов. Теоретически рассчитать его величину практически невозможно, поэтому этот параметр устанавливают экспериментально для наиболее сложных условий эвакуации продуктов обработки. Так для прошивки глубоких отверстий малого диаметра τ_1 изменяется в диапазоне от 1 до 12 с.; при обработке длинномерных лопаток турбин этот показатель может быть от 5 до 15 с.

Для назначения технологических режимов необходимо установить длительность воздействия τ_2 импульса для очистки межэлектродного зазора.

В литературе интенсивность массовыноса предлагается оценивать процентным содержанием твердых продуктов обработки относительно жидкой фазы (для электрохимической обработки такое соотношение ограничено 1-1,2 %). Это не

противоречит предложенному нами критерию (1), т.к. после выхода рабочей среды из зазора газовая фаза самоустраняется и оценка возможности появления кавитационного режима проводится по количеству твердой фазы. Соотношение этих фаз в зазоре при одинаковых режимах обработки остается практически неизменным.

Применительно к кавитационному режиму течения жидкости в зазоре по критерию (1) предельная длина пути L , где имеет место массовынос, составляет

$$L = V_{cp} \tau_2 n, \quad (2)$$

где V_{cp} – средняя скорость течения жидкости с пузырьками газа после действия импульса от кавитационного течения.

В рассматриваемом случае кавитационный режим поддерживается n импульсами разряда в жидкости.

$$n = \frac{L}{V_{cp}(T_1 + T_2)}, \quad (3)$$

где T_1 – время действия импульса на жидкость при разряде;

T_2 – длительность паузы между импульсами разрядов (зависит от времени накопления заряда).

Длительность воздействия τ_2 каждого импульса для очистки межэлектродного зазора длиной L_3 зависит от скорости газовых гранул V_{gp} , вызванных разрядом на входе в зазор и вызвавшим кавитацию рабочей среды в зазор:

$$\tau_2 = \frac{L_3}{V_{gp}}. \quad (4)$$

Объем каждой гранулы при электроэрозионной обработке зависит от энергии импульса с учетом коэффициента полезного ее использования. Следовательно, этот диапазон размеров можно принять и для комбинированных процессов с наложением электрического поля.

С учетом (4) для сферических газовых частиц с плотностью ρ_2 и радиусом r_{gp} можно найти их ускорение a под действием импульса:

$$a = \frac{3F_{gp}}{4\pi\rho_2 r_{gp}^3} \quad (5)$$

где F_{gp} – сила, действующая на гранулу при импульсных воздействиях в случае комбинированной обработки;

ρ_2 – плотность материала гранул;

r_{gp} – радиус гранулы.

Радиус гранулы в момент перекрытия канала течения рабочей среды через межэлектродный зазор S не может быть больше половины этой величины.

По [92] сила F_{zp}

$$F_{zp} = \frac{P_{\phi} r_{zp}}{r_{yв}} S_{zp}; \quad (6)$$

где $r_{yв}$ – радиус ударной волны;

S_{zp} – площадь поверхности гранулы, противолежащая действию импульса жидкой среды.

Газовые пузыри под действием импульса деформируются. При скоростных съемках было установлено, что при давлении жидкости на газовые пузыри форма сферы изменяется за счет образования в месте действия внешнего давления, приобретая плоскую форму. Тогда S_{zp} определяется нормальным сечением гранулы по ее диаметру. Для разрядов, обеспечивающих кавитационное течение, $r_{yв} = 1$ мм.

Массовынос при кавитационном течении зависит от давления импульса на гранулу в зазоре, которая может включать твердую, газо- и желеобразную фазу из продуктов обработки. Если допустить, что в момент разряда импульс действует на все автономные гранулы, а их столкновение в начале движения маловероятно, то гидростатическое давление P_{ϕ} на гранулу от импульса на фронте ударной волны на гранулу r_{zp} составит:

$$P_{\phi} = P_a + \rho_{\phi} V_{зв}^2 \left(\frac{\rho_{\phi}}{\rho_{жс}} - 1 \right) \quad (7)$$

где P_a – атмосферное давление (Па);

ρ_{ϕ} – плотность рабочей среды на фронте ударной волны;

$\rho_{жс}$ – плотность рабочей среды на входе в межэлектродный зазор.

