

На правах рукописи



**НГУЕН ТХАНЬ ЗИЕМ**

**ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА  
ГЛУБОКИХ МИКРООТВЕРСТИЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Волгин Владимир Минович**

Официальные оппоненты: **Бойко Анатолий Федорович**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Белгородский  
государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова», профессор  
кафедры «Технология машиностроения

**Ставицкий Иван Борисович**,  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный исследовательский  
университет)», доцент кафедры  
«Инструментальная техника и технологии»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический  
университет»

Защита состоится «29» июня 2021 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9 – 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на официальном сайте университета:

[http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Nguyen\\_Thanh\\_Ziem/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Nguyen_Thanh_Ziem/)

Автореферат разослан «28» апреля 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев  
Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы наблюдается всё более широкое использование микроотверстий в различных отраслях промышленности и других сферах деятельности человека. Например, современный газотурбинный двигатель (ГТД) состоит из множества деталей из жаропрочных сплавов с отверстиями малых диаметров от 300 мкм до 1000 мкм: форсунки, газосборники, трубы жаровые, лопатки, крепёжные элементы и т.д. Традиционными методами обработки не всегда представляется возможным получить требуемую точность формы и размеров, обеспечить высокое качество поверхности микроотверстий. Электроэрозионная обработка в настоящее время является одним из наиболее перспективных и широко применяемых методов для обработки микроотверстий в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) глубоких микроотверстий сопряжена с рядом трудностей, так как образующиеся в процессе обработки металлические частицы не могут быть вовремя удалены из межэлектродного зазора. Это может вызвать локализованный разряд или даже короткое замыкание. При микроэлектроэрозионной обработке (МЭЭО) естественная эвакуация продуктов эрозии из межэлектродного промежутка (МЭП) недостаточна для стабильного протекания процесса. Поэтому в России и за рубежом ведутся интенсивные исследования по ее совершенствованию. Кроме того, при МЭЭО электроды – инструменты (ЭИ) быстро изнашиваются, что может оказывать существенное влияние на стабильность процесса и увеличивает стоимость производства, что также является проблемой в обработке глубоких микроотверстий.

Существуют различные способы интенсификации эвакуации продуктов обработки и уменьшения износа ЭИ при МЭЭО, такие как использование ЭИ с некруглым поперечным сечением, вращение ЭИ, прокачка рабочей жидкости, применение импульсов напряжения малой длительности и т.д. Однако закономерности МЭЭО глубоких микроотверстий ЭИ сложной формы изучены недостаточно, отсутствуют научно-обоснованные методики расчета режимов и прогнозирования значений технологических показателей, что не позволяет в полной мере использовать технологические возможности электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

Таким образом, можно утверждать, что разработка научно-обоснованных методик расчета режимов и прогнозирования значений технологических показателей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий, комплексно учитывающих особенности реализации процесса для различных кинематико-геометрических схем обработки, на основе мультифизической модели процессов в электродах и в межэлектродном пространстве, безусловно является актуальной научной задачей, имеющей важное значение для развития технологии электроэрозионной обработки.

**Степень разработанности темы.** Исследованиями электроэрозионной обработки занимались Лазаренко Б.Р., Ставицкий Б.И., Золотых Б.Н., Фотеев Н.К., Мещеряков Г.Н., Мицкевич М.К., Палатник А.Л. и другие ученые. Теоретическим и экспериментальным исследованиям МЭЭО посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Бойко А.Ф., Груздева А.А., Рахимянова Х.М., Любимова В.В., Сарилова М. Ю., Masuzawa T., Kibria G., Kagaya K., Yeо S.H, Pham D.T., Wang A.C., Kumar R., Rajukar K., Yan B.H. и

др.

Однако, несмотря на многочисленные исследования в области электроэрозионной микрообработки, задача расчета режимов и прогнозирования значений технологических показателей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий, комплексно учитывающих особенности реализации процесса для различных кинематико-геометрических схем обработки, на основе мультифизической модели процессов в электродах и в межэлектродном пространстве до настоящего времени не нашла окончательного решения.

**Цель работы:** повышение эффективности электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий за счет совершенствования методик выбора рациональных кинематико-геометрических схем обработки и расчета режимов обработки, а также прогнозирования значений технологических показателей, базирующихся на мультифизической модели процесса.

**Задачи исследования:**

1. Разработка структуры мультифизической модели, учитывающей особенности кинематико-геометрических схем электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

2. Разработка математической модели тепловых процессов в электродах, учитывающей температурные зависимости теплофизических свойств обрабатываемого материала, локализацию последовательных разрядов на поверхностях электродов, и исследование закономерностей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

3. Разработка математической модели процессов переноса в межэлектродном пространстве для различных кинематико-геометрических схем электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий и исследование закономерностей эвакуации продуктов обработки из межэлектродного пространства.

4. Разработка методики расчета режимов и прогнозирования технологических показателей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

5. Разработка экспериментальной установки, обеспечивающей реализацию разработанных условий и режимов обработки.

6. Проведение экспериментальных исследований с целью оценки влияния кинематико-геометрической схемы и режимов обработки на производительность МЭО, а также точность и качество глубоких микроотверстий.

**Объект исследования** – образование и эвакуация продуктов обработки, а также их влияние на процесс электрической эрозии при электроэрозионной обработке глубоких микроотверстий.

**Предмет исследования** – форма и размеры микроотверстия и электрода-инструмента, процессы переноса в межэлектродном пространстве для различных кинематико-геометрической схем электроэрозионной обработки глубоких отверстий.

**Соответствие паспорту специальности** – содержание диссертации соответствует п.2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий» Паспорта

научной специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» (технические науки).

**Научная новизна** заключается в раскрытии взаимосвязей между размерами микроотверстия, режимами обработки и технологическими показателями электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий, на основе использования предложенной мультифизической модели, учитывающей особенности кинематико-геометрических схем обработки.

**Практическая ценность работы** состоит в следующем:

1. На основании проведенных исследований разработана и изготовлена экспериментальная установка для осуществления электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий электродами-инструментами различных форм.

2. На основе результатов экспериментальных исследований даны рекомендации по выбору рациональных режимов электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

**Реализация работы.**

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлениям 15.03.01 и 15.04.01 «Машиностроение» (профиль «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов») и включены в разделы лекционных курсов дисциплин «Теоретические основы обработки концентрированными потоками энергии», «Технология и методы обработки концентрированными потоками энергии», «Физико-химические методы микро- и нанообработки», применяются при выполнении курсовых и дипломных проектов на кафедре «Электро – и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Методология и методы исследования.**

Теоретические исследования базируются на основных положениях теории электроэрозионной обработки, теории теплопереноса с учетом фазовых превращений, гидродинамики вязкой жидкости, численных методов математического моделирования. Математическое моделирование процессов электроэрозионного формообразования микроотверстий и эвакуации продуктов эрозии при вращении ЭИ выполнены в среде мультифизического программирования Comsol Multiphysics 5.3a. При проведении экспериментальных исследований использовалась разработанная и изготовленная экспериментальная установка ЭУ, а также современная измерительная и регистрирующая аппаратура (профилограф – профилометр Surf Corder 1400a, профессиональный микроскоп CIWA 1600X).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Структура мультифизической модели, учитывающей особенности кинематико-геометрических схем электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

2. Математическая модель тепловых процессов в электродах, учитывающая температурные зависимости теплофизических свойств обрабатываемого материала, локализацию последовательных разрядов на поверхностях электродов, фазовые переходы и износ электрода-инструмента.

3. Математическая модель процессов переноса в межэлектродном пространстве для различных кинематико-геометрических схем электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий, закономерности

эвакуации продуктов обработки из межэлектродного пространства.

4. Методика расчета режимов и прогнозирования технологических показателей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния формы электрода–инструмента и режима обработки на технологические показатели электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на конференциях: Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция (Москва, МАИ, 2017 г.); НТК «Высокие, критические электро- и нанотехнологии» (Тула, ТулГУ, 2017 г.); 9<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (Кишинев, Молдова, 2018 г.); Всероссийская НТК «Нано- и электрофизикохимическая обработка в машино- и приборостроении» (Тула, ТулГУ, 2019 г.); II Международная НПК молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности» (Пермь, ПНИПУ, 2019 г.); XXIX Международная НПК «Advances in Science and Technology» (Москва, НИЦ Актуальность. РФ, 2020 г.); Региональная НТК «Нано- и электрофизикохимическая обработка в машино- и приборостроении» (Тула, ТулГУ, 2020 г.); International Conference on Industrial Engineering (Сочи, 2019 г., 2020 г.); а также на научной конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ (Тула, ТулГУ, 2018 – 2021 г.г.).

