

На правах рукописи



**КУРОЧКИН Андрей Игоревич**

**ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
МИКРОЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.02.07 Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Любимов Виктор Васильевич.

Официальные оппоненты: Рахимянов Харис Магсуманович  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет», г. Новосибирск,  
заведующий кафедрой «Технология машиностроения»;

Козырь Денис Владимирович  
кандидат технических наук,  
АО «Научно-исследовательский институт технической  
физики и автоматизации», г. Москва,  
ведущий научный сотрудник.

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический университет»,  
г. Пермь

Защита диссертации состоится «6» декабря 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, 9-й корп., ауд. 101.

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

<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/kurochkin-ai/>

Автореферат разослан «11» октября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.В. Черняев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследований**

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) является одним из наиболее эффективных методов обработки электропроводных материалов, обладающих высокой хрупкостью и твердостью. Уже много лет метод ЭЭО находит широкое применение в промышленности. В связи с этим современное электроэрозионное оборудование достигло высокого уровня совершенства. Однако в связи с быстрым развитием научно-технического прогресса в последние годы перед промышленностью все чаще возникают задачи, для эффективного решения которых возможностей современного электроэрозионного оборудования недостаточно.

Прежде всего, такие задачи возникают в области микроэлектроэрозионной обработки (МЭЭО), а также в такой нетрадиционной для ЭЭО области, как обработка полупроводниковых материалов, для которой характерны повышенные требования к показателям качества обработанной поверхности, износа электрода-инструмента (ЭИ) а также точности обработки.

Таким образом, несмотря на широкое применение ЭЭО в промышленности и высокий уровень развития современной электроэрозионной техники, поиск путей улучшения технологических показателей процесса ЭЭО по-прежнему является актуальной задачей.

### **Цель работы**

Целью работы является расширение технологических возможностей процесса МЭЭО путём управления процессом распределения энергии в импульсе посредством частотной модуляции.

Достижение указанной цели в работе потребовало решения следующих задач.

1. Провести анализ физических основ процесса МЭЭО и определить наиболее эффективный метод управления энергией в импульсе для заданных условий.
2. Осуществить математическое моделирование тепловых и электрических процессов, происходящих в МЭП при традиционной МЭЭО и МЭЭО импульсами с модуляцией, с целью определения эффективности применения предложенного метода управления энергией.
3. Разработать экспериментальное оборудование, обеспечивающее реализацию разработанных условий и режимов обработки.
4. Провести экспериментальные исследования МЭЭО с целью определения диапазонов рациональных технологических режимов и условий обработки.

### **Методы исследования**

Теоретические исследования проводились с использованием основных положений электрофизических методов обработки и математического моделирования. Для математического моделирования использовались программные продукты Multisim, MathCAD и Comsol Multiphysics. При проведении экспериментальных исследований использовалась спроектированная и изготовленная установка МЭЭУ-1, а также современная измерительная и регистрирующая аппаратура (сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO P47H, профилограф-профилометр Surf Corder 1400α, оптический микроскоп Carl Zeiss Zena, генератор сигналов произвольной формы Agilent 33521A, осциллограф Акип-4115/4А).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Рассчитанный режим обработки импульсами с частотной модуляцией позволяет управлять величиной и характером распределения энергии импульса при ЭЭО.
2. Методика исследования процесса электроэрозионной обработки импульсами с частотной модуляцией при помощи математического моделирования.

3. Генератор импульсов установки МЭЭУ-1 обеспечивает генерацию рабочих импульсов с частотной модуляцией и регулировку их параметров в широком диапазоне.

4. Результаты экспериментальных исследований процесса ЭЭО пакетами высокочастотных импульсов и рекомендации по выбору рациональных схем и режимов обработки.

**Научная новизна** заключается во введении частотной модуляции рабочих импульсов в управление энергетическим обеспечением процесса ЭЭО.

**Практическая ценность** результатов работы:

– на основе выполненных исследований разработаны технологические режимы ЭЭО импульсами с частотной модуляцией, позволяющие получать фасонные микроэлементы в заготовках из различных материалов при достижении высоких показателей точности (до 11-го квалитета) и качества обработки без применения дополнительных операций по доводке полученных микроэлементов;

– создана экспериментальная установка, обеспечивающая реализацию разработанных режимов ЭЭО;

– на основе результатов экспериментальных исследований даны рекомендации по выбору рациональных режимов обработки.

**Теоретическая значимость работы** заключается в расширении знаний о характере протекания электрофизических процессов в условиях ЭЭО с частотной модуляцией рабочих импульсов.

**Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональных конференциях «Современная электротехнология в промышленности центра России» (Тула, ТулГУ, 2009 – 2012 гг.), на конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2009 – 2012 гг.), Региональной молодежной научной конференции «Техника XXI века глазами молодых учёных» (2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Высокие, критические электро- и нанотехнологии» (2011 г.), III Международной научной конференции «Моделирование структур, строение вещества, нанотехнологии» (2016 г.).

**Публикации**

По результатам исследований опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 работы – в издании, входящем в Перечень рецензируемых научных журналов ВАК. Общий объем публикаций 4,3 п.л.

**Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка используемых источников из 85 наименований; общий объем – 129 страниц машинописного текста, включая 64 рисунков и 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность решаемой задачи, ее практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ современных представлений о физических основах процесса МЭЭО, его характерных отличиях от процесса традиционной ЭЭО. Рассмотрены основные характеристики и технологические показатели процесса. Проведен обзор применяемых при МЭЭО режимов. Проанализирована взаимосвязь между выбранным режимом и технологическими показателями обработки. На основе анализа публикаций сделан обзор современного оборудования для МЭЭО, его возможностей и характеристик.

В результате проведенного анализа было установлено, что для повышения эффективности процесса МЭЭО необходимо рациональное сочетание производительности обработки  $Q$  и шероховатости обработанной поверхности  $Rz$  на основе выбора энергии рабочего импульсного сигнала  $W_u$ .

На основе данных, полученных в результате анализа, было выработано решение применить метод частотной модуляции для управления распределением энергии импульса  $W_u$  по времени воздействия рабочего импульса при ЭЭО. Сущность данного метода заключается в том, что рабочий импульсный сигнал модулируется другим высокочастотным сигналом (рис. 1).