В соответствии с законом сохранения импульса

$$P_{\phi} = \rho_{жс} V_{yв}^2 - \rho_{\phi} V_{зв}^2. \quad (8)$$

Скорость ударной волны $V_{yв}$ (м/сек):

$$V_{yв} = \frac{V_{\phi} \rho_{\phi}}{\rho_{\phi} - \rho_{жс}}. \quad (9)$$

Из теории ударных волн [91]

$$V_{yв} = 0,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_{жс}}}, \quad (10)$$

где K_p (кг·м·сек⁻⁴) – постоянная размерная величина, определяющая возможность осуществления разряда, зависит от режима течения и параметров рабочей среды.

Приравнявая (3.9) и (3.10), находим ρ_ϕ :

$$\rho_\phi = \frac{0,7\rho_{жс} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_{жс}}}}{0,7\sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_{жс}}} - V_\phi}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого случая скорость гранул на фронте ударной волны V_ϕ может быть принята равной 100 м/с.

Из (8) граничным условием формирования кавитационного режима будет давление на фронте ударной волны:

$$P_\phi = \frac{K_{p\min} V_{жс}^2}{4V_{жс}^4} - \rho_\phi V_{жс}^2. \quad (12)$$

Тогда для рассматриваемого случая критерием формирования ударной волны в жидкой рабочей среде является

$$\frac{0,25K_{p\min}}{\rho_{жс}} \geq V_{жс}^4. \quad (13)$$

$$\text{Откуда} \quad K_{p\min} \geq 4V_{жс}^4 \rho_{жс}. \quad (14)$$

С учетом расчетов по (14) можно по $\rho_{жс}$ выбрать определяющий технологический параметр – состояние (концентрация, температура, а иногда и состав) рабочей среды для электрических методов обработки с наложением поля.

Величина P_ϕ зависит от технологических параметров: напряжения на электродах в начале импульса и величины зазора между границей формирования ударной волны и местом воздействия газовой гранулы на продукты обработки. Для каждой схемы обработки величина напряжения устанавливается на основании результатов экспериментальных исследований для наибольшего зазора. Верхним пределом изменения давления на фронте ударной волны является предел сохранения упругой деформации заготовки на участке обработки. Начало текучести материала зависит от температуры и скорости ударной волны (зависимость 10). Если условие (14) не выполняется, то по (3) находят требуемое количество импульсов, отвечающее условию (1).

Расчет параметров импульсного воздействия по приведенной методике позволяет ускорить удаление из зазора продуктов обработки, обеспечить стабильность процесса комбинированной обработки деталей со сложной геометрией межэлектродного пространства для течения рабочих сред.

Приведено экспериментальное подтверждение эффективности кавитационного течения рабочей среды на массовынос.

Показано, что процессы с анодным растворением припуска протекают достаточно устойчиво до достижения объемного содержания продуктов обработки в жидкой среде 1,0–1,2 %. Этот показатель изменяется (рисунок 2) в зависимости от длины тракта и характера течения жидкости

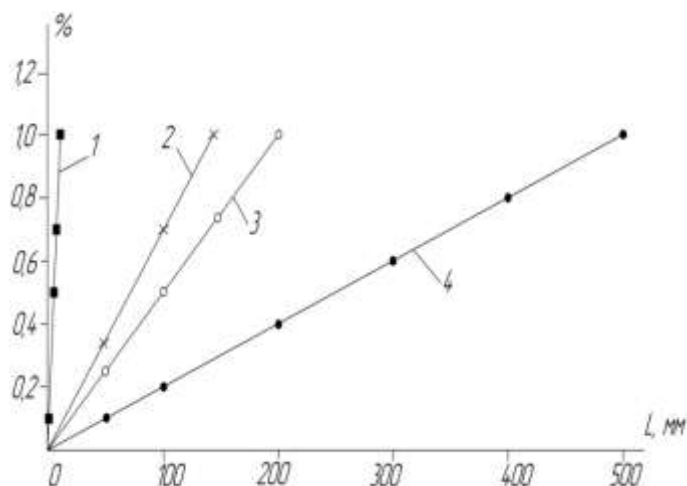


Рисунок 2 - Динамика изменения объемного загрязнения (%) рабочей среды продуктами обработки в месте выхода жидкости из бокового межэлектродного зазора