**Публикации** Основное содержание диссертации отражено в 15 публикациях, в том числе 2 статьи на английском языке в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и цитирования Scopus, 5 статей в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных журналов ВАК РФ, а также 8 статей и тезисов докладов на конференциях различного уровня.

**Структура и объем работы** – Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка используемой литературы из 140 наименований, приложения; общий объем диссертации – 151 страница машинописного текста, включая 77 рисунков и 25 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, определены положения, выносимые на защиту, описаны методология и методы исследований.

**В первой главе** представлен анализ различных методов формообразования глубоких микроотверстий. Показано, что электроэрозионная обработка в настоящее время является одним из наиболее эффективных методов обработки отверстий малого диаметра. Однако метод МЭЭО обладает серьезным недостатком: при обработке глубоких отверстий ухудшаются условия эвакуации продуктов эрозии из МЭП, что приводит к увеличению износа ЭИ и снижению скорости обработки, так как уменьшается доля разрядов между электродами и увеличивается доля разрядов между продуктами обработки, присутствующими в межэлектродном пространстве (рис. 1).

Известные способы улучшения технологических показателей МЭЭО

глубоких отверстий представлены на рис. 2. В ряде работ экспериментально установлено, что за счет дополнительных движений электрода-инструмента и/или заготовки, а также за счет рационального выбора формы и размеров электрода-инструмента обеспечивается заметное улучшение эвакуации продуктов обработки из межэлектродного пространства и повышение технологических показателей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий. Однако в настоящее время отсутствуют методики позволяющие определять рациональные режимы и прогнозировать технологические показатели МЭЭО глубоких микроотверстий.

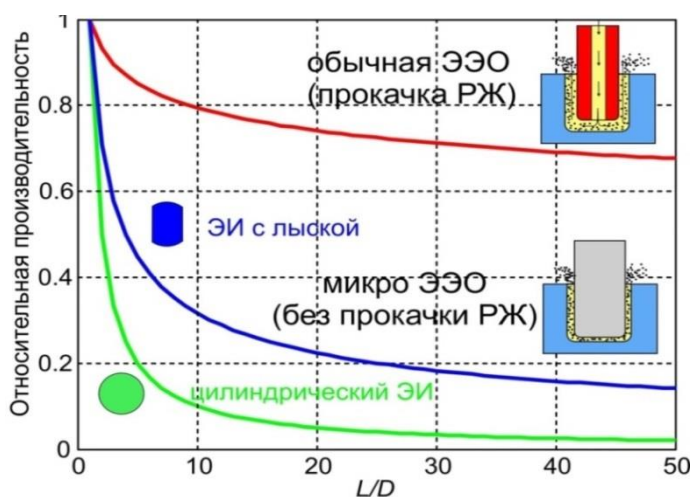


Рисунок 1 - Влияние глубины отверстия на производительность ЭЭО отверстий.

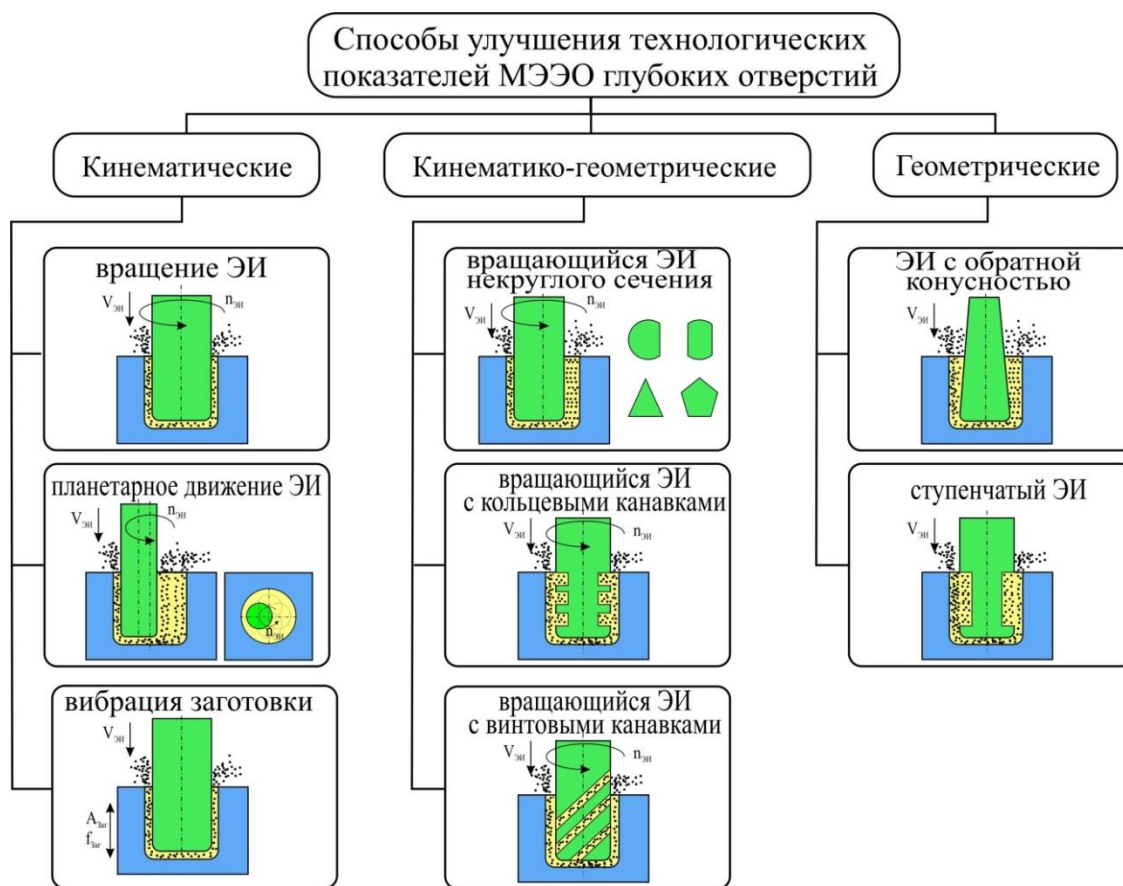


Рисунок 2 - Основные способы улучшения технологических показателей МЭЭО глубоких отверстий.



Дан обзор существующих методов моделирования формирования эрозионных лунок при электроэрозионной микрообработке, выполненных в России и за рубежом. К основным недостаткам этих методов относится невозможность учитывать геометрическую и энергетическую неоднородности электродов и моделировать процесс из нескольких последовательных разрядов, а также учитывать влияние продуктов обработки тип разряда и скорость удаления металла с заготовки.

На основании проведенного анализа определена цель диссертационной работы и сформулированы задачи научных исследований.

**Вторая глава** посвящена разработке структуры мультифизической модели электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий (рис. 3), включающей в себя математическую модель тепловых процессов в электродах, в результате которых происходит сьем металла с заготовки и износ электрода-инструмента, и математическую модель процессов переноса в межэлектродном пространстве, описывающую эвакуацию продуктов обработки, для различных кинематико-геометрических схем МЭЭО отверстий, а также разработке методики расчета режимов и прогнозирования технологических показателей МЭЭО глубоких микроотверстий.

Основными элементами мультифизической модели являются математические модели:

- удаления металла с заготовки и износа электрода-инструмента в результате теплового действия электрического разряда;
- эвакуации продуктов обработки из межэлектродного пространства в результате действия на частицы силы тяжести, Архимедовой силы и силы трения по стороны рабочей жидкости.