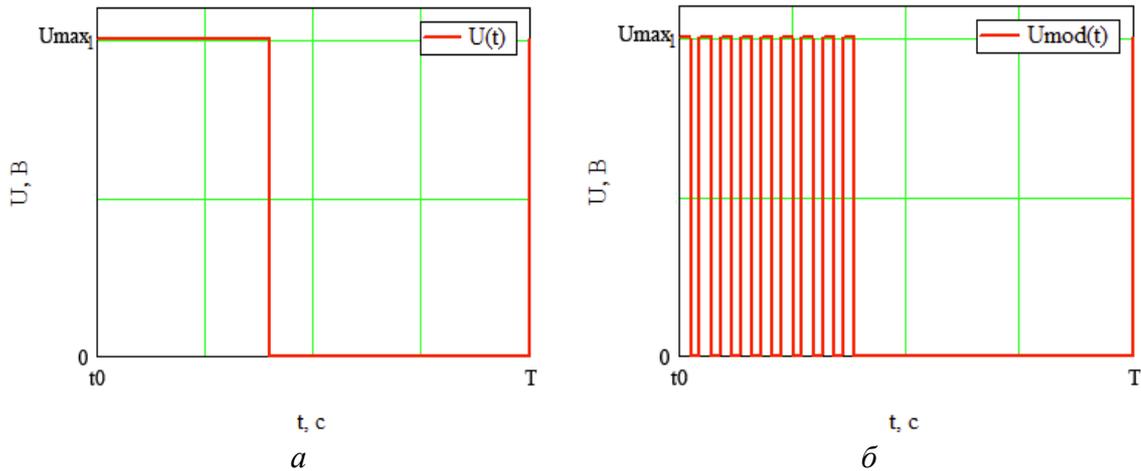


Рис. 1. Рабочие импульсы напряжения: а – импульс без модуляции ( $U(t)$ ); б – рабочий импульс, промодулированный высокочастотным сигналом ( $U_{mod}(t)$ )

При этом частота модулирующего сигнала подбирается таким образом, чтобы при воздействии модулированного сигнала на нелинейную нагрузку значения напряжения и тока в течение паузы между импульсами не падали до нуля.

Во **второй главе** представлены результаты теоретических исследований электрофизических процессов в МЭП при ЭЭО. Исследования проводились методом математического моделирования. Для моделирования использовались программные пакеты MathCAD версии 15.0, Multisim версии 11.0 и COMSOL Multiphysics версии 3.5.

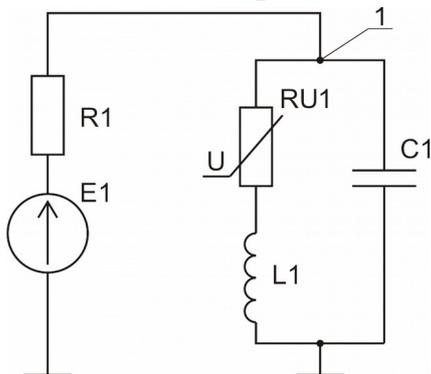


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема МЭП: 1 – точка, в которой необходимо определить характер изменения напряжения;  $E1$  – источник питания;  $R1$  – внутреннее сопротивление источника питания;  $RU1$  – варистор;  $C1$  – конденсатор;  $L1$  – индуктивность

На начальном этапе моделирования был определен характер изменения тока и напряжения в МЭП при воздействии на него единичного и модулированного рабочих импульсов.

Для этого при помощи программного пакета NI Multisim была разработана эквивалентная электрическая схема МЭП (рис. 2), на основе которой было выполнено сравнительное моделирование воздействия на МЭП обычных и модулированных рабочих импульсов.

В результате моделирования при помощи программных пакетов Multisim и MathCAD, были построены графики тока и напряжения в точке 1 эквивалентной схемы МЭП (см. рис. 2) при воздействии на неё единичного импульса напряжения и модулированного импульса (рис. 3).

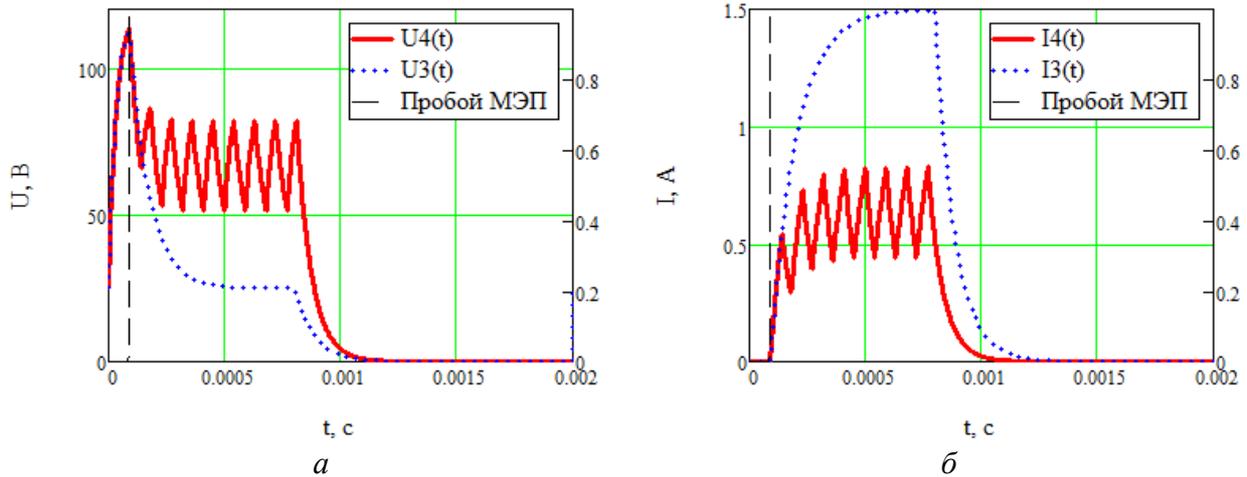


Рис. 3. Зависимости напряжения (а) и тока (б) от времени при воздействии на МЭП единичного и модулированного импульсов:  $U3(t)$  – график напряжения при воздействии единичного импульса;  $U4(t)$  – график напряжения при воздействии модулированного импульса;  $I3(t)$  – ток при воздействии единичного импульса;  $I4(t)$  – ток при воздействии модулированного импульса

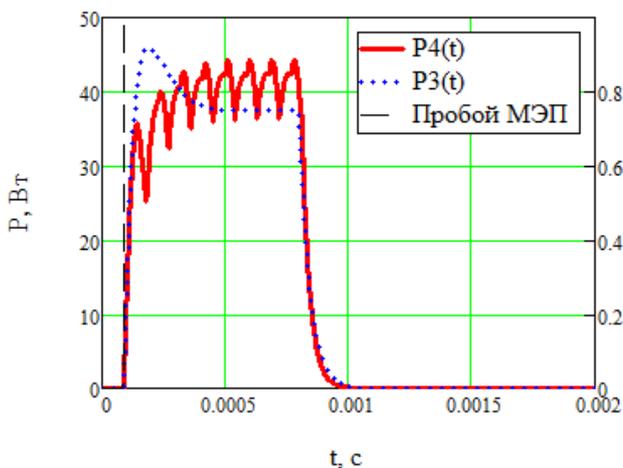


Рис. 4. График распределения мощности по времени воздействия импульса:  $P4(t)$  – модулированный импульс;  $P3(t)$  – единичный импульс

В результате моделирования получены изображения распределения температурного поля во внутреннем объеме исследуемого образца в различные моменты времени воздействия единичного и модулированного импульсов (рис. 5).