Способы подачи рабочей среды: 1 - поливом; 2; 3 – без кавитации при средней скорости течения через зазор 1 м/сек (2) и 7 м/сек (3); 4 – при кавитационном течении со скоростью прокачки 5 м/с.

На рисунке 2 показана динамика массовыноса при различных способах подачи рабочей среды на примере эрозионно-химической обработки лопаток газотурбинных двигателей с шириной профиля пера L . Исследования, приведенные на рисунке 2, показывают, что при увеличении длины пути течения рабочей среды от зоны обработки до выхода из зазора преимущества кавитационного режима течения потока значительно возрастают. Так безнапорный режим подачи жидкости поливом (зависимость 1 на рисунке 2) может применяться только при малых (несколько мм) размерах зоны обработки, например, при электрохимическом цветном маркировании, где глубина съема материала не превышает 30 мкм. Зависимости 2 и 3 используют для обработки плоских и плавно изогнутых поверхностей деталей с длиной участков до 200–220 мм. Здесь управление процессом съема припуска осуществляют в основном изменением скорости течения рабочей среды. Однако, как показано на рисунке 2, возможности такого воздействия ограничены и требуют резкого увеличения энергоемкости процесса на создание высокого давления на входе в зазор рабочей среды. На фоне применяемых вариантов подачи жидкости выявляются преимущества кавитационного течения (зависимость 4 на рисунке 2), позволяющего при электрохимической размерной и комбинированной эрозионно-химической обработке получать качественные детали с длиной зоны обработки более 500–600 мм. Это охватывает основную часть изделий, где эффективны электрические методы обработки, а усложнение оборудования для реализации кавитационного режима экономически обосновано.

Результаты, аналогичные приведенным на рисунке 2, получены для прошивки в стали глубоких отверстий диаметром 1–3 мм (рисунок 3).

