

На правах рукописи

Груздев Андрей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИЙ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО
ДИАМЕТРА ПУТЁМ НАЛОЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ**

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



Москва – 2018

Работа выполнена в Московском Политехническом Университете

Научный руководитель: Саушкин Борис Петрович
доктор технических наук, профессор

Научный консультант: Моргунов Юрий Алексеевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Бойцов Алексей Георгиевич
доктор технических наук, профессор

Иванов Валерий Игоревич
кандидат технических наук

Ведущая организация: Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева

Защита состоится в «__» _____ 2018 г. в _____ час. на заседании учёного
совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат, в двух экземплярах, заверенный печатью ор-
ганизации, просим направлять по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Бау-
мана и на сайте www.bmstu.ru
Телефон для справок: 8(499)267-09-63

Автореферат разослан «__» _____ 201__ г.

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



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Проблема развития технологий получения глубоких отверстий малого диаметра, особенно в материалах, трудно обрабатываемых резанием, решается в современном машиностроительном производстве. Такие отверстия применяются в качестве элементов системы охлаждения деталей горячей части двигателей, турбинных и сопловых лопатках, форсунках, фильтрах.

Одним из перспективных и быстро развивающихся методов получения отверстий является электроэрозионная прошивка, обеспечивающая возможность получения отверстий диаметром до 0,025 мм, с отношением длины к диаметру до 100...200.

При прошивке глубоких отверстий малого диаметра возникают проблемы с эвакуацией продуктов эрозии из межэлектродного промежутка (МЭП). Величина МЭП в зависимости от энергии импульса лежит в пределах от 10 до 100 мкм, что затрудняет естественную эвакуацию продуктов эрозии. Накопление в МЭП продуктов эрозии приводит к снижению скорости обработки из-за увеличения количества непроизводительных импульсов, повышению износа электрода-инструмента (ЭИ), ухудшению качества поверхности.

В связи с этим разработаны различные способы эвакуации продуктов эрозии из МЭП. Исследования влияния условий эвакуации продуктов разряда на технологические характеристики электроэрозионной обработки (ЭЭО) проведены и опубликованы в работах Б.Р. Лазаренко, Б.Н. Золотых, Н.К. Фотеева, М.К. Мицкевича, И.Г. Некрашевича, Б.И. Ставицкого, И.Б. Ставицкого, О.Н. Кавтарадзе, Э.Т. Абдукаримова, А.К. Алтынбаева, А.Г. Бойцова, А.Ф. Бойко, J.Kozak, G. Cusanelli, K. Rajukar, B.H. Yan.

Анализ известных способов циркуляции рабочей жидкости в МЭП указывает на определенные ограничения при их использовании в операции прошивки малых отверстий. Для прошивки таких отверстий необходима разработка новых способов и средств эффективной эвакуации продуктов эрозии, обеспечивающих высокую конкурентоспособность операций электроэрозионной прошивки. К таким способам относят наложение ультразвукового поля на процесс электроэрозионного разрушения материала. Этот способ исследован недостаточно, отсутствуют апробированные в производственных условиях средства технологического оснащения. Таким образом, тема диссертационной работы, направленная на совершенствование технологии электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра путем наложения ультразвукового поля является актуальной, имеет научное и практическое значение.

Целью диссертационной работы является повышение производительности технологической операции электроэрозионной прошивки глубоких отверстий малого диаметра путем наложения ультразвукового (УЗ) поля.

Основные задачи исследования:

1. На основе моделирования основных способов эвакуации продуктов эрозии из МЭП выявить область эффективного применения УЗ поля в операции электроэрозионной прошивки.

2. Предложить механизм воздействия ультразвукового поля на рабочую жидкость, обеспечивающий интенсификацию вывода продуктов разрушения материала из межэлектродного промежутка.

3. Исследовать электроэрозионную обрабатываемость стали 12X18H10T и установить значение удельной эрозии материала в условиях проведения операции прошивки малых отверстий.

4. Выявить влияние ультразвукового поля на технологические показатели (производительность, стабильность машинного времени обработки, качество поверхностного слоя) операции электроэрозионной прошивки.

5. Разработать технологические рекомендации по проектированию технологических процессов электроэрозионной прошивки глубоких отверстий малого диаметра с наложением ультразвуковых колебаний.

6. Разработать и апробировать способ, технологию, оборудование и специальный инструмент для электроэрозионной прошивки глубоких отверстий малого диаметра с наложением ультразвуковых колебаний.

Научная новизна работы.

1. Предложена и обоснована модель процесса ЭЭО, описывающая параболический характер зависимости объемной скорости эрозии материала от энергии разряда. Модель качественно согласуется с ранее полученными экспериментальными данными и позволяет обосновать определяющую роль процесса эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны при решении задачи повышения производительности. Сформулированы и обоснованы ограничения, накладываемые на величину энергии разрядного импульса при прошивке отверстий малого диаметра.

2. На основании полученных экспериментальных данных выдвинута и обоснована гипотеза о том, что в основе механизма повышения производительности ЭЭО при наложении УЗ колебаний лежат акустические кавитационные явления в жидкости и предложена физическая модель циркуляции жидкости в межэлектродном промежутке при прошивке отверстий малого диаметра.

3. Экспериментально уточнено значение удельной эрозии для стали 12X18H10T ($k_m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Дж}$).

Практическая значимость работы заключается в разработке и обосновании технологических рекомендаций, технологических процессов, создании средств технологического оснащения, обеспечивающих проведение высокоэффективных операций электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра с наложением УЗ поля:

1. Разработаны, апробированы и переданы в производство технологические рекомендации по использованию результатов исследования для проектирования технологий электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра.

2. Разработана и апробирована технология прошивки массива из 580 отверстий диаметра 0,25 мм в детали «фильтр» из стали 12X18H10T, обеспечивающая условно-годовой экономический эффект 0,86 млн. руб.

3. Для проведения операции ЭЭО с наложением УЗ колебаний разработаны, запатентованы и апробированы: способ обработки (патент РФ № 2522864),

оборудование (патент РФ № 153266), специальная оснастка (патенты РФ № 153054, № 150978, № 171568), специальный инструмент (патент РФ № 170108).