Также получены данные о расположении изотерм во внутреннем объеме исследуемого образца, на основе которых была определена форма единичных эрозионных лунок (задача Стефана), которые образуются в результате воздействия единичного и модулированного импульсов (рис. 6).

Полученные результаты свидетельствуют, что различия в характере распределения мощности и плотности теплового потока по времени импульса обуславливают различия в распределении температурного поля.

В случае воздействия единичного импульса температура на поверхности образца достигает максимума за 100...200 мкс, после чего начинает падать (рис. 5, а). Такой характер распределения температуры обуславливает возникновения значительных температурных напряжений в начале воздействия импульса и обуславливает следующий характер фор-

На основе полученных данных о зависимости тока и напряжения от времени при воздействии на МЭП единичного и модулированного рабочего импульсов, построен график распределения мощности по времени воздействия импульса (рис. 4)

На основе полученных данных о распределении мощности и плотности теплового потока в импульсе, было произведено моделирование воздействия плоского источника тепла на поверхность кремниевой заготовки, который образуется в зоне воздействия канала разряда при ЭЭО. Моделирование проводилось при помощи программного пакета Comsol Multiphysics версии 3.5.

мирования эрозионной лунки (рис. 6, а): на временном участке 0...200 мкс плотность теплового потока и глубина прогрева материала образца максимальны, в результате чего происходит формирование лунки преимущественно вглубь; после 200 мкс и до конца воздействия импульса плотность теплового потока падает, а диаметр канала разряда увеличивается, что приводит к росту диаметра лунки, в то время как её глубина остается практически неизменной.

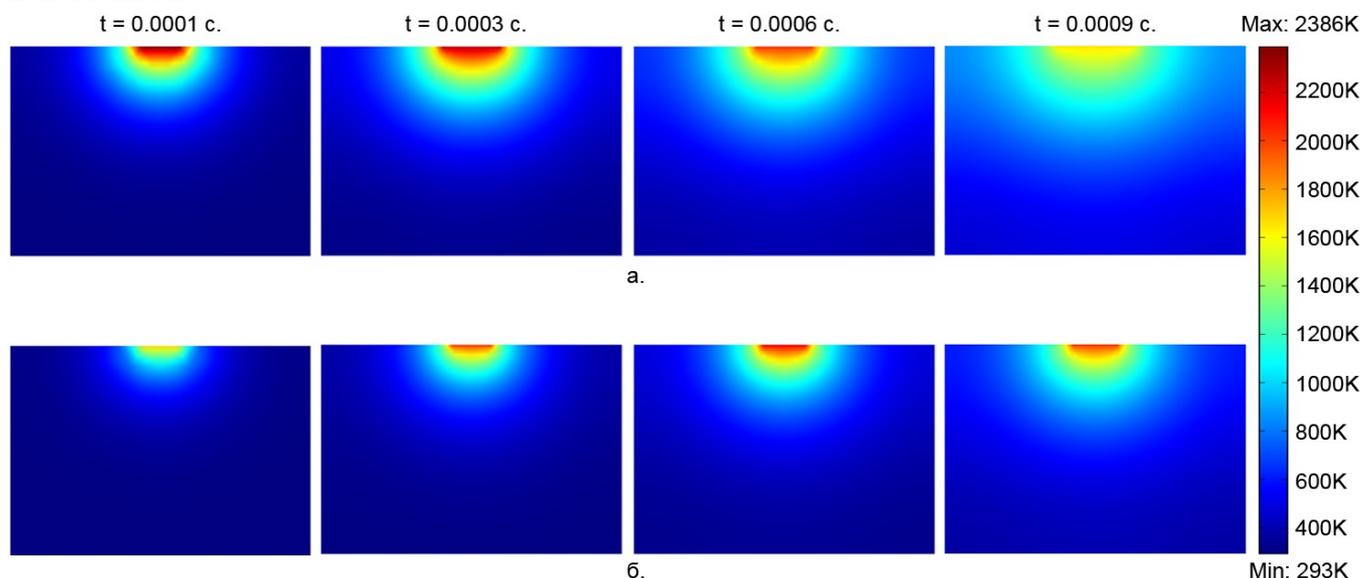


Рис. 5. Изменение температурного поля во внутреннем объеме образца при воздействии непрерывного (а) и модулированного (б) импульсов

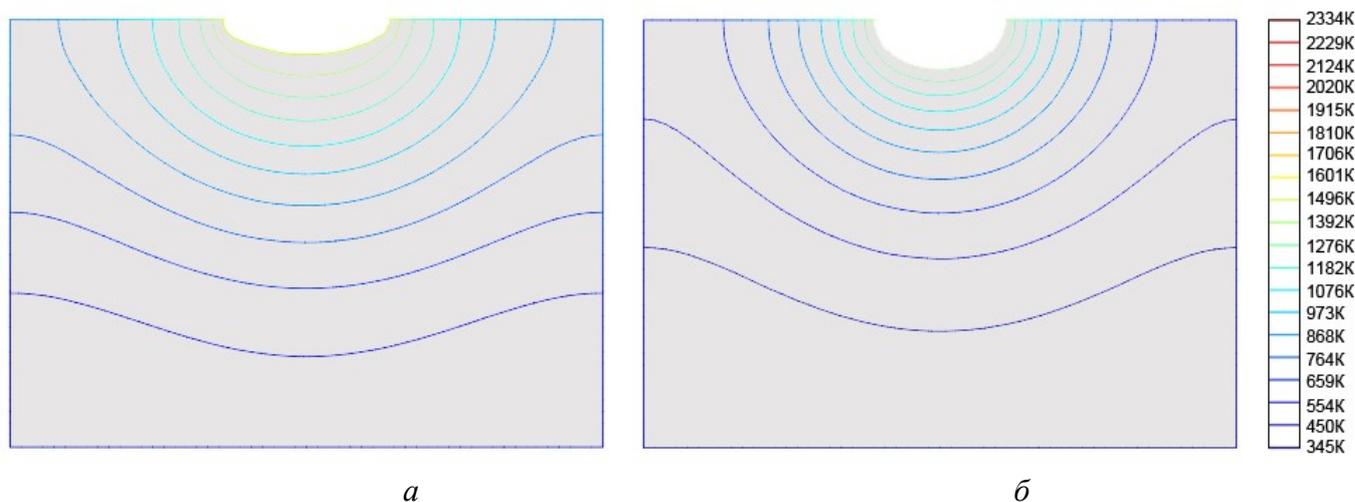


Рис. 6. Эрозионные лунки, сформированные в результате воздействия: а – непрерывного импульса; б – модулированного импульса

В случае воздействия модулированного импульса температура на поверхности исследуемого образца плавно нарастает на протяжении всего временного участка воздействия импульса и достигает максимума в его конце (см. рис. 5, б). Такой характер распределения температуры позволяет существенно снизить температурные напряжения и обуславливает формирование эрозионной лунки иной формы, чем в случае воздействия импульса без модуляции (см. рис. 6, б).