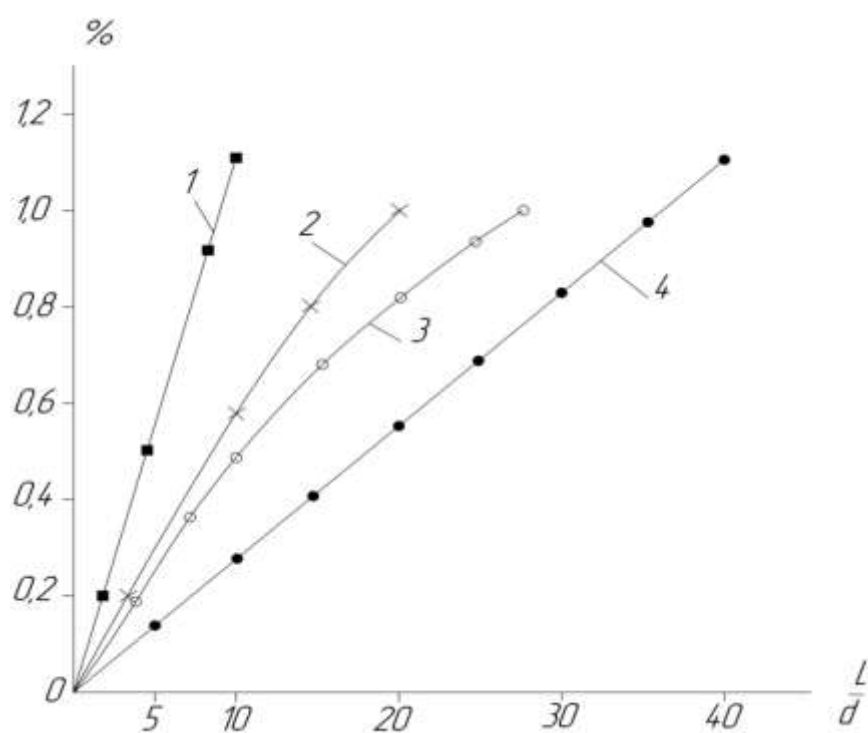


Рисунок 3 – Изменение процентного загрязнения рабочей среды при комбинированной прошивке глубоких отверстий (L – глубина; d – диаметр отверстий)

Способы подачи рабочей среды приведены на рисунке 2. При подаче рабочей среды методом полива (зависимость 1 на рисунке 3) массовынос усиливали за счет вращения профильного электрода-инструмента с частотой 1–2 оборота в секунду. Однако этим методом удалось достичь стабилизации процесса до глубины не более 10 диаметров. Такой прием возможен только при получении круглых одиночных отверстий, как правило, малого диаметра, и требует значительного усложнения оборудования.

Способы подачи рабочей среды в зависимостях 2 и 3 (рисунок 3) позволили достичь значительного увеличения глубины прошивки. Дополнительная интенсификация процесса путем периодического вывода из отверстия электрода-инструмента (зависимость 3) дала возможность повысить глубину отверстия, но в 1,5–2 раза повысила трудоемкость операции. Из рисунка 3 видно, что использование импульсного кавитационного течения (зависимость 4) значительно расширяет возможности прошивки и повышает интенсивность процесса.

В четвертой главе приведена разработанная технология комбинированной обработки в кавитационных рабочих средах. Показана система отработки технологичности изделий под электрические методы обработки, в том числе с учетом характера течения рабочей среды.

Приведена методика расчета параметров импульсов для формирования кавитационного течения рабочей среды в зазоре.

При подборе рабочей среды по (14) находим $\rho_{ж}$. Из условия обеспечения процесса активного анодного растворения обрабатываемого материала подбираем состав и характеристики рабочей среды.

Определяющим параметром процесса является минимальное количество импульсов (n), поступающих на участок обработки детали.

По аналогии с (3)

$$n = L_3 / L_1, \quad (15)$$

где L_3 – длина участка межэлектродного зазора от места обработки до выхода из него гранулы.

Длина пробега гранул L_1 от единичного импульса составляет

$$L_1 = V_{yg} \tau_2, \quad (16)$$

где по (10)

$$V_{yg} = 0,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_{ж}}};$$

где τ_2 – длительность импульса.

Тогда

$$L_1 = 0,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_{ж}}} \cdot \tau_2. \quad (17)$$

Частота следования импульсов f для RC-контуров

$$f = \frac{U_o - U_{np}}{2,3RC \cdot \lg(U_o - U_k)}, \quad (18)$$

где R – внутреннее сопротивление контура (известно из технической характеристики генератора импульсов);

U_o - напряжение на выходе генератора импульсов;

U_{np} - напряжение пробоя межэлектродного промежутка;

U_k – напряжение в конце пробоя;

C - емкость конденсаторов.

Приближенно частота рассчитывается по формуле

$$f = \frac{0,834}{RC}. \quad (19)$$

При формировании разряда основным технологическим параметром является емкость конденсаторов C , которая рассчитывается из модели формирования кавитационного течения рабочей среды.

У современных тиристорных генераторов частота следования импульсов может рассчитываться по (19), регулироваться и подаваться на разрядник непосредственно от генератора.

Рассмотрены примеры интенсификации массовыноса за счет создания в межэлектродном пространстве кавитационного течения рабочей среды. Показаны возможности и преимущества кавитационного течения при обработке деталей с большой длиной тракта для протекания рабочей среды, в случае обработки глубоких отверстий и при разделении заготовок большой толщины непрофилированным

проволочным электродом. Показаны возможности выравнивания условий удаления припуска и увеличения производительности, улучшения точности обработки, качества обрабатываемой поверхности.