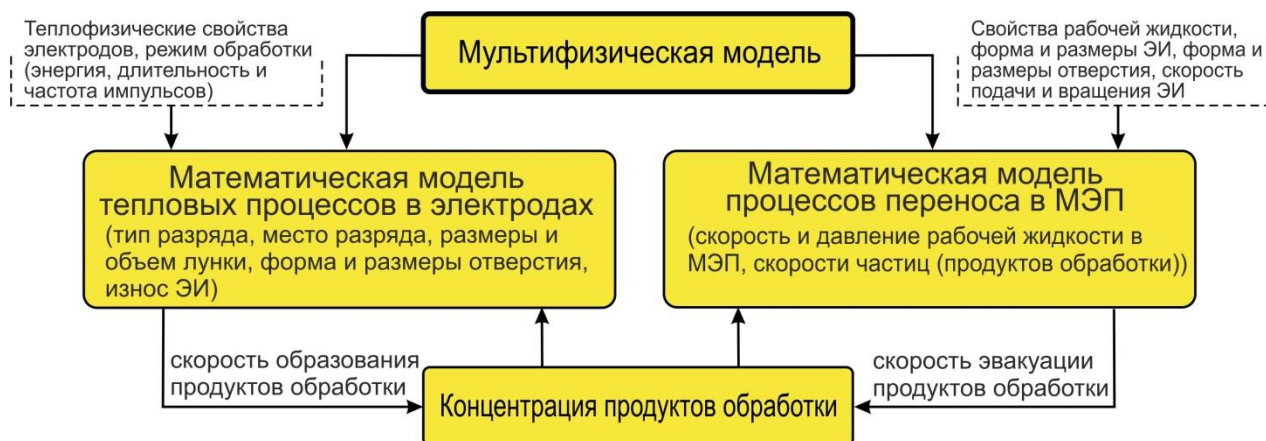


Рисунок 3 – Структура мультифизической модели ЭЭО глубоких микроотверстий.

Взаимосвязь между отдельными моделями, входящими в мультифизическую модель МЭЭО глубоких отверстий, достигается за счет учета влияния концентрации продуктов обработки в рабочей жидкости на скорость удаления металла с заготовки и износ электрода-инструмента.

При определении структуры мультифизической модели электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий были приняты следующие основные положения и допущения:

1. Удаление материала с заготовки и износ ЭИ осуществляется в результате теплового действия электрических разрядов с образованием



эрозионных лунок на электродах и продуктов обработки в межэлектродном пространстве.

2. В зависимости от условий может реализовываться один из следующих видов разрядов:

- при  $E_i < E_{кр}$  разряд холостого хода (съем металла с электродов отсутствует);

- при  $E_{кр} < E_i < 1,5E_{кр}$  нормальный (рабочий) разряд между электродами (осуществляется съем металла с электродов);

- при  $1,5E_{кр} < E_i$  разряд короткого замыкания или частичный разряд между частицами в зазоре (съем металла с заготовки отсутствует);

где  $E_{кр}$  – критическая напряженность электрического поля;  $E_i = U_{ХХ} / (S_i (1 - \varphi_i))$  – фактическая напряженность электрического поля;  $U_{ХХ}$  – напряжение холостого хода;  $S_i$  – межэлектродный зазор;  $\varphi_i$  – концентрация продуктов обработки в рабочей жидкости;

3. Объем лунки  $V_i$  определяется по объему сферического сегмента радиусом  $r_i$  и высотой  $h_i$

4. Скорость удаления материала с заготовки определяется как отношение суммы объемов единичных лунок к времени, аналогично определяется износ ЭИ;

5. Скорость образования продуктов обработки (частиц) определяется скоростью удаления материала с заготовки и скоростью износа ЭИ;

6. Эвакуация продуктов обработки происходит под действием силы тяжести, силы Архимеда и силы сопротивления;

7. Концентрация продуктов обработки в межэлектродном пространстве зависит от соотношения скоростей образования и эвакуации продуктов обработки, а также от объема межэлектродного пространства.

Для моделирования удаления металла с заготовки и износа электрода-инструмента использовались:

(1) математическая модель тепловых процессов для единичного импульса;

(2) математическая модель удаления металла с поверхностей заготовки и ЭИ с помощью абляции;

(3) математическая модель определения месторасположения следующего разряда.

Для моделирования тепловых процессов при МЭЭО (рис. 4) использовано дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) = \text{div}(k \text{grad} T), \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $\rho(T)$  – плотность вещества электрода;  $k(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $C_p(T)$  – теплоемкость;  $t$  – время.

Краевая задача для уравнения теплопроводности решалась методом конечных элементов со следующими начальными и граничными условиями:

начальное условие:

$$T|_{t=0, z=0} = T_0;$$

граничные условия ( $t > 0$ ):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, r < r_o} = q(r, t) \text{ для границы 1;}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, r>r_0} = h_f (T - T_0) \text{ для границы 2,3;}$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ для границ 4, 5, 6.}$$

где  $n$  – нормаль к поверхности;  $h_f$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $T_0$  – температура окружающей среды.

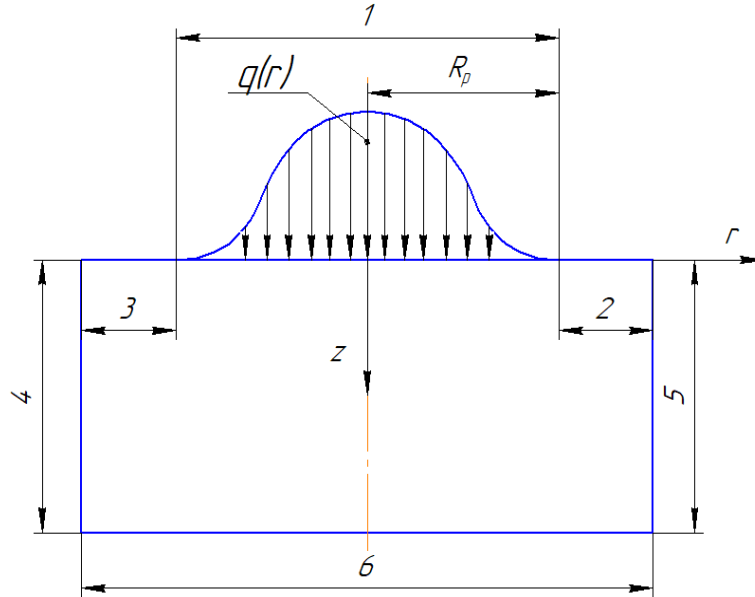


Рисунок 4 – Двумерная схема (с указанием границ), используемая для моделирования распределения температурного поля в поверхностных слоях анода и катода.

Формула для оценочного расчета радиуса плазменного канала при энергии разряда в диапазоне 0,3 мДж – 670 мДж:

$$R(I, t) = 2,04 \cdot 10^{-3} I^{0,43} t_{on}^{0,44}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус канала разряда;  $I$  – ток разряда;  $t_{on}$  – длительность импульса.

Для учета фазового перехода материала заготовки в математическое описание вводится плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость, зависящие от температуры:

$$\rho(T) = \theta(T)\rho_{\phi 1} + (1 - \theta(T))\rho_{\phi 2}, \quad (3)$$

$$k(T) = \theta(T)k_{\phi 1} + (1 - \theta(T))k_{\phi 2}, \quad (4)$$

$$C_p(T) = \frac{1}{\rho(T)} (\theta(T)\rho_{\phi 1}C_{p,\phi 1} + (1 - \theta(T))\rho_{\phi 2}C_{p,\phi 2}) + L_H \frac{\partial \alpha}{\partial T}, \quad (5)$$

где  $\alpha = \frac{1}{2} \frac{(1 - \theta(T))\rho_{\phi 2} - \theta(T)\rho_{\phi 1}}{\theta(T)\rho_{\phi 1} + (1 - \theta(T))\rho_{\phi 2}}$ ;  $L_H$  – скрытая теплота плавления;  $\theta(T)$  –

единичная функция, равная нулю при  $T > T_{пл}$  и равная единице при  $T < T_{пл}$ ;  $\rho_{\phi 1}$ ,  $k_{\phi 1}$ ,  $C_{p,\phi 1}$  – плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость в твердом состоянии, соответственно;  $\rho_{\phi 2}$ ,  $k_{\phi 2}$ ,  $C_{p,\phi 2}$  – плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость в жидком состоянии, соответственно;  $T_{пл}$  – температура плавления.