Таким образом, в результате математического моделирования было установлено, что применение рабочих импульсов с частотной модуляцией приводит к изменению характера

протекания электрофизических процессов в МЭП при ЭЭО, что обуславливает повышение технологических показателей процесса.

**Третья глава** посвящена проектированию оборудования для проведения экспериментальных исследований процесса ЭЭО ПВИ.

Для проведения исследований была спроектирована и изготовлена установка МЭЭУ-1, в состав которой входят 5 основных узлов и систем: система управления *I*, система формирования импульсов *II*, привод подачи *III*, эрозионная ячейка *IV* и гидросистема *V* (рис. 7).

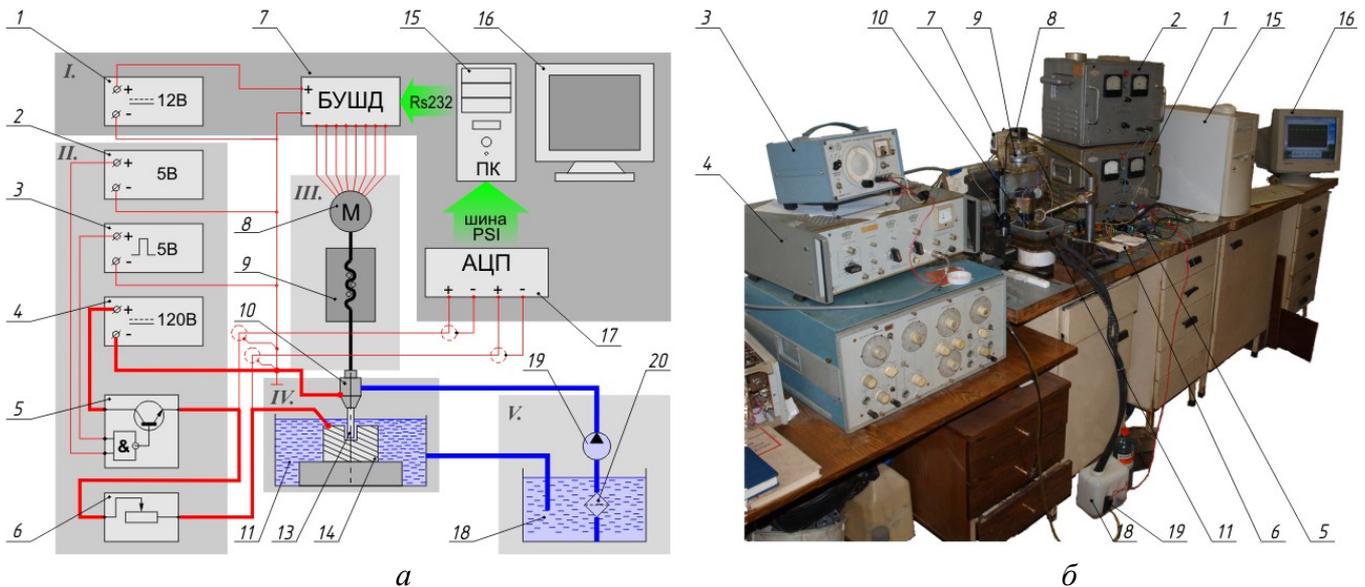


Рис. 7. Установка МЭЭУ-1: а – функциональная схема; б – общий вид; *I* – система управления; *II* – система формирования импульсов; *III* – привод подачи; *IV* – эрозионная ячейка; *V* – гидросистема; 1 – источник напряжения 12В; 2, 3 – задающие генераторы импульсов; 5 – усилитель мощности; 6 – регулятор мощности; 7 – блок управления ШД; 8 – ШД; 9 – шариковинтовая пара; 10 – электрододержатель; 11 – ванна с РЖ; 13 – ЭИ; 14 – заготовка; 15 – ЭВМ; 16 – монитор; 17 – АЦП; 18 – бак с РЖ; 19 – насос; 20 – фильтр

Система управления *I* служит для контроля электрических процессов в МЭП и управления приводом подачи *III*. При помощи платы АЦП 17 осуществляется контроль величины тока, протекающего через МЭП, и амплитуды рабочих импульсов. Полученные данные обрабатываются ЭВМ 15, которая на основе полученных данных при помощи специализированной программы формирует сигналы для блока управления шаговым двигателем (далее ШД) 7.

Система формирования рабочих импульсов *I* обеспечивает преобразование постоянного напряжения величиной 30...120 В в импульсное с заданными характеристиками. Данная система состоит из источника опорного напряжения 4, усилителя мощности 5 и регулятора мощности 6.

Посредством токоподводов к выводам системы управления подключены электрод-инструмент 13 и электрод-заготовка 14. При этом заготовка является анодом, а электрод-инструмент – катодом.

Электроды помещены в ванну с рабочей жидкостью (РЖ) 11, и все вместе представляют собой эрозионную ячейку *IV*.

Привод подачи служит для перемещения ЭИ. Он состоит из ШД, шариковинтовой пары (далее ШВП) и электрододержателя, в котором закреплен ЭИ. Дискретность перемещения ЭИ в микрошаговом режиме составляет 5 мкм.

Гидросистема *V* осуществляет подачу РЖ в эрозионную ячейку *IV* и её прокачку через МЭП. Гидросистема состоит из бака для хранения РЖ 18, из которого при помощи насоса 19 РЖ по системе трубок подаётся непосредственно в МЭП.

Разработанная установка обладает возможностью генерации как непрерывных, так и модулированных импульсов. Основные характеристики установки представлены в таблице 1.

Таблица 1

*Электрические характеристики установки МЭЭУ-1*

Наименование параметра:	Величина:
Частота рабочего импульсного сигнала, кГц	0,1...1000
Частота модулирующего сигнала, кГц	100...2000
Скважность рабочего импульсного сигнала	1...100
Скважность модулирующего сигнала	1...10
Амплитуда импульсов, В	30...120
Выходная мощность, Вт	10...200

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса ЭЭО импульсами с частотной модуляцией.

На основе данных об особенностях распределения мощности в импульсе при ЭЭО единичными и модулированными импульсами, которые были получены в результате теоретических исследований (глава 2), была разработана комплексная методика определения зависимости основных технологических показателей процесса от характеристик рабочего импульсного сигнала.