Достоверность результатов исследований и разработок обеспечивается научно обоснованной методологией теоретических исследований, применением апробированных методик и оборудования для экспериментальных исследований, оценкой точности отдельных измерений, преемственностью полученных результатов и их проверкой в цеховых условиях.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в формулировании задач исследования, разработке общей методики проведения исследований, выполнении и анализе экспериментальных результатов, разработке и апробировании новых средств технологического оснащения, формулировании выводов.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы предложены и приняты к внедрению на предприятии ФГУП «НПО «Техномаш» в виде:

- технологических рекомендаций по проектированию операций электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра с наложением УЗ колебаний;
- разработанного, изготовленного и апробированного оборудования для прошивки отверстий с возможностью наложения УЗ колебаний.

На основании разработанных технологических рекомендаций для ГКНПЦ им. Н.В. Хруничева разработана технология прошивки массива из 580 отверстий с проходным сечением $\varnothing 0,25^{+0,05}$ мм.

Апробация работы. Отдельные результаты исследований и работа в целом докладывались и обсуждались на научных семинарах секции «Обработка материалов концентрированными потоками энергии» НТС ФГУП «НПО «Техномаш» и научных семинарах кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета в 2013-2017 г.

Промежуточные результаты работы докладывались на 62-й открытой студенческой научно-технической конференции «СНТК МАМИ-2012» в 2012 г., XXXII Всероссийской конференция по проблемам науки и технологии «Наука и технологии» в 2012 г., Научно-технической конференции «Будущее российской космонавтики в инновационных разработках молодых специалистов» в 2013 г., 40-й и 41-й Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» в 2014, 2015 г.г., Международной конференции «Решетневские чтения» в 2014 г, XIX Конференции молодых учёных и студентов «Машиноведение и инновации» (МИКМУС - 2017) в 2017 г.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликованы 8 печатных работ, 3 из которых включены в перечень ВАК для опубликования материалов диссертационных работ, получено 6 патентов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка из 161 наименования и 6 приложений на 35 с. Работа содержит 74 рисунки, 28 таблиц и 211 страниц текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ работ, посвящённых методам и способам получения отверстий малых диаметров. Рассмотрены технологические возможности, сфера применения, выявлены положительные и отрицательные стороны различных методов и способов обработки. Показана наибольшая эффективность электроэрозионной обработки при прошивке глубоких и точных отверстий малого диаметра. Рассмотрены основные проблемы электроэрозионной обработки глубоких отверстий малого диаметра, пути их решения и перспективы развития данного метода обработки.

Основной проблемой при электроэрозионной прошивке отверстий малого диаметра является эвакуация продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Предложено использовать наложение ультразвуковых колебаний, подача которых синхронизирована с подачей электрических импульсов для интенсификации эвакуации продуктов разряда из МЭП.

Выполнен анализ работ, посвящённых применению ультразвукового поля в технологиях электроэрозионной обработки. Установлено отсутствие единой точки зрения о механизме воздействия ультразвуковых колебаний на процессы, происходящие в межэлектродном зазоре. В рассматриваемых работах, в основном, описаны технологические результаты и рекомендации по применению УЗ поля в качестве средства интенсификации процесса ЭЭО.

На основании проведённого анализа сформулированы цель работы и задачи для её достижения.

Во второй главе рассмотрена модель, описывающая зависимость объемной производительности Q от энергии разрядного импульса W_p , основанная на следующих условиях и допущениях:

1. Производительность ЭЭО оцениваем по выражению:

$$Q = k_{эр} \cdot k_{эф} \cdot W_p \cdot f, \quad (1)$$

где $k_{эр}$ и $k_{эф}$ некоторые коэффициенты, отражающие соответственно внешние и внутренние связи в системе, описывающей электрический разряд в жидких диэлектриках. Коэффициент $k_{эф}$ связан с эффективностью использования импульсов и отражает долю рабочих импульсов $f_{раб}$ в общем числе подаваемых в единицу времени импульсов f напряжения.

2. Электрическая прочность жидких диэлектриков в рабочем диапазоне изменения концентрации (объёмной доли) продуктов электрического разряда снижается пропорционально величине этой концентрации.

3. Снижение электрической прочности жидкости и напряжения пробоя приводит при длительности импульса $\sim 10^{-5}$ с и менее к заметному уменьшению энергии разряда. Доля энергии, приходящейся на поверхностный источник тепловыделения, оказывается недостаточной для протекания фазовых переходов, что выражается в отсутствии эрозионной лунки или к появлению малоразмер-

ной лунки. То есть, доля рабочих импульсов, формирующих на поверхности электрода стандартные для данных условий эрозионные лунки, снижается.

4. С учетом п.п. 2 и 3 и на основании имеющихся экспериментальных данных, зависимость частоты рабочих импульсов от энергии разрядного импульса представлена в виде

$$\begin{cases} f_p = f \text{ при } \tau_p \leq \tau_n \text{ и } W_p < W_{p1} \\ f_p = f \cdot (1 - k_1 \cdot (W_p - W_{p1})) \text{ при } \tau_p > \tau_n \text{ и } W_p \geq W_{p1} \end{cases}, \quad (2)$$

где τ_p – время релаксации МЭП, k_1 – некий числовой коэффициент, W_{p1} – предельная энергия разряда, до которой справедлива модель аддитивного формообразования.