На рисунке 4 показано изменение скорости прошивки отверстий диаметром 0,45 мм в пластинах из бронзы при различном течении жидкости и давлении на входе в зону обработки

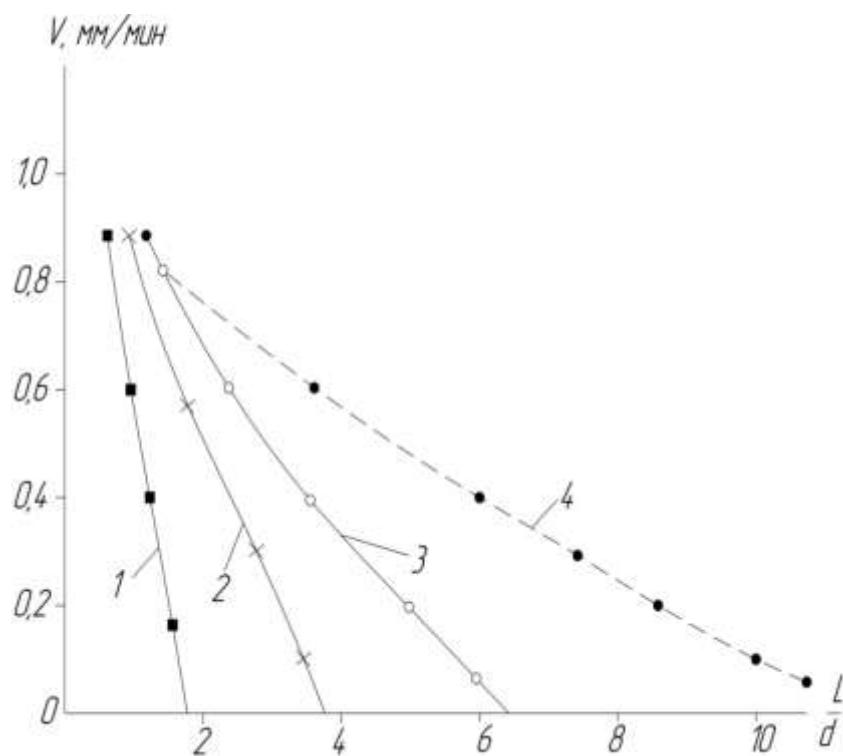


Рисунок 4 – Средняя скорость прошивки V отверстий при различных видах подачи и течения рабочей среды:

1 – полив с вращением и вибрацией электрода-инструмента;
 2 – с прокачкой при давлении жидкости на входе в межэлектродный зазор 0,2 МПа;
 3 – с прокачкой при давлении жидкости на входе в межэлектродный зазор 2 МПа;
 4 – при кавитационном течении жидкости

На рисунке 4 кривая 4 получена при создании кавитационного режима на входе в межэлектродный зазор путем импульсных воздействий разрядов. Испытания такого же режима даже с периодическим кратковременным выводом инструмента и его вибрацией показали, что глубина обработки L может быть повышена до 30–40 диаметров d , а при расширении диапазона их глубины в зависимости от размеров сечения до 50–150 соотношений длины к эквивалентному диаметру.

Показано, что формирование кавитационного режима возможно при низкочастотных и ультразвуковых импульсных воздействиях при их интенсивности при обработке сталей 5–10 Вт/см², для порошковых материалов 3–4 Вт/см². При этом требуется создание давления в импульсе не менее 1,2–1,5 от давления подачи рабочей среды. При многоэлектродной обработке применение кавитационного течения рабочей среды позволяет расширить возможности прошивки одним инструментом каналов малого сечения до 500 отверстий, ускорить процесс от 10 до 15 раз.

Работа внедрена также для станков с проволочным электродом, где получены положительные результаты по увеличению интенсивного разрезания заготовок повышенной толщины (рисунок 5).