На основе разработанной методики были проведены исследования зависимости величин производительности обработки  $Q$  и износа ЭИ  $\Delta_{эи}$  от длительности рабочего импульса  $t_u$  и скважности модулирующего сигнала  $q_{mod}$  (рис. 8).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение длительности импульса ведет к росту производительности обработки и повышению износа ЭИ. Уменьшение скважности модулирующего сигнала  $q_{mod}$  приводит к снижению износа ЭИ, при этом производительность снижается не так значительно, как при уменьшении длительности рабочего импульса.

Были проведены исследования зависимости величины максимальной погрешности формообразования  $\Delta_{max}$  и износа ЭИ  $\Delta_{эи}$  от амплитуды импульсов  $U$  и типа рабочей жидкости. В качестве рабочих жидкостей применялись керосин (ГОСТ 10227-86) и дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72). В качестве материала ЭИ использовались медь М0 (ГОСТ 859-2001), вольфрам (ГОСТ 19671-91), сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72); латунь Л63 (ГОСТ 15527-2004) (рис. 9).

В результате проведенных исследований было установлено, что лучшая точность обработки достигается при использовании керосина, в то время как лучшая производительность и меньший износ ЭИ наблюдались при использовании дистиллированной воды. Минимальная погрешность формообразования и максимальная производительность достигаются в случае использования ЭИ из меди М0 (ГОСТ 859-2001) (рис. 10).

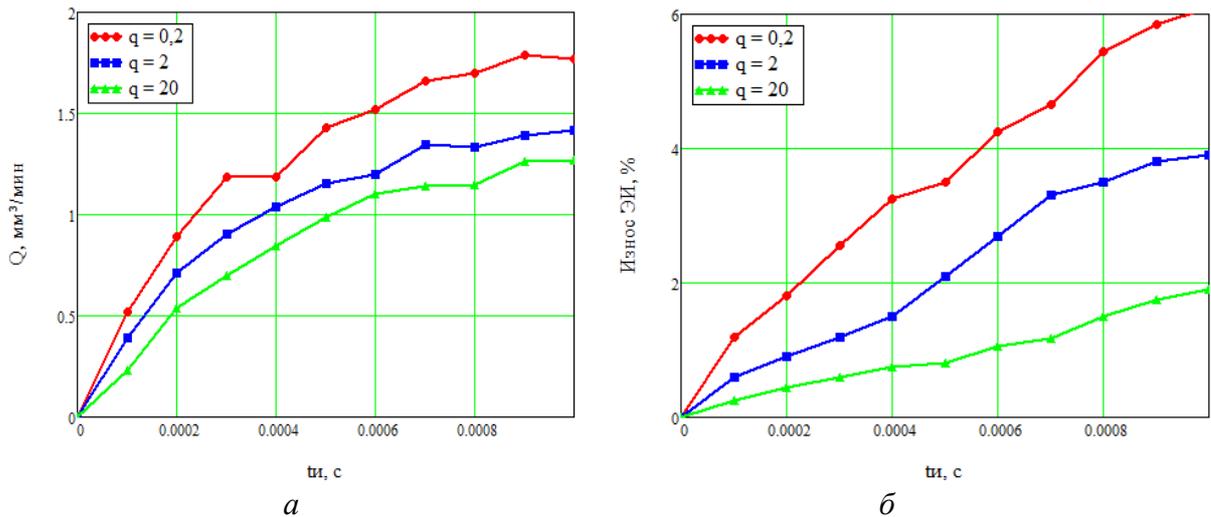


Рис. 8. Зависимости величин производительности обработки (а) и износа ЭИ (б) от длительности рабочего импульса и скважности модулирующего сигнала:  $Q$  – производительность обработки, мкм<sup>3</sup>/мин.;  $D_e$  – удельный износ ЭИ, %;  $t$  – длительность импульса, с.;  $q$  – скважность модулирующего сигнала

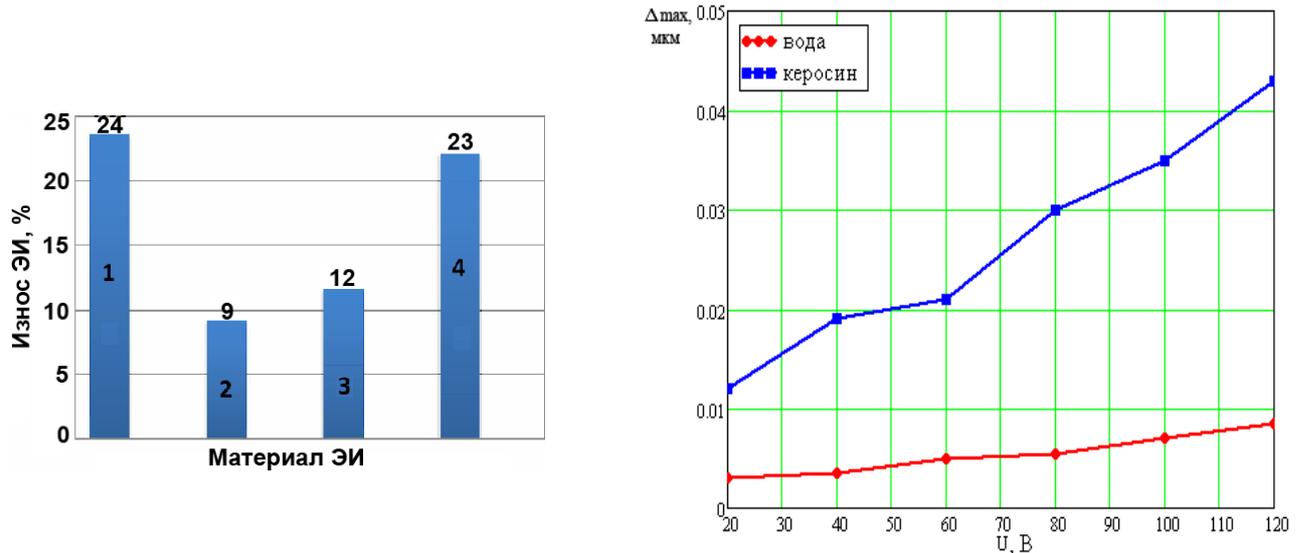


Рис. 9. Удельный износ ЭИ из различных материалов: 1 – молибден (ГОСТ 18905-73); 2 – медь М0 (ГОСТ 859-2001); 3 – латунь Л63 (ГОСТ 15527-2004); 4 – сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72)

Рис. 10. Зависимость максимальной погрешности формообразования  $\Delta_{\text{max}}$  от амплитуды импульса  $U$

В ходе проведения экспериментов была отмечена высокая устойчивость ЭИ к износу, которая обусловлена иным характером нарастания температуры в зоне воздействия канала разряда при использовании модулированных импульсов, который был определен в главе 2 в результате теоретических исследований. При этом обеспечивается мягкий режим нагрева, что приводит к снижению доли факельной составляющей в переносе тепла в МЭП, которая является основным фактором износа ЭИ.