На основании сделанных допущений получены зависимости $Q = Q(W_p)$ для двух случаев

$$Q = -k_1 \cdot k_{\text{эп}} \cdot f \left(W_p - \frac{1}{2 \cdot k_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \frac{k_{\text{эп}} \cdot f}{k_1}, \text{ при } W_{p1} = 0 \quad (3)$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{k_{\text{эп}}}{k_1} \cdot f \text{ при } W_p = \frac{1}{2 \cdot k_1}. \quad (4)$$

При $W_{p1} \neq 0$ получаем:

$$\begin{cases} Q = k_m \cdot k_{\text{эп}} \cdot W_p \cdot f \text{ при } W_p \leq W_{p1} \\ Q = -k_1 \cdot k_{\text{эп}} \cdot f \left[W_p - \frac{(1 + k_1 \cdot W_{p1})}{2 \cdot k_1} \right]^2 + \frac{1}{4} \frac{k_{\text{эп}}}{k_1} \cdot f \cdot (1 + k_1 \cdot W_{p1})^2 \text{ при } W_p > W_{p1} \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{k_{\text{эп}}}{k_1} \cdot f \cdot (1 + k_1 \cdot W_{p1})^2 \text{ при } W_p = \frac{(1 + k_1 \cdot W_{p1})}{2 \cdot k_1}. \quad (6)$$

Таким образом, получена оптимизационная модель процесса ЭЭО по критерию производительности при допущении о линейной зависимости частоты следования рабочих импульсов от концентрации посторонних примесей (продуктов разряда) в многофазной рабочей среде. Модель качественно согласуется с имеющимися экспериментальными данными и позволяет сформулировать основные задачи, представляющие практический интерес для технологий обработки отверстий малого диаметра с точки зрения производительности:

1. Уточнение значения удельной эрозии материала k_m , определяющей величину $k_{\text{эп}}$ при обработке отверстий в конкретных условиях.

2. Уточнение значения коэффициентов $k_{\text{эф}}$ для различных условий обработки.

Сформулированная модель позволяет определить основное направление повышения производительности – интенсификацию эвакуации продуктов разрушения из рабочей зоны. В связи с этим проанализированы основные способы естественной и искусственной эвакуации:

1. Рассмотрена модель естественной эвакуации продуктов эрозии в результате расширения, формирующегося при разряде газо-парового пузыря. Установлено качественное соответствие результатов расчёта с экспериментальными данными и выявлены причины количественных расхождений, применительно к рассматриваемой технологической задаче. По результатам экспери-

ментальных данных при прошивке отверстий диаметром 0,3...0,5 мм замечено снижение скорости прошивки в 5 раз при достижении отношения $h/d = 3...5$, а при $h/d = 15...17$ скорость прошивки падает более чем в 20 раз. Сделан вывод о необходимости искусственной эвакуации продуктов эрозии.

2. На основании модели ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в трубопроводе переменного сечения выполнен расчёт требуемого перепада давлений и показано, что при прошивке отверстий менее 0,5 мм требуется давление на входе 10...20 МПа, что создаёт технические трудности при реализации.

3. Проанализирована возможность использования вращающегося ЭИ, как способа искусственной эвакуации. Показано, что при прошивке отверстий малого диаметра для эффективного использования вращающегося электрода требуется частота вращения, превышающая предел технических возможностей. Эффективная эвакуация продуктов эрозии данным способом возможна для отверстий диаметром более 0,6 мм. На практике низкочастотное вращение ЭИ используется совместно с прокачкой РЖ через тело ЭИ для устранения керна и обеспечения равномерности износа рабочей части ЭИ.

4. Рассмотрена известная теоретическая модель течения жидкости в капиллярной трубке при наложении ультразвукового поля. Выявлена невозможность её применения без дополнительных допущений для расчёта скорости течения жидкости в глухом капилляре, образующемся при прошивке отверстия стержневым инструментом, из-за отсутствия необходимого источника жидкости вблизи устья капилляра.

В третьей главе разработана общая методика исследований, включающая в себя основные этапы работы и взаимосвязь между ними.

Для подтверждения теоретических результатов разработаны частные методики экспериментов, которые включают в себя следующие предметные исследования:

1. Исследование процесса электрической эрозии материалов при наложении импульсов малых энергий:

– исследование электрических характеристик искрового разряда и геометрических параметров единичных эрозионных лунок;

– уточнение удельной эрозии k_m ($\text{мм}^3/\text{Дж}$) для стали 12Х18Н10Т.

2. Исследование влияния ультразвукового поля на технологические характеристики операции электроэрозионной прошивки глубоких отверстий малого диаметра: производительность, точность обработки, показатели качества поверхностного слоя.

Станочные эксперименты проводились в цеховых условиях на электроэрозионных прошивочных станках ЭПП-8 и ЭПЗ10ПУ. Измерения проводились в металлографической лаборатории ФГУП «НПО «Техномаш». При выполнении работ использовались приборы, проходившие регулярную поверку в соответствующих метрологических службах, что позволило свести к минимуму систематические ошибки измерений. Кроме того, перед выполнением серии экс-

периментальных работ проводились контрольные измерения в условиях, указанных в инструкции по эксплуатации приборов.

Четвёртая глава работы посвящена экспериментальным исследованиям.

Проведены исследования электрических характеристик искрового разряда и геометрических параметров единичной лунки в зависимости от длительности импульса. Единичные лунки статистически обрабатывали для оценки геометрических параметров: глубины, диаметра, объема (Рис. 1). Результаты эксперимента обобщённо представлены в Таблице 1.