Результаты моделирования показали, что размеры лунок при переменных теплофизических свойствах материалов и с учетом фазового

перехода довольно сильно отличаются от результатов при постоянных теплофизических свойствах материалов (13,18 – 15,64 % по радиусу и 22,07 – 24,79 % по глубине). Полученные в результате моделирования зависимости объема эрозионной лунки от энергии импульса (рис. 5) показывают, что наилучшее соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными обеспечивается при использовании переменных теплофизических свойств обрабатываемых материалов и фазового перехода.

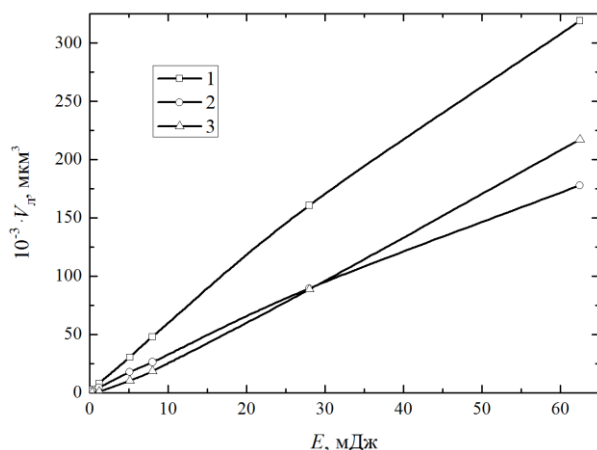


Рисунок 5 – Влияние теплофизических свойств обрабатываемого материала на объем эрозионной лунки при постоянных (1) и переменных (2) теплофизических свойствах; 3 – результаты эксперимента.

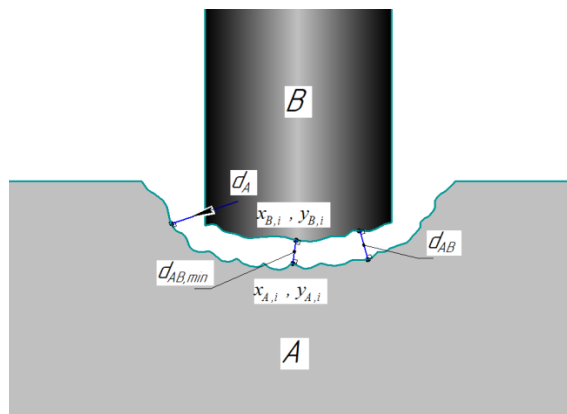


Рисунок 6 – Расчетная область для определения месторасположения очередного разряда.

Определение месторасположения очередного разряда производилось на основе вычисления расстояний между электродами по формулам:

$$d_{AB} = \sqrt{(x - A_b(x))^2 + (y - A_b(y))^2}, \quad (6)$$

$$-\nabla d_{AB}(x) = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla d_{AB}(y) = 0, \quad (8)$$

где  $d_{AB}$  – расстояние от каждой точки на границе В до ближайшей точки на границе А (рис. 6);  $A_b$  – граница обработанной поверхности;  $-\nabla d_{AB}$  – градиент расстояния в каждой точке области А по осям  $x$  и  $y$ .

В процессе МЭЭО съем металла осуществляется в результате последовательного действия большого количества электрических разрядов, поэтому для обеспечения возможности прогнозирования формы и размеров эрозионных лунок, формируемых на обрабатываемой поверхности и ЭИ, была рассмотрена схема моделирования нескольких последовательных разрядов с учетом перемещения ЭИ относительно обрабатываемой поверхности.

На рис. 7 представлены результаты моделирования формирования поверхностей обрабатываемой заготовки и ЭИ при удалении материала с помощью абляции с учетом и без износа ЭИ. Для более точного результата моделирования требуется учитывать износ ЭИ в процессе обработки. На рис. 8 показана эволюция обрабатываемой поверхности в процессе МЭЭО электродом-инструментом, перемещающимся в процессе обработки в направлении обрабатываемой поверхности.

На рис. 9 показаны результаты моделирования шероховатости поверхности после МЭЭО при различной энергии импульса. На основании

полученных результатов исследований можно сделать вывод, что с увеличением энергии импульса шероховатость обработанной поверхности возрастает.

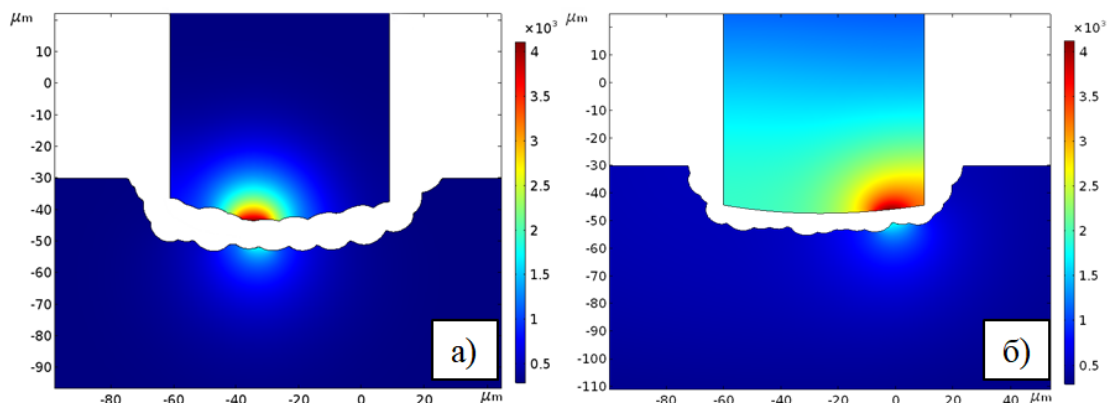


Рисунок 7 – Формирование обрабатываемой поверхности в процессе МЭО после 180 импульсов с учетом (а) и без учета (б) износа ЭИ

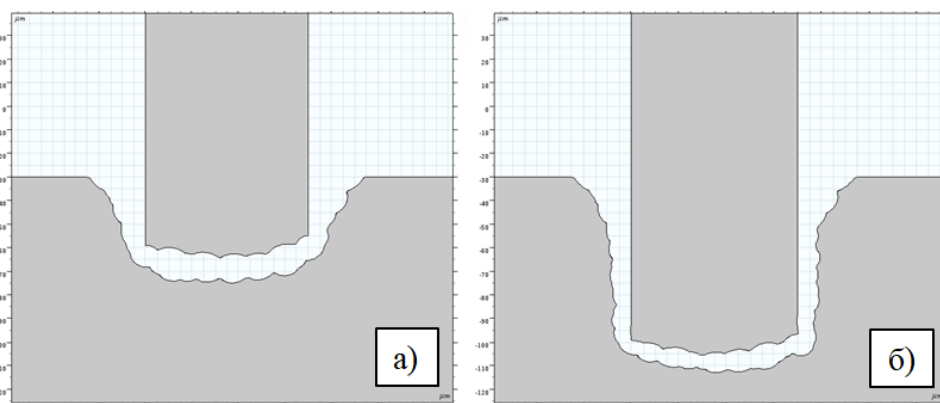


Рисунок 8 – Эволюция обрабатываемой поверхности в процессе МЭО с поступательным ЭИ ( $V=0,045$  м/с): (а) после 200 и после 420 (б) импульсов

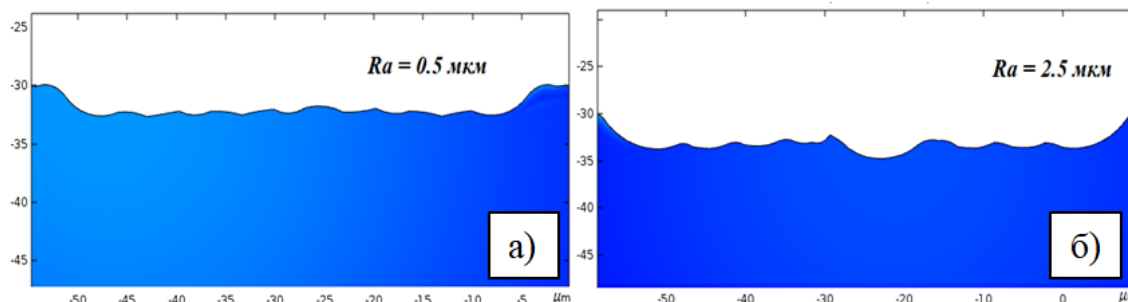


Рисунок 9 – Результаты моделирования шероховатости поверхности после МЭО при энергии импульса:  $W = 90$  мкДж (а);  $W = 320$  мкДж

В качестве математической модели движения частиц в МЭП при вращении ЭИ использовались уравнения движения несжимаемой вязкой жидкости и уравнение неразрывности:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}_b \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (10)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор скорости движения жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность электролита;  $\mu$  – динамическая вязкость рабочей жидкости;  $\nabla$  – оператор

набла;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $t$  – время;  $F_b$  – объемная сила.