На основе результатов исследований были определены рациональные диапазоны режимов процесса ЭЭО ПВИ (таблица 2).

На основе полученных данных о рациональных диапазонах режимов методом ЭЭО модулированными импульсами была произведена МЭЭО металлов и полупроводников тонкостенными ЭИ (толщина стенки 0,2...0,35 мм).

## Рациональные диапазоны режимов процесса МЭЭО модулированными импульсами

Параметр	Мин.	Макс.
Амплитуда импульсов, В	60	120
Длительность рабочих импульсов, мс	1	10
Длительность модулирующих импульсов, мс	0,005	1
Скважность модулирующих импульсов	0,1	10

Проводившиеся ранее эксперименты по обработке тонкостенными ЭИ методом традиционной ЭЭО дали неудовлетворительные результаты – ЭИ либо преждевременно разрушались, либо производительность обработки была слишком низкой.

В ходе проведения экспериментов использовались следующие типы ЭИ: трубчатые, полученные методом электролитического осаждения (толщина стенки ЭИ – 0,25...035 мм); составные с рабочей частью из медной фольги (толщина фольги – 0,05 мм); ЭИ на полимерной основе с нанесённым на неё металлическим покрытием (толщина покрытия 0,02...0,035 мм).

В результате проведенных экспериментов были получены следующие образцы микрообъектов: трубчатыми ЭИ – микрополости сложной формы в заготовках из твердого сплава Т15К6 (рис. 11), стали Х18Н10Т и углеродистой стали ШХ15; составным ЭИ с рабочей частью из фольги – массив поверхностных элементов сложной формы на торце заготовки из бронзы БрА7 (рис. 12); ЭИ на полимерной основе – микрополость в пластине из монокристаллического кремния (рис. 13).

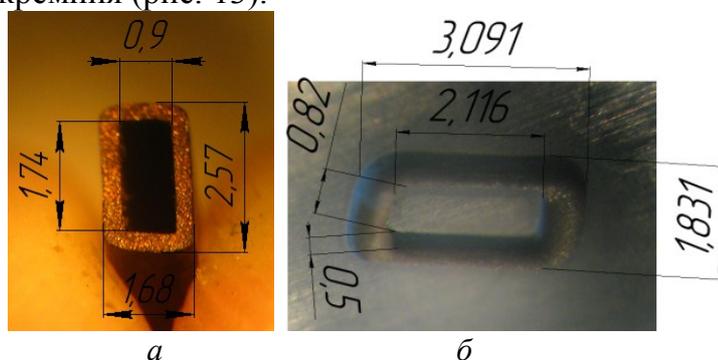


Рис. 11. Трубчатый ЭИ, полученный методом гальванического осаждения (а) и полученная им микрополость в заготовке из твердого сплава Т15К6 (б)

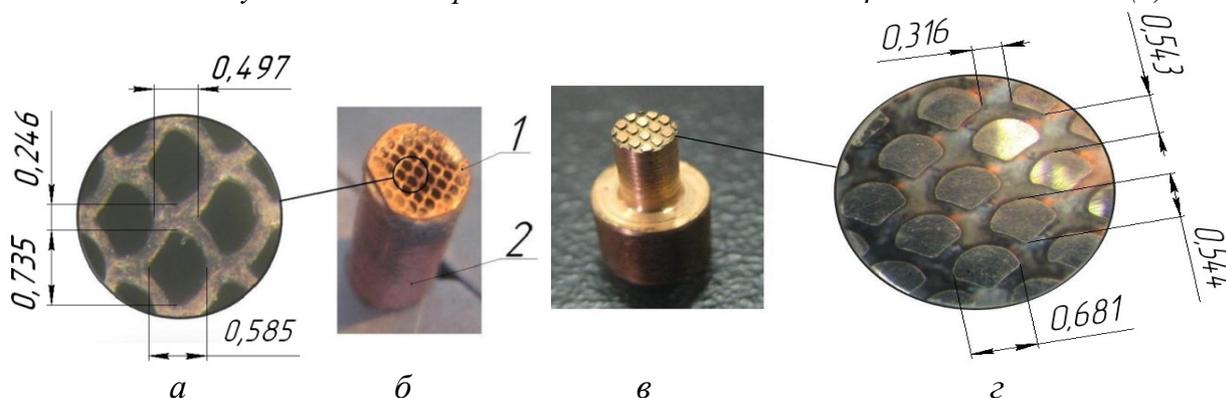


Рис. 12. Составной ЭИ с рабочей частью из медной фольги: а – рабочая часть ЭИ с микроэлементами в виде ячеек сетки сложной формы; б – общий вид составного ЭИ; в – заготовка из бронзы БрА7 с микроэлементами на одной из поверхностей; г – поверхностные микроэлементы, полученные составным ЭИ

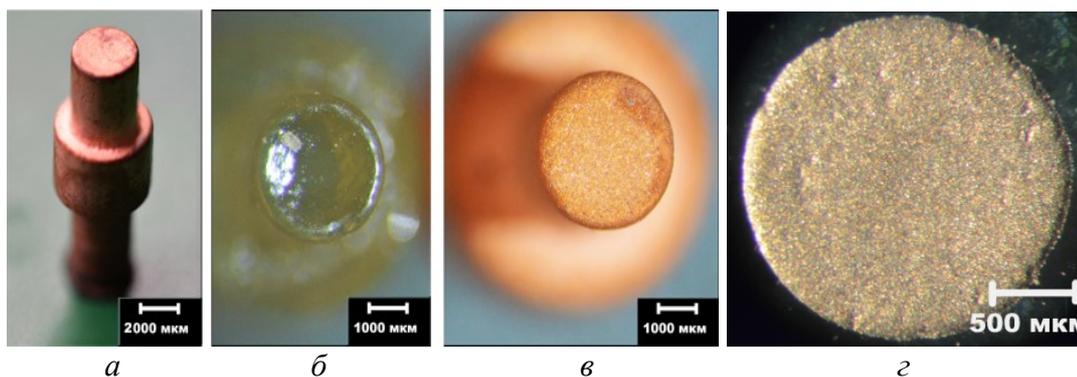


Рис. 13. Электрод-инструмент, полученный методом нанесения металлического покрытия на полимерную основу: а – общий вид электрода; б – полимерная основа ЭИ без покрытия; в – ЭИ с нанесенным покрытием; г – микрополость в кремниевой пластине, полученная при помощи ЭИ на полимерной основе

С целью определения величины износа ЭИ были проведены исследования рабочих поверхностей ЭИ до и после обработки на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ). Исследования показали, что после обработки шероховатость рабочей части ЭИ снизилась на 0,05 мкм (рис. 14), т.е. в процентном соотношении к глубине полученной микрополости (200 мкм) износ ЭИ составил 0,025 %.