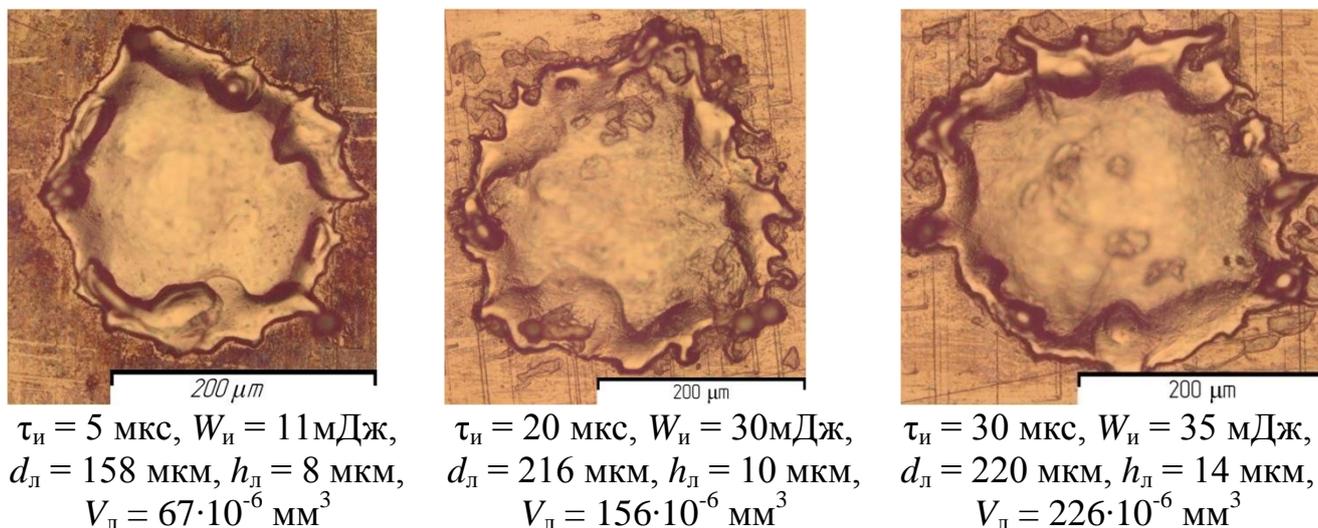


Рис. 1. Фотографии единичных лунок

Таблица 1.

Результаты исследований

Параметр	Значения					
	2	5	10	15	20	30
Длительность импульса $\tau_{и}$, мкс	2	5	10	15	20	30
Энергия импульса $W_{и}$, мДж	2,75	10,56	19,57	26,2	29,5	33,4
Средний ток в импульсе $I_{ср}$, А	51	65	71	67	57	54
Среднее напряжение импульса $U_{ср}$, В	26,8	32,5	27,6	26,2	26	25,8
Объём лунки $V_{л}$, $\text{мм}^3 \cdot 10^{-5}$	1,2	7,1	13,7	-	17,8	22,1
Диаметра лунки $d_{л}$, мкм	74	153,5	214,3	-	217	214
Глубина лунки $h_{л}$, мкм	6,7	9	9	-	11,3	14,3
Отношения диаметра к глубине $d_{л}/h_{л}$	11,1	17,1	23,8	-	19	15

Показано, что для коротких импульсов (менее 10 мкс), когда искровая часть разряда является значимой, не соблюдается линейная зависимость энергии импульса от его длительности (Рис. 2). В то же время в исследованном диапазоне энергий и длительностей импульса подтверждена близкая к линейной зависимость объема лунки от энергии импульса, что позволило на основании полученных данных рассчитать удельную эрозию для стали 12X18H10T (k_m) по выражению:

$$k_M = \frac{V_L}{W_{и}}. \quad (7)$$

Установлено, что величина удельной эрозии k_M составляет $6 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Дж}$.

Исследование влияния УЗ поля на технологические характеристики операции электроэрозионной прошивки проводили путем сравнения результатов со значениями, полученными при электроэрозионной обработке без наложения УЗ поля, и расчётом. Прошивка проводилась латунным ЭИ $\varnothing 0,3 \text{ мм}$, частота следования эрозионных импульса $f = 5 \text{ кГц}$, частота УЗ колебаний $f_{уз} = 22 \text{ кГц}$, амплитуда УЗ колебаний $A = 5 \dots 10 \text{ мкм}$. Получено семейство зависимостей машинного времени обработки от длительности импульса для ЭЭО и ЭЭОНУ (Рис. 3 и 4).

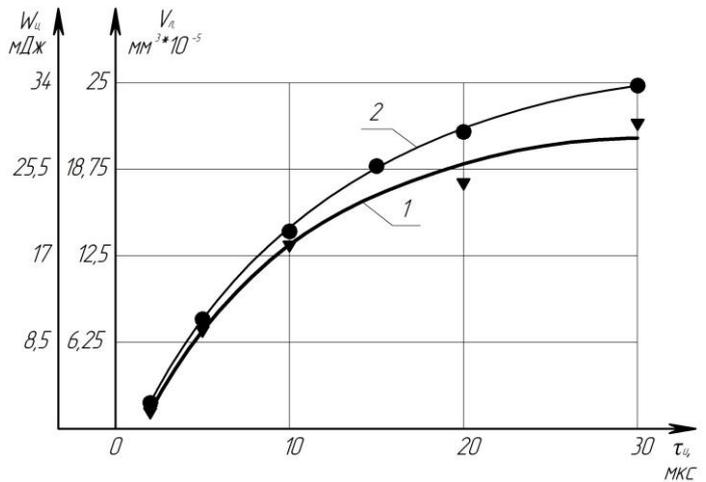


Рис. 2. – Зависимости объёма удалённого металла (1) и энергии импульса (2) от длительности импульса