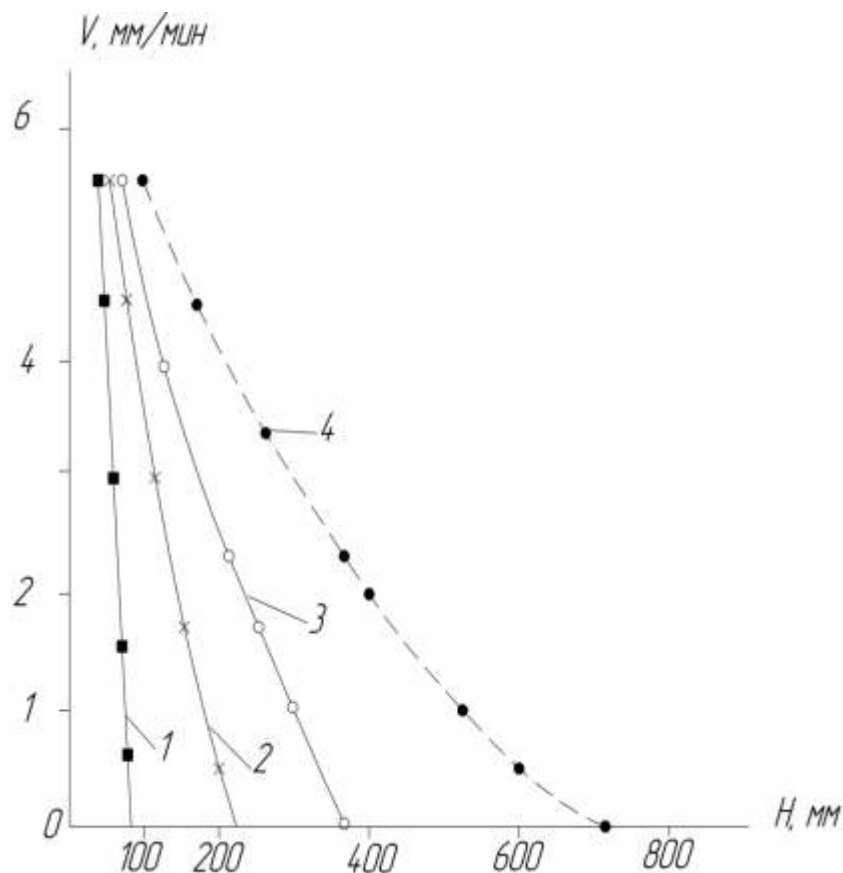


Рисунок 5 – Средняя скорость разделения конструкционных сталей различной толщины H проволочным электродом: 1 – диаметр проволоки 0,1 мм. Обработка в ванне с дистиллированной водой; 2 – диаметр проволоки 0,2 мм. Обработка в ванне с деионизированной водой; 3 – диаметр проволоки 0,25 мм. Обработка с подачей водной рабочей среды через форсунку; 4 – диаметр проволоки 0,3 мм. Обработка с подачей водной рабочей среды через форсунку с импульсным воздействием и формированием кавитационного течения в пазе

Совершенствование процессов обработки и конструкции оборудования позволило (рисунок 5) улучшить и расширить технологические возможности комбинированной обработки непрофилированным электродом-проволокой, в том числе увеличить толщину разрезаемых заготовок до 10–15 раз. Следующим решением в этом направлении является интенсификация массовыноса за счет кавитационных импульсов воздействия на продукты обработки.

Разработаны способы и устройства для комбинированной обработки каналов сопел керамических форсунок, что решило принципиально значимую проблему эффективного использования перспективных материалов с высокой жаростойкостью и обеспечило повышение ресурса тепловых агрегатов, работающих на жидком топливе. Рассмотрена технология комбинированного изготовления форсунок с проточной частью из минералокерамических материалов, позволившая повысить технические характеристики тепловых агрегатов энергетических систем за счет резкого повышения теплонагрузки на форсунки, что улучшает теплоотдачу топлива и показатели тепловых агрегатов.