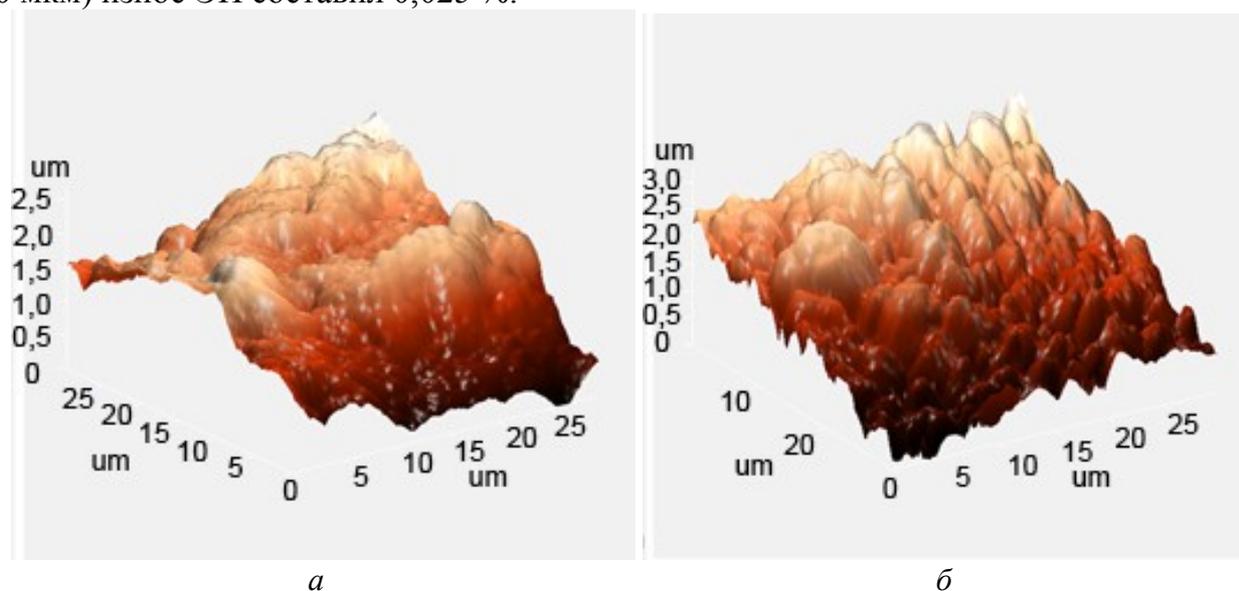


Рис. 14. Поверхность ЭИ, изображение с СЗМ: а – поверхность до обработки; б – поверхность после обработки (2D)

При анализе изображений с оптического микроскопа было отмечено наследование микродефектов покрытия ЭИ поверхностью микрополости (рис. 15). Данное явление свидетельствует о высокой точности копирования формы в процессе обработки.

Было установлено, что ввиду высокой точности копирования профиля поверхности ЭИ при микрообработке методом ЭЭО ПВИ существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает исходная шероховатость ЭИ. Исследования показали, что при использовании ЭИ с исходной шероховатостью рабочей части 0,3 мкм даже на самых мягких режимах не удалось получить микрополость с шероховатостью менее 0,3...0,4 мкм.

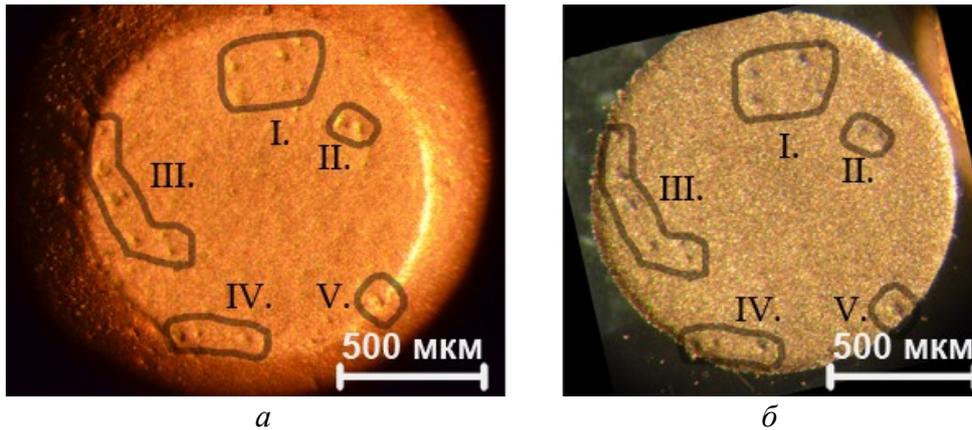


Рис. 15. Наследование дефектов покрытия ЭИ на поверхности полученной им микрополости: а – поверхность ЭИ; б – обработанная поверхность; I, II, III, IV, V – объединенные в группы дефекты и их отпечатки на поверхности микрополости

Наилучшие показатели качества обработанной поверхности были достигнуты в ходе проведения эксперимента по получению микрополостей в кремнии. В ходе эксперимента использовался цельнометаллический медный ЭИ с рабочей частью полусферической формы, исходная шероховатость которой составляла 0,02 мкм. В процессе обработки ЭИ придавалось вращение со скоростью 800 об/мин. В результате проведения эксперимента была получена микрополость в пластине из монокристаллического кремния глубиной 300 мкм (рис. 16). Обработка производилась модулированными импульсами за один проход, без использования каких-либо дополнительных средств для улучшения качества обработанной поверхности. Время обработки составило 20 мин. В результате исследования поверхности микрополости на СЗМ было установлено, что её шероховатость составляет 0,05 мкм. Данные показатели свидетельствуют о существенном улучшении технологических показателей процесса ЭЭО при использовании рабочих импульсов с частотной модуляцией.