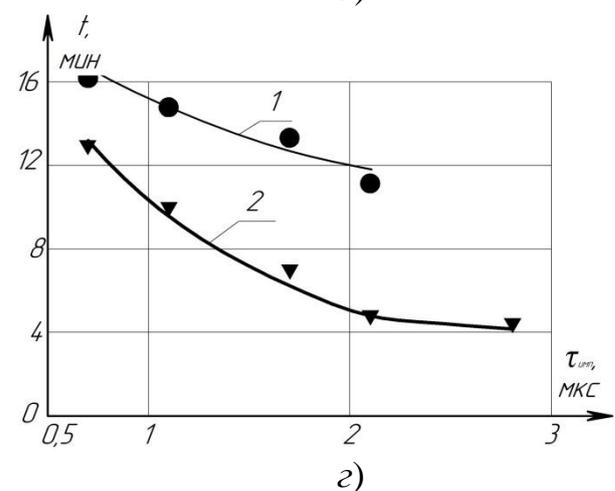
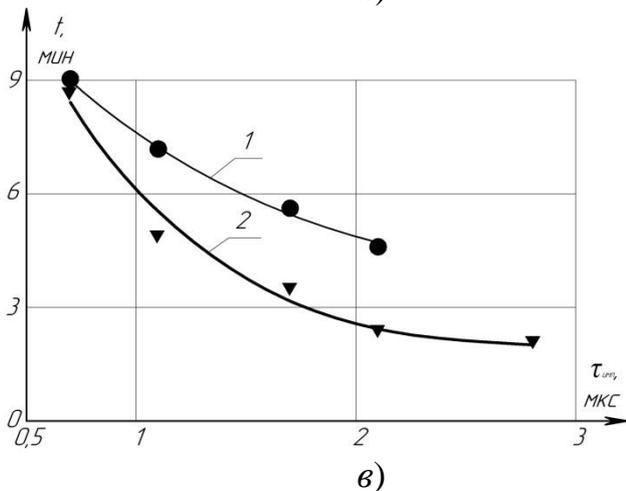
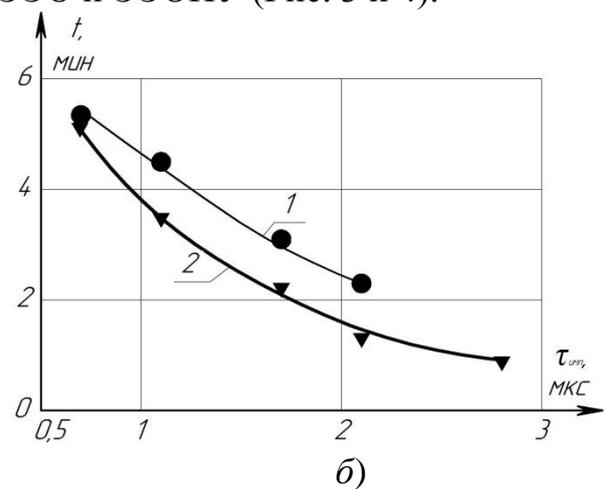
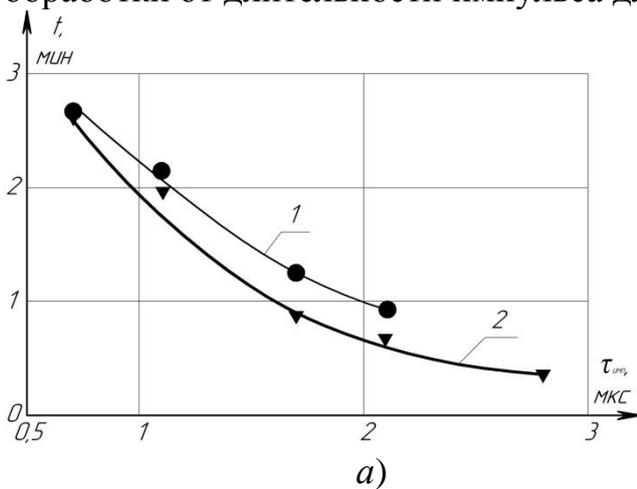


Рис. 3. Зависимости машинного времени обработки от длительности импульса при глубине прошивки: а) $h = 1 \text{ мм}$; б) $h = 2 \text{ мм}$; в) $h = 3 \text{ мм}$; г) $h = 5 \text{ мм}$; 1 – ЭЭОНУ; 2 – ЭЭО;

Наложение УЗ колебаний обеспечивает при прочих равных условиях снижение машинного времени обработки, в тем большей степени, чем больше глубина отверстия, то есть, в условиях, при которых в единицу времени генерируется большое количество продуктов эрозии и естественная эвакуация затруднена. При малых глубинах отверстий и длительностях импульса, при которых накопление в МЭП продуктов эрозии невелико, роль УЗ колебания нивелируется. Кроме того, наложение УЗ колебаний даёт возможность работать на более производительных режимах ($\tau_{и} \sim 3$ мкс). Работа на данном режиме без наложения УЗ колебаний невозможна.

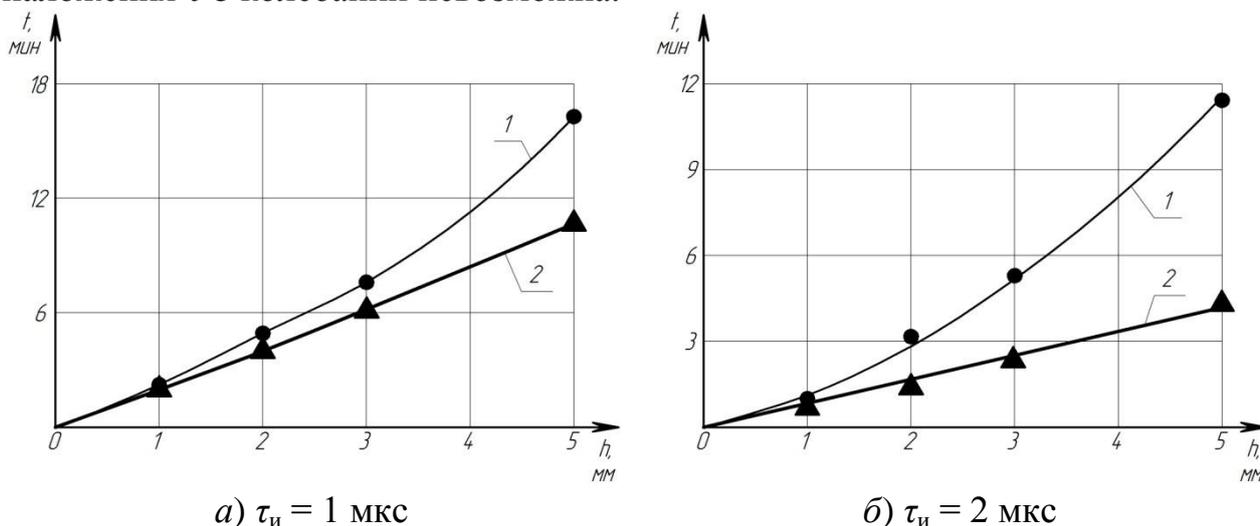


Рис. 4. Зависимость времени прошивки отверстия от глубины отверстия при длительности импульса: а) $\tau_{и} = 1$ мкс; б) $\tau_{и} = 2$ мкс; 1 – ЭЭОНУ; 2 – ЭЭО

Из представленных графиков видно, что зависимость времени обработки от глубины отверстия при ЭЭО, начиная с некоторого значения глубины, становится нелинейной, а скорость прошивки снижается, тогда, как при ЭЭОНУ эта зависимость имеет линейный характер. Из этого следует, что наложение УЗ колебаний способствует эффективной эвакуации продуктов эрозии из МЭП, вследствие чего линейная скорость эрозии до определенной глубины прошивки остается постоянной.