Частицы грата в МЭП подвержены действию рабочей жидкости и их движение задается вторым законом Ньютона. Уравнения движения частиц могут быть записаны в следующем виде:

$$m_p \frac{\partial v}{\partial t} = F_D + F_g + F_{\text{ext}}, \quad (11)$$

где  $m_p$  – масса частицы;  $v$  – скорость частицы;  $F_D$  – сила сопротивления;  $F_g$  – выталкивающая сила;  $F_{\text{ext}}$  – любая другая внешняя сила.

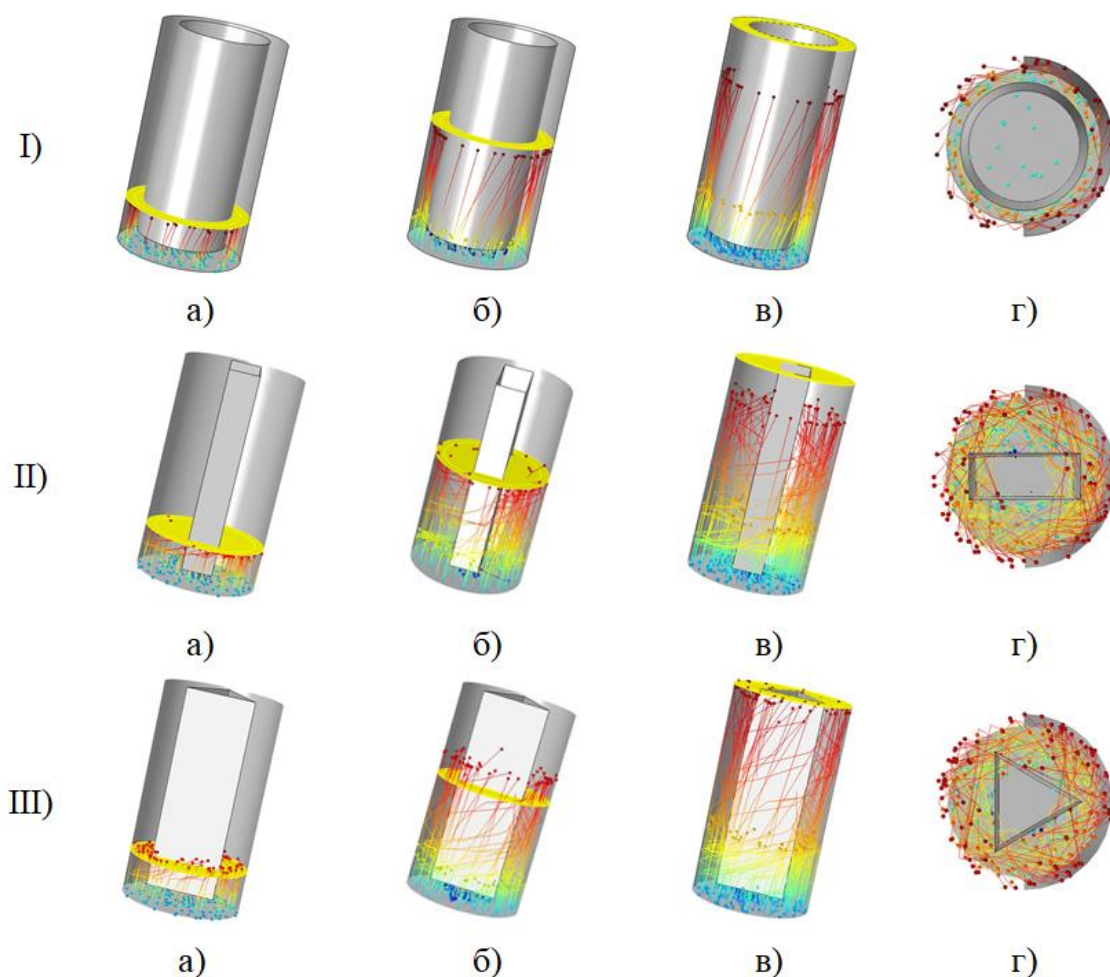


Рисунок 10 – Движение частиц в МЭП при МЭЭО вращающемся: I – цилиндрическим ЭИ; II – пластиной ЭИ; III – треугольным ЭИ; (а)  $t_{\text{он}} = 20$  мкс,  $h = 0,5$  мм; (б)  $t_{\text{он}} = 35$  мкс,  $h = 1,4$  мм; (в)  $t_{\text{он}} = 43$  мкс,  $h = 2,5$  мм; (г)  $t_{\text{он}} = 50$  мкс.

Результаты моделирования движения частиц в МЭП при вращении ЭИ, показали, что профильный ЭИ значительно влияет на процесс эвакуации продуктов эрозии. В частности, на рис. 10 показано, что при цилиндрическом ЭИ, свободное пространство не изменяется с течением времени, следовательно, частицы движутся только в узком межэлектродном зазоре. При вращении прямоугольного и треугольного ЭИ частицы движутся в свободном пространстве, которое изменяется с течением времени. Предложена и реализована технология МЭЭО для прошивания глубоких отверстий с использованием непрофильных ЭИ (рис. 10).

Разработана методика расчета режимов и прогнозирования технологических показателей МЭЭО глубоких микроотверстий,

базирующаяся на мультифизической модели процесса (рис. 11). Данная методика позволяет по исходными данными (свойствам материалов заготовки, ЭИ и РЖ, параметрам отверстий и т.д) прогнозировать качество поверхности, производительность, износ ЭИ и вычислять итоговые форму и размеры глубокого микроотверстия.

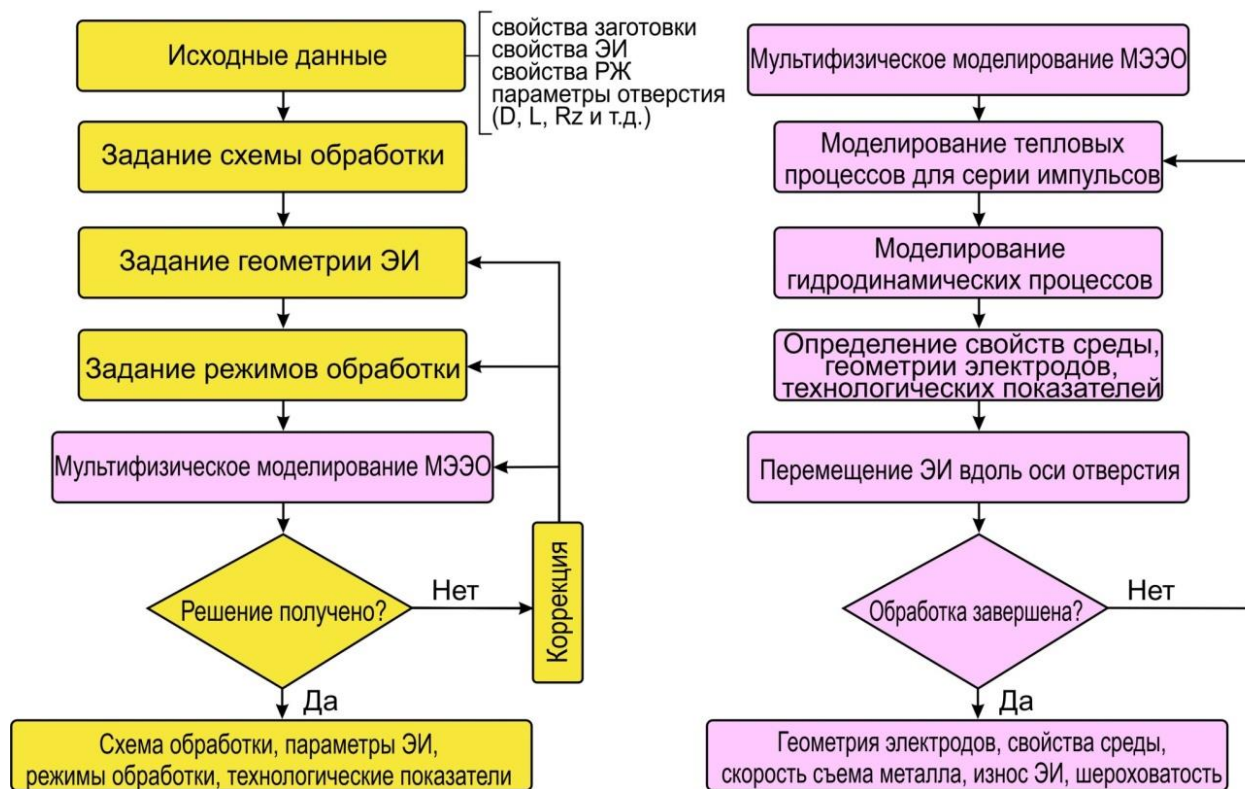


Рисунок 11 – Схема методики расчета режимов и прогнозирования технологических показателей МЭЭО глубоких микроотверстий.