Рассмотрена специфика формирования системы управления процессами обработки деталей на электроэрозионных и электрохимических станках с ЧПУ, которая показала, что использование для этой цели стандартных программных продуктов, предназначенных для механической обработки, охватывает лишь часть управляющих действий, в основном тех, где отсутствие прямого контакта инструмента с заготовкой не оказывает значительного влияния на формообразование.

Использование метода траекторных преобразователей позволяет учесть не только геометрические, но и аналитические параметры, определяемые режимами электрического поля и гидродинамическими особенностями, влияющими на технологические показатели электрических методов обработки.

Предложенные методы интенсификации массовыноса перспективны также для формообразования сложноконтурных элементов деталей с повышенной длиной межэлектродного промежутка, где для обеспечения высоких технологических показателей требуется обеспечить стабильные условия массовыноса продуктов обработки.

Результаты, полученные при внедрении нового процесса, защищены патентами России и запрошены для расширенного использования предприятиями России, Польши, Китая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны новые способы, средства технологического оснащения для интенсификации процессов массовыноса электрических методов обработки в жидкой рабочей среде при кавитационном течении жидкости, что позволило повысить технологические показатели комбинированных процессов, расширить их технологические возможности и область использования в машиностроении. Материалы работы вносят существенный вклад в развитие электрических методов обработки и технологическую науку по созданию новых и совершенствованию используемых комбинированных процессов.

По материалам работы могут быть получены следующие результаты и выводы:

1. Исследован механизм протекания процессов электрических методов обработки в кавитационном режиме течения жидкой рабочей среды, открывший возможность значительной интенсификации и расширивший область эффективной обработки на глубокие каналы и отверстия малого сечения, труднодоступные участки деталей с ограниченным доступом профильного инструмента, на разделение заготовок повышенной толщины непрофилированным проволочным электродом-инструментом.

2. Доказано, что разработанные новые способы и устройства эффективны при одно- и многоэлектродной обработке, а также в случае значительного удаления электрода от места протекания процесса съема материала.

3. Разработаны технологические режимы с интенсификацией массовыноса продуктов обработки из межэлектродного зазора импульсами воздействия на загрязнения от кавитационных очагов, формируемых до входа жидкости в зону обработки, что обеспечило сохранность геометрии детали после обработки.

4. Показано, что формирование кавитационного режима возможно при низкочастотных и ультразвуковых импульсных воздействиях при их интенсивности

при обработке сталей 5–10 Вт/см², для порошковых материалов 3–4 Вт/см². При этом требуется создание давления в импульсе не менее 1,2–1,5 от давления подачи рабочей среды.

5. Показано, что в рекомендованном диапазоне режимов обработки в кавитационном течении рабочей среды достигается требуемое качество обработанных деталей и наибольшая интенсификация и стабильность процесса удаления припуска.

6. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что применение воздействий импульсов при кавитационном режиме позволяет на порядок и более интенсифицировать массовыйнос продуктов обработки и за счет этого ускорить процесс глубокой прошивки отверстий до 8–10 раз при расширении диапазона их глубины в зависимости от размеров сечения до 50–150 соотношений длины к эквивалентному диаметру.

7. Установлено, что при многоэлектродной обработке применение кавитационного течения рабочей среды позволяет расширить возможности прошивки одним инструментом каналов малого сечения до 500 отверстий и ускорить процесс от 10 до 15 раз.

8. Разработана методика расчета технологических режимов и проектирования процесса комбинированной обработки с адаптацией режимов под заданные технические условия, определяющие условия эксплуатации деталей в изделии.

9. Выполнен технико-экономический анализ комбинированной обработки деталей в кавитационном режиме течения рабочей среды, показавший перспективность нового метода и позволивший наметить эффективные направления дальнейших исследований с учетом выполнения технических условий при изготовлении типовых деталей различных отраслей машиностроения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

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 // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)Volume I

2. Skrygin, O. V. The mass transfer intensification of combined treatment products / O. V.Skrygin, V. P.Smolentsev, A. V.Schednov // MATEC Web of Conferences Volume 1 (2019), X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019) Kemerovo, Russia, November 26-29, 2019 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929701002>

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

3. Смоленцев, В. П. Техничко-экономическое обоснование новых методов обработки и результатов научных исследований в машиностроении [Текст] / В. П. Смоленцев, О. В. Скрыгин, А. В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. – № 4. – С. 140–145.