Известно, что при проведении процесса электроэрозионной прошивки отверстий проявляется множество случайных факторов, влияющих на результат. В связи с этим проведена статистическая обработка данных машинного времени прошивки отверстий (Рис. 5), основанная на результатах обработки 50 от-

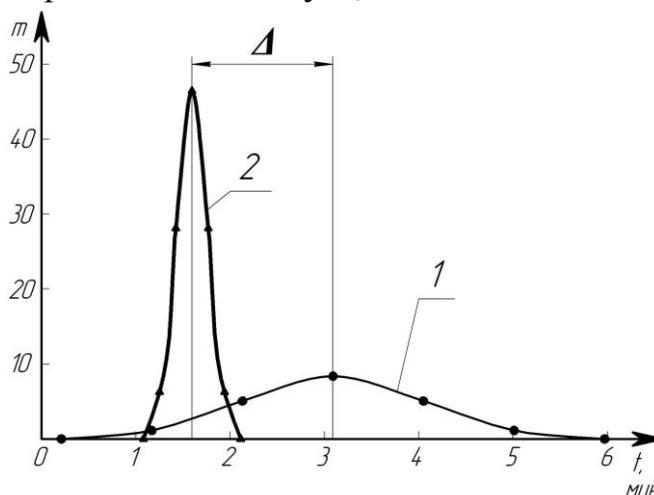


Рис. 5. Статистический анализ машинного времени обработки: 1 – ЭЭО; 2 – ЭЭОНУ

верстий диаметром 0,35 мм при ЭЭО и ЭЭОНУ. Глубина прошивки $h = 2$ мм. Среднеквадратичное отклонение значений времени обработки при ЭЭО составляет $\sigma = 0,96$ мин, а при ЭЭОНУ $\sigma = 0,17$ мин, что более чем в 5,5 раз меньше. Наложение УЗ колебаний способствует смещению поля рассеяния в сторону уменьшения значений времени. Из этого следует, что наложение УЗ колебаний приводит к существенному повышению стабильности и производительности процесса прошивки отверстий.

Наблюдаемое повышение производительности и стабильности процесса электроэрозионной прошивки является следствием интенсификации эвакуации продуктов разряда из МЭП при наложении УЗ поля (Рис. 3 и 4). Сказанное означает, что содержание твёрдых и газообразных включений в нем при ЭЭОНУ существенно меньше.

Для объяснения полученных в результате косвенного (технологического) эксперимента фактов проведена оценка течения РЖ в кольцевом зазоре по трём известным моделям течения жидкости в капилляре при наложении УЗ поля. Расчёты проводили с учетом допущением о образовании «кавитационного сектора» – сектора в кольцевом МЭП с повышенной концентрацией кавитационных зародышей вследствие эффекта «гнездования разрядов», гидродинамической кавитации и смещенного положения оси плазменного столба разряда от оси отверстия. Результаты оценки сведены в Таблицу 2.

Таблица 2.

Сравнение результатов расчета течения жидкости в капилляре

Модель	Параметры				
	V_T , мкм ³	T , мкс	v_{cp} , м/с	τ , мкс	O , %
Проницаемый поршень	$40 \cdot 10^5$	50	1,2	50	2,4...10
Ударная волна			2,2	42	24...80
Кумулятивные струи			500	50	36...72

V_T – объём торцевого межэлектродного промежутка, T – период ультразвуковых колебаний, v_{cp} – средняя скорость течения жидкости в «кавитационном секторе», τ – время течения жидкости, O – доля обновлённой рабочей жидкости в торцевом межэлектродном промежутке за паузу между разрядными импульсами в %.

Модель проницаемого поршня основана на перемещении кавитационного кластера, как целого, в капилляре. Проведенные расчеты показали, что эта модель не позволяет объяснить полученный результат повышения производительности ЭЭО. Модели ударной волны и кумулятивных струй дают схожие результаты, однако, отметим, что модель кумулятивных струй является общепризнанной и получила экспериментальное подтверждение в виде результатов скоростной киносъёмки. Расчёты по этим моделям дают близкие результаты и показывают, что за время паузы между разрядными импульсами за счет кавитационных явлений обновляется 30...76% объема исходного торцевого зазора (без учета действия газопарового пузыря).

Образование в МЭП «кавитационного сектора» приводит к интенсивному течению жидкости в нём. Исходя из условия неразрывности потока течения жидкости, через остальную часть кольцевого МЭП будет происходить «подсос» РЖ в МЭП и, тем самым, её обновление. Схематично эпюра скоростей течения жидкости в МЭП при наложении УЗ поля, с учётом принятых выше допущений, показана на Рис 6.

В результате проведённого анализа механизмов течения РЖ в МЭП под действием УЗ поля можно заключить следующее:

1. Отсутствует единый механизм, описывающий течение жидкости в капилляре под действием УЗ поля. Для глухого капилляра данные практически отсутствуют.

2. Явления сопутствующие кавитационному коллапсу способствуют и могут служить причиной интенсификации течения РЖ в кольцевом канале.

3. Наложение разрядного импульса в момент сближения электродов приводит к образованию паро-газового пузыря, расширяющегося следом за потоком жидкости, сформированным в результате кавитационного коллапса.

Исследовано влияние наложения УЗ колебаний на шероховатость поверхности после обработки. Выявлено, что наложение УЗ колебаний способствует снижению шероховатости поверхности на 20 %. Это объясняется улучшенными условиями эвакуации продуктов эрозии, по сравнению с естественной эвакуацией. В результате минимизируется количество коротких замыканий между ЭИ и деталью, способствующих повышению шероховатости поверхности. Анализ поперечных микрошлифов не позволил выявить отбеленный слой, как в случае ЭЭО, так и ЭЭОНУ, что, по-видимому, связано с малой энергией и длительностью импульсов и превалирующим выбросом материала в виде паровой фазы.