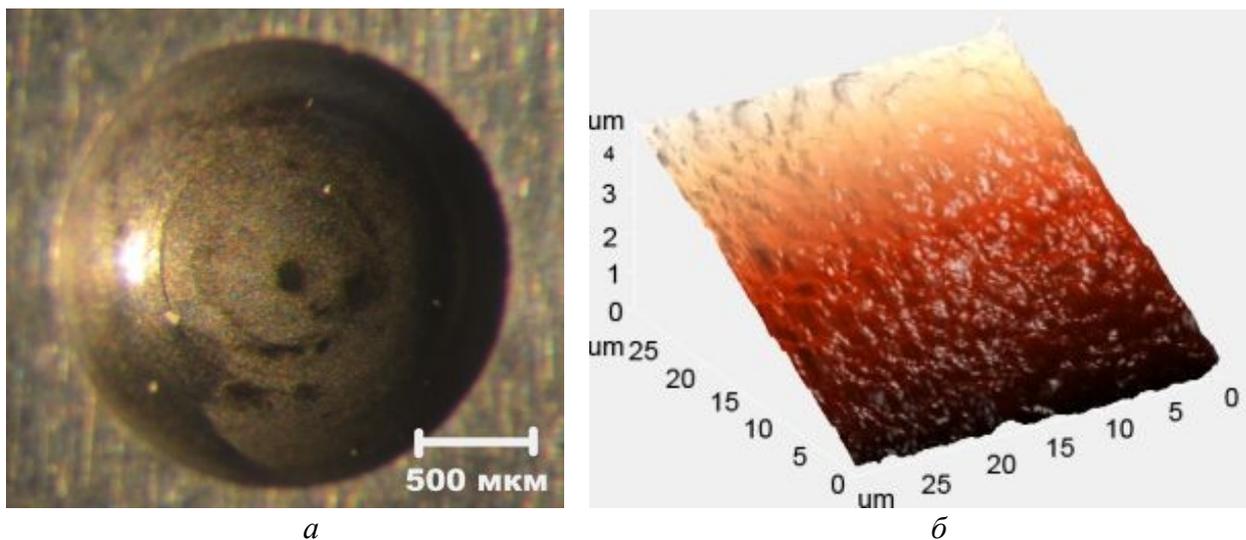


Рис. 16. Микрополость в кремнии, полученная отшлифованным металлическим ЭИ: а – изображение с оптического микроскопа (увеличение 10 крат); б – изображение с оптического микроскопа (увеличение 800 крат); в – изображение с зондового микроскопа (2D); г – изображение с микроскопа (3D)

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ литературы и публикаций по теме физических основ ЭЭО и зависимости технологических показателей процесса от выбранных режимов и характеристик оборудования. В результате анализа было установлено, что в настоящее время при выборе режимов обработки и математическом моделировании процесса ЭЭО основным показателем является энергия импульса, при этом никак не учитывается характер её распределения в процессе обработки.

2. На основе полученных в результате анализа литературы данных предложено применение частотной модуляции рабочих импульсов при ЭЭО с целью изменения характера распределения энергии в импульсе.

3. Проведено математическое моделирование электрофизических процессов в МЭП при воздействии непрерывных и модулированных импульсов. В результате моделирования установлено, что при воздействии модулированного импульса мощность в канале разряда распределяется иначе, чем в случае воздействия единичного импульса. Также было установлено, что изменение скважности модулирующего сигнала приводит к изменению скорости нарастания мощности и характера её распределения.

4. Проведено математическое моделирование распределения температурных полей во внутреннем объеме заготовки при воздействии на её поверхность плазменных каналов разряда, вызванных непрерывными и модулированными импульсами. В результате моделирования установлено, что в случае воздействия модулированных импульсов реализуется более мягкий режим нагрева, что обуславливает улучшение показателей качества обработанной поверхности.

5. На основе полученных данных о распределении температурного поля и расположении изотерм во внутреннем объеме заготовки определены геометрические характеристики единичных эрозионных лунок (задача Стефана), полученных в результате воздействия непрерывных и модулированных импульсов. Выявлено, что при воздействии модулированного импульса образуются лунки большей глубины и меньшего диаметра, чем в случае воздействия непрерывного импульса.

6. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования процесса ЭЭО импульсами с частотной модуляцией. Основным элементом установки является импульсный источник питания, осуществляющий генерацию как непрерывных импульсов, так и импульсов с модуляцией, и регулировку их параметров (мощности, амплитуды, частоты и скважности) в широком диапазоне.

7. Проведены экспериментальные исследования процесса МЭЭО модулированными импульсами. В результате исследований определены рациональные диапазоны режимов: максимальная производительность обработки достигается при длительности импульсов 5...10 мс и скважности модулирующего сигнала, близкой к 1; минимальные значения шероховатости поверхности и износа ЭИ достигаются при длительности импульса 1...3 мс и скважности модулирующего сигнала 3...5.

8. В результате проведенных экспериментов получены образцы микрополостей в заготовках из твердого сплава Т15К6, стали Х18Н10Т, углеродистой стали ШХ15; бронзы БрА7 и монокристаллического кремния. В ходе экспериментов были достигнуты высокие показатели качества обработанной поверхности ( $Ra$  0,05 мкм) и малые величины удельного износа ЭИ (0,025 %).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Курочкин А.И. Эквивалентное моделирование электрических процессов при ЭЭО В NI MULTISIM // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 11. Ч. 1. С. 87-92.

2. Курочкин А.И. Повышение технологических показателей микроэрозионной обработки при высокочастотных режимах // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 3. С. 39-47.

3. Кувшинов К.В., Курочкин А.И. Получение поверхностных микроэлементов методом микроэлектроэрозионной обработки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 5. С. 177-186.

4. Бадалов П.А., Кувшинов К.В., Курочкин А.И. Микроэлектроэрозионная обработка трубчатými электродами // X Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых: материалы докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 362 – 371.

5. Курочкин А.И. Электроэрозионная обработка импульсами наносекундной длительности // Современные электро- и нанотехнологии в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции. Тула, 7 октября 2011 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 31-33.

6. Курочкин А.И. Высокочастотный источник питания для микроэрозионной обработки // Сборник докладов IV Молодежной научно-практической конференции Тульского государственного университета «Молодежные инновации». Ч. I. Секция: Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С.164-167.

7. Курочкин А.И. Исследование процесса электроэрозионной обработки с использованием импульсов наносекундной длительности // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 26 октября 2011 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 74-78.

8. Курочкин А.И. Наносекундные генераторы для электроэрозионной обработки // Современные электротехнологии в промышленности России (молодежные инновации): сборник трудов научно-технической конференции. Тула, 12 октября 2010 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 18-20.

9. Курочкин А.И., Любимов В.В. Анализ возможностей эффективного использования высокочастотных генераторов импульсов при электроэрозионной обработке // Современная электротехнология в промышленности Центра России: труды X Региональной научно-технической конференции. Тула, 28 октября 2009 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 107 – 113.

10. Курочкин А.И., Сорокин К.В. Особенности конструкции системы управления высокочастотного источника питания для электроэрозионной обработки микрообъектов // Всероссийская научно-техническая конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средств их автоматизации»: сб. тезисов. Тула, 2008. С. 97 – 98.

11. Курочкин А.И., Волгин В.М., Грачев О.Е. Электроэрозионная обработка микрополостей в кремнии с использованием пакетов высокочастотных импульсов // Моделирование структур, строения вещества, нанотехнологии: сб. материалов III Междунар. науч. конф. (г.Тула, 18-21 апреля 2016 г.). Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2016. С. 125 – 129.

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 11.07.2016 г.  
Формат бумаги 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Усл.-печ. л. 0,9. Уч.-изд. л. 0,8. Тираж 100 экз. Заказ 063  
Тульский государственный университет  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92  
Отпечатано в Издательстве ТулГУ  
300012, г. Тула, пр. Ленина, 95