**Третья глава** посвящена проектированию экспериментальной установки для проведения экспериментальных исследований процесса МЭЭО глубоких микроотверстий с вращением ЭИ (рис. 12) в состав которой входят 5 основных узлов и систем:

- система регулирования МЭП для поддержания размера межэлектродного зазора по заданному закону во время обработки;
- система перемещения, которая обеспечивает позиционирование инструментальной головки относительно обрабатываемой заготовки;
- система регулирования скорости вращения ЭИ;
- генератор импульсов для формирования импульсов напряжения, следующих друг за другом через определенные промежутки времени;
- система подачи РЖ, осуществляющая подачу РЖ в МЭП.

Для реализации алгоритма управления процессом МЭЭО используется контроллер Arduino Uno, выполненный на базе микроконтроллера ATmega328. Система управления подачей ЭИ необходима для поддержания заданного значения межэлектродного зазора (МЭЗ) во время обработки. В качестве датчика тока использован датчик ACS712 5А. Система перемещения ЭИ экспериментальной установки создана на основе CNC 1310 гравировального станок.



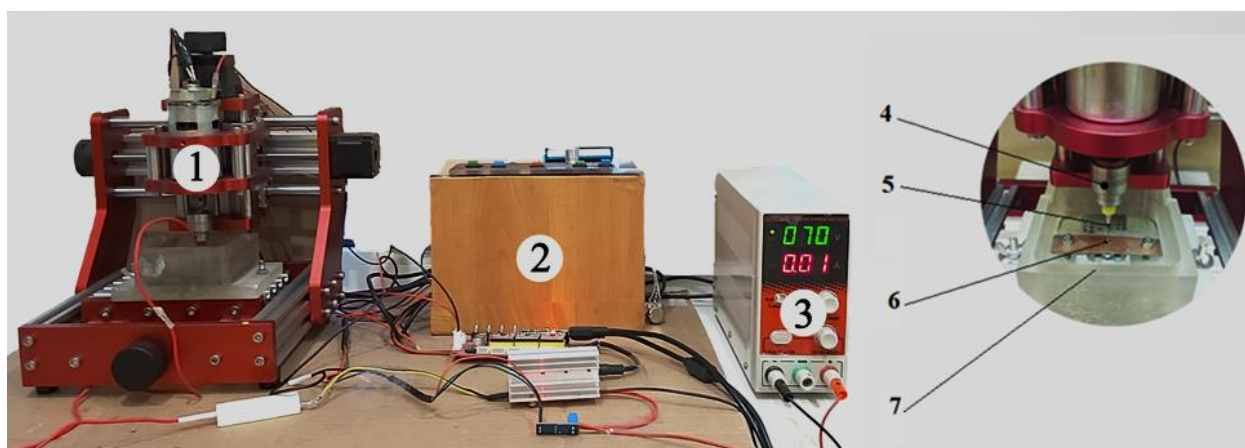
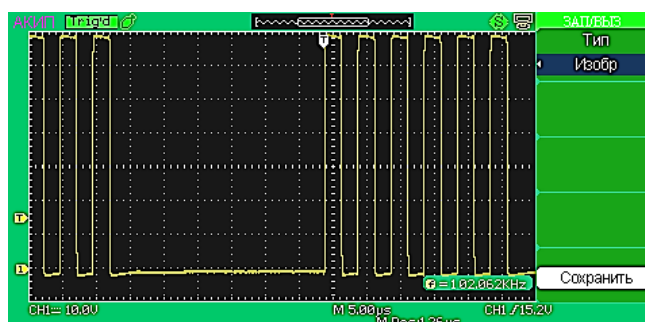


Рисунок 12 – Экспериментальная установка для МЭО: 1 – станок; 2 – система управления; 3 – источник; 4 – цанговый патрон; 5 – ЭИ; 6 – заготовка; 7 – ванна

Система формирования импульсов включает в свой состав три основных структурных элемента – управляющий сигнал, драйвер MOSFET и транзистор MOSFET. Задающий генератор (сигнал) выполнен на микроконтролере STM8. Изображение платы генератора и осциллограммы пакетов импульсов напряжения представлены на рис. 13. Основными преимуществами данного генератора является повышение качества обработанной поверхности, независимость параметров генератора от состояния МЭП и улучшение условия эвакуации продуктов эрозии за счет релаксации МЭП.



а)



б)

Рисунок 13. Плата генератора (а) и осциллограммы пакетов импульсов напряжения (б):  $U = 80$  В при  $N = 6$  и длительности  $t_{on} = 2,5$  мкс

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований процесса ЭО вращающимся ЭИ.

На основе данных о характерных особенностях процесса формирования профиля микроотверстий при МЭО с вращением ЭИ по сравнению с традиционной ЭО, была разработана комплексная методика исследования этих особенностей, включающая анализ формы и размеров полученного отверстия в поперечных сечениях и характера профиля



отверстий в продольных сечениях. Из рис. 14 и 15 показано, что при вращении цилиндрических ЭИ осуществляется эффективное устранение овальности и эффекта конусности получаемого отверстия. Это свидетельствует о том, что вращение ЭИ дает улучшение точности профиля отверстий и возможно применение для обработки глубоких микроотверстий.

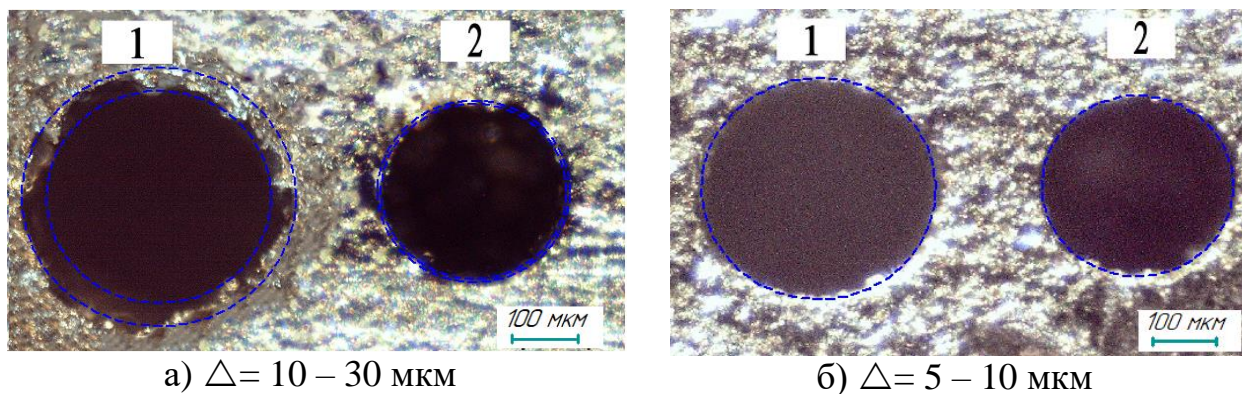


Рисунок 14 – Форма отверстия, полученного при МЭЭО пластины из сплава Д16Т без (а) и с вращением ЭИ (б); диаметр ЭИ – 200 мкм (1) и 90 мкм (2)