В пятой главе изложено промышленное применение результатов работы. Полученные результаты условно можно разделить на новые конструкторские и технологические разработки. К конструкторским разработкам относятся:

Патент РФ № 2522864 на способ ЭЭО с наложением УЗ колебаний. Суть данного способа состоит в наложении импульсов напряжения синхронизированно с ультразвуковыми колебаниями. Результатом данного технического решения является повышение производительности и снижение энергоёмкости процесса.

Для осуществления данного способа разработан станок для электроэрозионной прошивки, модели ЭП310ПУ (патент РФ № 153266), общий вид представлен на Рис. 7. Данный станок демонстрировался на выставке Металлообработка 2015, его техническая характеристика представлена в Таблице 3. Запатен-



Рис. 6. Схема эпюры течения РЖ в МЭП в период существования кавитационного сектора

тована оснастка к станку и специальный инструмент патенты РФ № 150978, № 153054 и № 170108.

Таблица 3.

Техническая характеристика станка ЭП310ПУ

Наименование параметра	Значение	
Общие характеристики		
Габаритные размеры станка (ДхШхВ), мм	610x900x1650	
Ёмкость бака, л	40	
Рабочая жидкость	вода техническая	
Характеристики детали		
Диаметры прошиваемых отверстий, мм	0,1...3	
Максимальные габариты детали	исполнение 1 для деталей типа «ци- линдр»	исполнение 2 для деталей типа «диск»
	Диаметр, мм	30
Длина, мм	100	20
Количество управляемых координат	4	5
Режимы электроэрозионного генератора		
Напряжение между электродами, В	20...200	
Ток обработки, А	1...10	
Длительность импульса, мкс	1...30	
Частота следования импульсов, кГц	1...100	
Характеристики УЗ генератора		
Частота колебаний, кГц	18...88	
Амплитуда колебаний, мкм	до 50	

К новым технологическим решениям относятся технологические рекомендации по разработке операций электроэрозионной прошивки отверстий с наложением ультразвукового поля.

1. Обработку отверстий малого диаметра ($d < 0,5$ мм) рекомендуется проводить с наложением механических колебаний ультразвукового диапазона на деталь, что конструктивно упрощает и удешевляет оснастку.

2. При невозможности реализации такой схемы обработки УЗ колебания следует накладывать на инструмент.

3. Наложение УЗ колебаний позволяет интенсифицировать процесс эвакуации продуктов разряда из МЭП, повысить производительность обработки в 1,5...2 раза, снизить шероховатость поверхности на 15...20 %, обеспечить ста-



Рис. 7. Общий вид станка ЭП310ПУ

бильное протекание процесса, увеличить в 1,5...2 раза глубину прошивки отверстия при прочих равных условиях.

4. Рекомендуются накладывать УЗ колебания с параметрами, апробированными в производственных условиях:

- частота колебаний 20...22 кГц;
- амплитуда колебаний $A=(0,25...0,5)a_T$;

где a_T – торцевой зазор.

5. В качестве рабочей жидкости рекомендуется использовать дистиллированную воду или техническую воду по ГОСТ 9.314-90. При повторном использовании необходимо очищать РЖ от твёрдых частиц, используя систему фильтров с максимальным размером проходящих частиц не более 5 мкм.

6. В связи с рядом ограничений, накладываемых на процесс ЭЭО элементов изделий с площадью сечения обрабатываемой поверхности менее $0,2 \text{ мм}^2$ ($r = 0,25 \text{ мм}$) и затруднённым отводом продуктов разряда из зоны обработки, необходимо ограничивать энергию разряда сверху (до 6 мДж). $W_p \leq [W_p]$

При обработке в воде регулирование энергии разряда обычно осуществляется заданием длительности разрядного импульса $\tau_{и} \leq [\tau_{и}]$. При прошивке отверстий диаметром 0,5 мм $[\tau_{и}] = 3 \text{ мкс}$. Чем меньше длительность импульса, тем выше доля паров металла, выброшенных в МЭП по отношению к жидкой фазе. Поскольку пары конденсируются и агрегируются в частицы диаметром менее 1 мкм, облегчается эвакуация продуктов эрозии из МЭП.

7. Напряжение холостого хода обычно выбирают, исходя из величины торцевого зазора, и обычно принимают равным $U_{xx}=(1,2...1,5)U_{пр}$. $U_{пр}$ (напряжение пробоя) выбирают по фиксированной зависимости вида

$$U_{пр} = f(a_T, c), \quad (8)$$

где c – степень загрязнённости рабочей жидкости.

8. Длительность паузы $\tau_{п}$ непосредственно влияет на коэффициент $k_э$, определяющий производительность прошивки. Для выбора $\tau_{п}$ используют выражение $\tau_{п} > K_2[\tau_1]$ где τ_1 – время жизни газового пузыря генерируемого разрядным импульсом, K_2 – коэффициент зависящий от площади обрабатываемой поверхности и энергии импульса.

9. Частоту следования импульсов (f , Гц) при ЭЭОНУ рекомендуется синхронизировать с УЗ колебаниями и выбирать по выражению

$$f = \frac{f_{уз}}{n(h)}, \quad (9)$$

где $n(h)$ – целочисленная функция глубины отверстия, получаемая экспериментально для данных условий обработки и принимающая значения 1,2 ... m .

10. Машинное время ЭЭОНУ рассчитывать по выражению:

$$t_M = \frac{k^* \cdot V_{отв}}{k_э \cdot k_M \cdot W_{и} \cdot f}, \quad (10)$$

где $V_{отв}$ – объём отверстия, $k_M = 6 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Дж}$ – значение удельной эрозии (для стали 12X18H10T), $k_э = (0,8...0,5)$ – коэффициент эффективности использования импульсов, зависящий от глубины отверстия, k^* – поправочный коэффициент, учитывающий обработку отверстий малого диаметра и принимающий значений

в зависимости от энергии и длительности импульса: $k_1^* = 40 \pm 2$ при $W_{и} = 1,2$ мДж, $\tau_{и} = 1$ мкс; $k_2^* = 55 \pm 2$ при $W_{и} = 2,1$ мДж, $\tau_{и} = 2$ мкс; $k_3^* = 40 \pm 2$ при $W_{и} = 5,5$ мДж, $\tau_{и} = 3$ мкс.