4. Смоленцев, В. П. Отработка технологичности изделий под электрические методы обработки [Текст] / В. П. Смоленцев, А. И. Портных, О. В. Скрыгин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 11(89). – С. 31–34.

5. Скрыгин, О. В. Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов [Текст] / О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев, А. В. Щеднов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – № 8 – С. 369–374.

6. Скрыгин, О. В. Механизм комбинированной обработки в кавитационном режиме [Текст] / О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев, А. А. Широкожухова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15 – № 3 – С. 122–128.

7. Сафонов, С. В., Технология комбинированной обработки рабочего канала в высокоресурсных форсунках из минералометаллических материалов [Текст] / С. В. Сафонов, Е. А. Салтанаева, О. В. Скрыгин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. – Т. 15. – № 1 – С. 84–89.

8. Скрыгин, О. В. Технология комбинированной обработки при кавитационном режиме течения жидкости в межэлектродном промежутке [Текст] / О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев, А. А. Широкожухова // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – № 8(286). – С. 8–13.

9. Скрыгин, О. В. Механизм комбинированной обработки в кавитационном режиме [Текст] / О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев, А. А. Широкожухова [Текст] // Вестник Воронежского государственного технического университета – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 122–128.

Монография

10. Смоленцев, В. П. Проектирование технологических процессов и обеспечение качества бесконтактной комбинированной обработки (раздел 2) [Текст] / В. П. Смоленцев, О. В. Скрыгин, А. В. Мандрыкин // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: коллект. монография: в 5 т.; под ред. А. В. Киричека.– М.: Спектр, 2015. – Т. 5. – С. 145–179.

Патенты

11. Пат. № 2581538 Российская Федерация, МПК В23Н 9/06. Способ изготовления шаблона [Текст] / В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов, В. И. Котуков, О. В. Скрыгин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ВГТУ». – № 2014117428/02; заявл. 29.04.2014; опубл. 20.04.16, Бюл. № 11. – 5 с.

12. Пат. № 2646652 Российская Федерация, МПК В23Н 5/00, В23Н 1/00, В23К 26/342, В23К 26/354. Способ эрозионно-лучевого упрочнения поверхностей

металлических деталей и устройство для его использования [Текст] / В. П. Смоленцев, М. В. Кондратьев, Е. В. Смоленцев, А. И. Портных, О. В. Скрыгин; заявитель и патентообладатель ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева». – № 1016152372; заявл. 28.12.16; опубл. 06.03.18, Бюл. № 7. – 7 с.

13. Пат. № 2699471 Российская Федерация, МПК В23Н 3/00, В23Н9/00 Способ изготовления и шаблон для электрохимического получения углублений в пазах охлаждающего канала детали [Текст] / В. П. Смоленцев, А. В. Щеднов, О. В. Скрыгин; заявитель и патентообладатель АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева». – № 2018123057; заявл. 25.06.2018; опубл. 05.06.18, Бюл. № 25. – 9 с.

14. Пат. № 2704350 Российская Федерация, МПК В23Н 9/14, В23Н 3/10. Способ прошивки глубокого отверстия и устройство для его прошивки [Текст] / О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев, С. В. Сафонов, Я. С. Смоленцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГТУ». – № 2018139885; заявл. 26.02.2019; опубл. 28.10.19, Бюл. № 31. – 8 с.

15. Заявка на изобретение № 2019104800 Российская Федерация. Способ электрохимической размерной и комбинированной обработки детали и устройство для его реализации / В. П. Смоленцев, О. В. Скрыгин, Я. С. Смоленцева, А. В. Щеднов. // заявка № 2019104800, заявл. 20.02.2019. Решение о выдаче патента 26.12.2019.

Подписано в печать 11.03.2020 г.

Формат 60x84/16. Формат для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № 39

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14