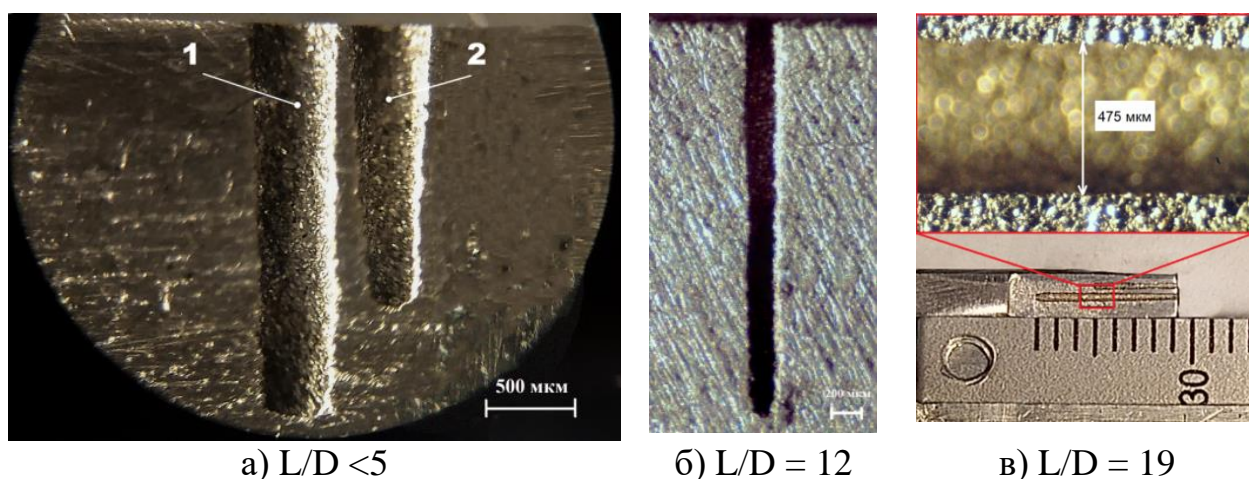


Рисунок 15 – Профили отверстий в продольном сечении при МЭЭО сплава Д16Т с вращением (1) и без вращения ЭИ (2); диаметр ЭИ – 200 мкм и 90 мкм (справа)

Из рис. 16 видно, что вращение ЭИ обеспечивает при прочих равных условиях существенное уменьшение машинного времени обработки за счет улучшения эвакуации продуктов обработки. Вращение ЭИ также влияет на условия чередования воздействия электрического разряда и охлаждения на обрабатываемую поверхность, в частности, предотвращение повторного возникновения разряда в одном месте. Однако при увеличении скорости вращения и глубины отверстия жесткость ЭИ уменьшается, что приводит к колебаниям ЭИ и искажению профиля отверстия. Соответственно, увеличение скорости вращения при малых диаметрах отверстий ведет к ухудшению технологических показателей обработки.

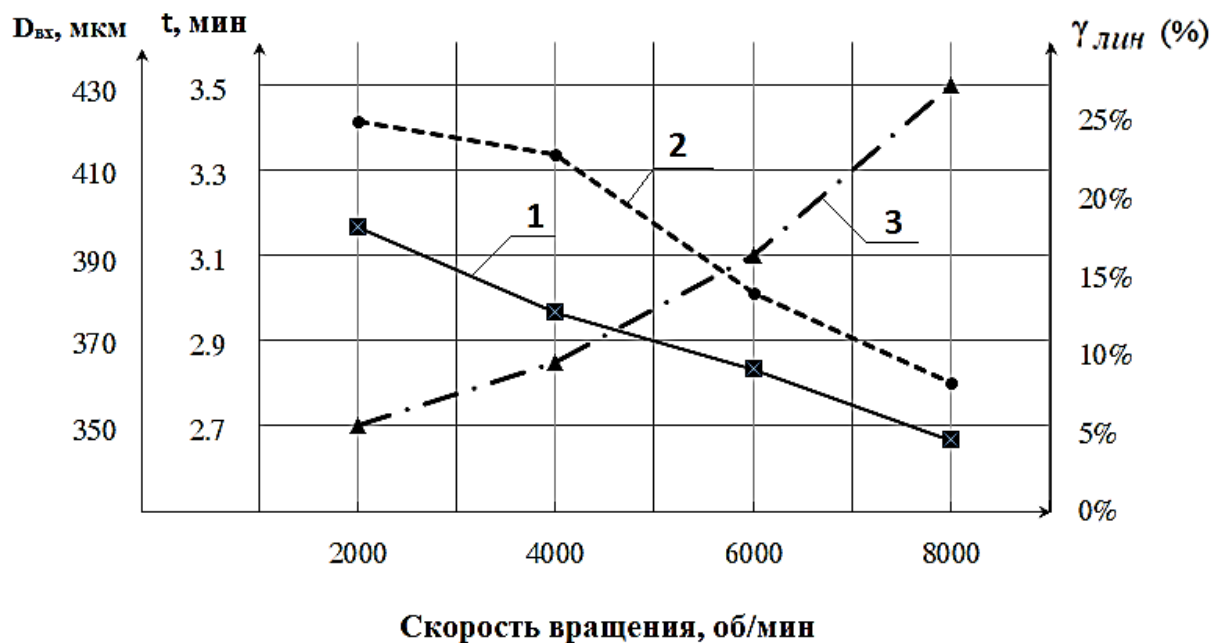


Рисунок 16 – Зависимости времени обработки отверстия, износа ЭИ и входного диаметра от скорости вращения ЭИ при обработке сплава Д16Т при диаметре ЭИ – 200 мкм: 1 – время обработки; 2 – износ ЭИ; 3 – входной диаметр

На рис. 17 представлены зависимости глубины отверстия от времени обработки. При большей глубине МЭЭО без вращения почти прекращается. Из анализа кривых 2 и 3 следует, что диапазон глубин от 0 до 5 мм характеризуется стабилизацией процесса обработки, а в диапазоне от 5 до 6,5 мм скорость обработки постепенно снижается. Это объясняется тем, что с увеличением глубины затрудняется эвакуация продуктов эрозии, приводящая к уменьшению количества полезных электрических разрядов. Зависимость 1 характеризуется стабилизацией процесса обработки. Это показывает, что использование ЭИ с канавками эффективно при обработке глубоких микроотверстий за счет улучшения процесса эвакуации продуктов эрозии из МЭП.

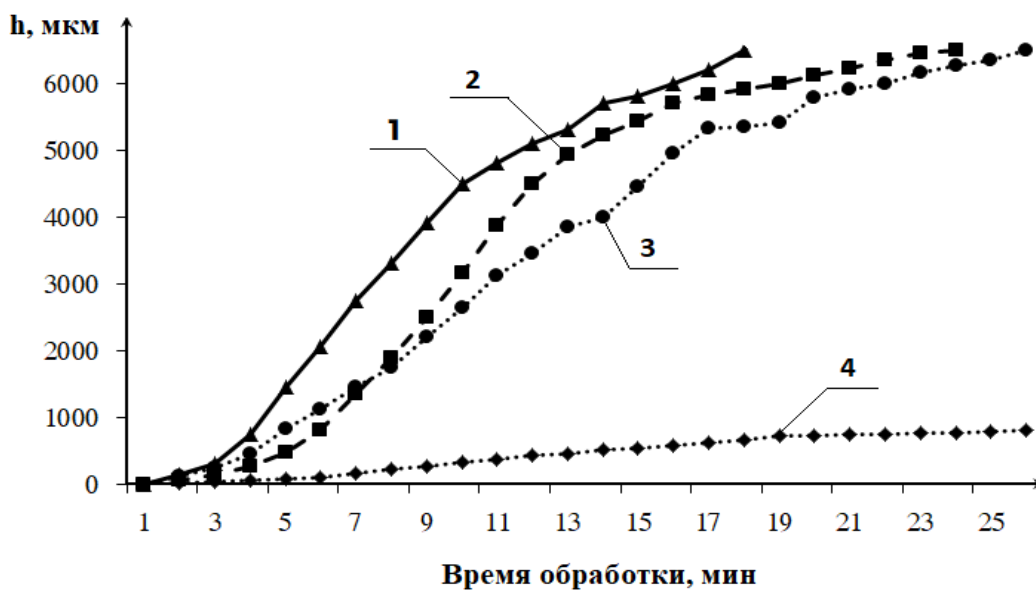


Рисунок 17 – Зависимость времени прошивки отверстия от глубины отверстия в сплаве Д16Т при диаметре ЭИ  $d = 200$  мкм: 1 – вращение ЭИ с канавками; 2 – вращении ЭИ с лыской; 3 – вращении цилиндрических ЭИ; 4 – без вращения

По результатам экспериментального исследования формообразования микроотверстий при МЭЭО показано, что производительность процесса электроэрозионной обработки микроотверстий увеличивается с увеличением площади поперечного сечения межэлектродного пространства.