11. Для улучшения условий эвакуации продуктов разряда рекомендуется использовать схему синхронизации УЗ колебаний и импульсов напряжения, согласно которой импульсы напряжения приходятся на фазу максимального сближения ЭИ и детали.

На основании технологических рекомендаций разработана и апробирована технология многоэлектродной прошивки массива из 580 отверстий $\varnothing 0,25^{+0,05}$ мм, на глубину 0,8 мм в стали 12Х18Н10Т. Подобраны параметры режима, обеспечивающие обработку массива в течении 40 минут, в то время, как при последовательной прошивке единичным электродом время обработки составляет 720 минут, а при многоэлектродной обработке порядка 240 минут. Параметры режима обработки: $U = 120$ В, $\tau_{и} = 1$ мкс, $W_{и} = 1,2$ мДж, $f_{уз} = 44$ кГц, $A_{уз} = 10$ мкм. Общий вид макетов деталей представлен на Рис. 8. Расчётный условно-годовой экономический эффект при годовом объёме 100 шт. составляет 0,86 млн. руб. Технология передана на предприятие для внедрения.



Рис. 8. Общий вид детали «фильтр»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен сравнительный анализ эффективности известных способов эвакуации продуктов эрозии из МЭП применительно к операции электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра. Установлено, что при прошивке глубоких отверстий диаметром менее 0,5 мм и отношением глубины к диаметру более 10 рациональным средством интенсификации процесса является наложение ультразвукового поля.

2. Предложена модель, описывающая параболическую зависимость объёмной производительности от энергии импульса, основанная на сделанных допущениях и ограничениях. Модель качественно согласуется с ранее полученными экспериментальными данными и позволяет обосновать определяющую роль процесса эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны при решении задачи повышения производительности.

3. Экспериментально уточнена удельная эрозия для стали 12Х18Н10Т ($k_m = 6 \cdot 10^{-3}$ мм³/Дж), что позволяет оценить оптимальные энергетические параметры процесса по критерию производительности.

4. Выявлено влияние ультразвукового поля на технологические показатели операции электроэрозионной прошивки:

4.1 Показано, что наложение УЗ колебаний на процесс электроэрозионной прошивки отверстий приводит к повышению производительности процесса в 1,5...2 раза при параметрах режима обработки: $\tau_{и} = 1...2$ мкс, $f = 5$ кГц, $U = 200$ В, $f_{уз} = 22$ кГц, $A = 5...10$ мкм.

4.2 Установлено, что при прочих равных условиях наложение УЗ колебаний приводит к повышению стабильности процесса прошивки и сужению поля рассеяния значений времени обработки в 5,5 раз по отношению к ЭЭО.

4.3 Выявлено снижение шероховатости поверхности на 20%, при наложении УЗ колебаний.

5. На основании полученных экспериментальных данных выдвинута и обоснована гипотеза о том, что в основе механизма повышения производительности ЭЭО при наложении УЗ колебаний лежат акустические кавитационные явления в жидкости, и предложена физическая модель циркуляции жидкости в межэлектродном промежутке при прошивке отверстий малого диаметра.

6. Для проведения операции ЭЭО с наложением УЗ колебаний разработаны, запатентованы и апробированы: способ обработки (патент РФ № 2522864), оборудование (патент РФ № 153266), специальная оснастка (патенты РФ № 153054, № 150978, № 171568), специальный инструмент (патент РФ № 170108).

7. Разработаны технологические рекомендации по проектированию операций электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра с наложением УЗ поля. Технологические рекомендации, использованы при проведении работ по ОПК «Прогресс 2016-2025» и внедрены на предприятиях: ФГУП «НПО «Техномаш», ЗАО ЦНИТИ «Техномаш ВОС».

8. На основе результатов исследований предложена и апробирована технология изготовления массива отверстий в деталях типа «фильтр» и показана ее технико-экономическая эффективность.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах из перечня ВАК РФ:

1. Белов И.И., Груздев А.А., Саушкин Б.П. Влияние параметров режима на технологические характеристики операции электроэрозионной прошивки отверстий в форсунках // Известия «МГТУ МАМИ». 2012. № 2 (14). Т. 2. С. 77 - 83. (0,38 п.л./0,20 п.л.).

2. Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Оптимизация операций электроэрозионной обработки по критерию производительности // Справочник. Инженерный журнал. 2017. № 5. С. 16 - 18. (0,19 п.л./0,10 п.л.).

3. Груздев А.А. Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 9. С. 17 - 20. (0,25 п.л./0,15 п.л.).

Остальные работы:

4. Груздев А.А. Исследование процесса электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра в форсунках // «Наука и технологии» Материалы XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологии (г. Миасс Челябинской области). 2012. № 2. С. 272 - 274. (0,19 п.л.).

5. Груздев А.А. Применение ультразвукового капиллярного эффекта при электроэрозионной прошивке отверстий малого диаметра // Научные труды международной молодёжной научной конференции «XXXX Гагаринские чтения». 2014. Т. 2. С. 55 - 57. (0,19 п.л.).

6. Груздев А.А., Саушкин Б.П. Комбинированные методы и технологии обработки деталей машин // Ритм машиностроения. 2014. № 4 (92). С. 32 - 35. (0,25 п.л./0,20 п.л.).

7. Груздев А.А., Демидов Д.В., Королёв А.Н. [и др.]. Разработка отечественного пятикоординатного электроэрозионного прошивочного станка // Материалы XVII Международной научной конференции, посвящённой 90-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнёва (11-14 ноября 2014, г. Красноярск). 2014. ч. 1. С. 389 - 391. (0,19 п.л./0,10 п.л.).

8. Астахов Ю.П., Груздев А.А., Королёв А.Н. и др. Прошивочно-вырезной полуавтомат для электроэрозионно-электрохимической вырезки стопорных колец // Вестник «ФГУП НПО «Техномаш». 2017. № 2. С. 46 - 48. (0,19 п.л./0,10 п.л.)