Таблица 1

**Рекомендуемые режимы МЭЭО глубоких микроотверстий в сплаве Д16Т**

Параметр	Значение
Энергия импульса, мкДж	96...128
Напряжение холостого хода $U_0$ , В	60...75
Длительность импульса $t_{on}$ , мкс	1,5...2
Количество импульсов в пакете $N$	4...6
Частота вращения ЭИ, об/мин	2000...3000
Форма ЭИ	скрученный прямоугольный ЭИ

На основании результатов теоретико-экспериментальных исследований можно заключить, что для обработки микроотверстий диаметром от 0,2 мм до 0,5 мм в сплаве Д16Т наилучшая производительность обработки достигается при следующих условиях: энергия импульса 144 мкДж, скорость вращения ЭИ 8000 об/мин, использование скрученного прямоугольного ЭИ. Однако при таких режимах существенно снижается точность обработки и увеличивается износ ЭИ. Для снижения износа ЭИ можно рекомендовать уменьшение энергии импульса до 96...128 мкДж. Для обеспечения заданной точности обработки рекомендуется уменьшить скорость вращения ЭИ до 2000...3000 об/мин (табл. 1).

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенный сравнительный анализ методов получения микроотверстий, показал, что традиционные методы не всегда пригодны для получения глубоких микроотверстий. Установлено, что наиболее перспективным способом обработки микроотверстий является микроэлектроэрозионная обработка.

2. Разработана структура мультифизической модели, учитывающей взаимосвязь процессов локального удаления материала с электродов в результате теплового действия электрических разрядов и эвакуацию продуктов обработки из межэлектродного пространства для различных кинематико-геометрических схем электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий.

3. Разработана математическая модель тепловых процессов в обрабатываемой заготовке и в электроде-инструменте, учитывающая изменение теплофизических свойств обрабатываемого материала, локализацию последовательных разрядов на поверхностях электродов, и позволяющая определять скорость удаления материала с заготовки, износ электрода-инструмента, а также скорость образования продуктов обработки в межэлектродном пространстве при электроэрозионной обработке глубоких микроотверстий. В результате вычислительных экспериментов с использованием предложенной модели установлены зависимости технологических показателей от условий проведения процесса.

4. Разработана математическая модель процессов переноса в

межэлектродном пространстве для различных кинематико-геометрических схем электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий, которая позволила установить зависимости скорости эвакуации продуктов обработки из межэлектродного пространства от формы и размеров электрода-инструмента, а также скорости его вращения.

5. Разработана методика расчета режимов и прогнозирования технологических показателей электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий, базирующаяся на предложенной мультифизической модели электроэрозионной обработки глубоких микроотверстий. Предложенная методика позволяет существенно повысить качество проектных решений при разработке операций электроэрозионной обработке отверстий и сократить объем экспериментальной доводки.

6. Разработана экспериментальная установка, обеспечивающая реализацию предложенных условий и режимов обработки глубоких микроотверстий. Установка позволяет осуществлять обработку со скоростью вращения электрода-инструмента до 9000 об/мин и дискретностью его перемещения 1,25 мкм.

7. Установлено, что наилучшие результаты по производительности достигнуты при электроэрозионной обработке глубоких микроотверстий вращающимся электродом-инструментом с винтовыми канавками. За счет более эффективного удаления продуктов эрозии обеспечивается уменьшается времени обработки на 32,7% по сравнению с обработкой вращающимся цилиндрическим электродом для микроотверстий с отношением  $L/D > 15$ .

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

### *Публикации в изданиях Scopus*

1. **Nguyen T.D.** Simulation of electrical discharge machining of microholes / **T.D. Nguyen**, V.M. Volgin, V.V. Lyubimov // In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Vol 2. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. Springer. Cham. P.381 – 390.

2. **Nguyen T.D.** Modeling of Electrical Discharge Machining of Deep Micro Holes by Rotating Tool-Electrode / **T.D. Nguyen**, V.M. Volgin, V.V. Lyubimov // In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Springer. Cham. P. 171 – 179.

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

3. **Нгуен Т.З.**, Волгин В.М. Моделирование формирования эрозионных лунок при электроэрозионной микрообработке // Известия ТулГУ. Техн. науки. Тула. ТулГУ. 2018. Вып.7. С. 54 – 64.

4. **Нгуен Т.З.** Анализ влияния переменности теплофизических свойств обрабатываемого материала на форму и размеры лунки при электроэрозионной обработке / **Т.З. Нгуен**, В.М. Волгин // Известия ТулГУ. Техн. науки. Тула. ТулГУ. 2018. Вып.7. С. 18 – 27.

5. **Нгуен Т.З.** Моделирование электроэрозионного прошивания микроотверстий / **Т.З. Нгуен**, В.М. Волгин // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. ТулГУ. 2018. Вып.12. С. 275 – 282.

6. **Нгуен Т.З.** Моделирование эвакуации продуктов эрозии при электроэрозионной обработке отверстий с вращением электрода-инструмента // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2019. Вып.12. С. 406 – 415.

7. **Нгуен Т.З.** Моделирование формирования микрогеометрии обрабатываемой поверхности при электроэрозионной микрообработке / Т.З. Нгуен, В.М. Волгин // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. ТулГУ. 2020. Вып.12. С.491 – 98.

*Статьи и материалы конференций*

8. **Нгуен Т.З.** Совершенствование конструкции электродов-инструментов для электроэрозионной обработки микроотверстий / Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.: МАИ. 2017. С. 478.

9. **Нгуен Т.З.** Моделирование гидродинамических процессов при микроэлектроэрозионной обработке вращающимся электродом-инструментом // Труды НТК «Высокие, критические электро- и нанотехнологии». Тула: ТулГУ, 2017. С. 178 – 184.

10. Volgin V.M. Simulation of electrical discharge machining using multidischarge model / V.M. Volgin, V.V. Lyubimov, I.V. Gnidina, **T.D. Nguyen** // Abstracts of 9<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics. Chisinau. Moldova. 2018. P. 247.

11. **Нгуен Т.З.** Электроэрозионная микрообработка пакетами импульсов микросекундной длительности / **Т.З. Нгуен**, В.М. Волгин, Т.Л. Фам // Всероссийская НТК «Нано- и электрофизикохимическая обработка в машино- и приборостроении». Тула, 11 декабря 2019 г.: сборник докладов. Тула: ТулГУ. 2019. С. 202 – 209.

12. **Нгуен Т.З.** Экспериментальное исследование влияния формы электрода-инструмента на электроэрозионную обработку глубоких отверстий / **Т.З. Нгуен**, В.М. Волгин // Всероссийская НТК «Нано- и электрофизикохимическая обработка в машино- и приборостроении». Тула, 11 декабря 2019 г.: сборник докладов. Тула: ТулГУ. 2019. С. 222 – 229.

13. **Нгуен Т.З.** Моделирование формирования обрабатываемой поверхности при электроэрозионной микрообработке / Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: ПНИПУ. 2019. С. 157 – 160.

14. **Нгуен Т.З.** Генератор сверхкоротких импульсов для электроэрозионной микрообработки / Advances in Science and Technology. Сборник статей XXIX международной научно-практической конференции. Ч.1. М: НИЦ Актуальность.РФ. 2020. С. 93 – 96.

15. **Нгуен Т.З.** Моделирование износа электродов-инструментов при электроэрозионной микрообработке / **Т.З. Нгуен**, В.М. Волгин, Ю.С. Тимофеев // Региональная НТК «Нано- и электрофизикохимическая обработка в машино- и приборостроении». Тула, 10 декабря 2020 г.: сборник трудов. Тула: ТулГУ. 2020. С. 87 – 94.

Подписано в печать 26.04.2021

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ 015к

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95