

На правах рукописи



ВЕНЕВЦЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ МИКРОФОРМООБРАЗОВАНИЕ
НА СВЕРХМАЛЫХ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗОРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПАКЕТОВ МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.02.07 Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Любимов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: Рахимьянов Харис Магсуманович, д-р.техн.наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Технологии машиностроения»

Грачев Олег Евгеньевич, канд.техн.наук, ООО «Технологические системы защитных покрытий» (г. Москва), начальник отдела научно-технических разработок

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «2» декабря 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92 (9–101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/venevsev-au/>

Автореферат разослан «15» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Микросистемные технологии рассматриваются сегодня как ключевые технологии с экономическим потенциалом, сравнимым с микроэлектроникой.

Преимущества микротехнических изделий очевидны: повышенная функциональная точность, меньшая масса детали или узла, обладающих при этом более высокими эксплуатационными возможностями. Тенденцией последних лет стало увеличение потребности не только в самих деталях, но и в составленных из нескольких таких деталей микрокомпонентах, располагаемых в более крупных деталях и узлах. Это обусловлено массовым переходом на модули, в которых функции нескольких деталей или подсистем не могут осуществляться посредством только одного узла, даже достаточно сложного.

Наибольшее распространение микродетали и микрокомпоненты получили в медицинской и биомолекулярной технике и электронике. Очевидна потребность в подобных деталях в медицине, где от их размеров (и размеров изготовленных из таких деталей приборов, например, кардиостимуляторов) нередко зависят возможность выполнения операций и время выздоровления пациентов. Авиационная промышленность также нуждается в миниатюрном крепеже, фитингах и датчиках, приборах для контроля потока воздуха и жидкости. В автомобилестроении вполне реально использование сверхмалых электродвигателей и исполнительных органов для систем безопасности, обеспечения удобства водителей и т. д. В сложных системах впрыска топлива и их элементах микродетали также находят свое место. При этом точность и качество обработанных изделий стремительно растут, а размеры типовых деталей уменьшаются. Однако оптимальный выбор размеров изделия представляет собой компромисс между возможностями технологии и затратами на его изготовление. Учитывая вышесказанное, возникает острая необходимость в технологическом решении, позволяющем получать высокое качество обработанной поверхности.

Электрохимическое микроформообразование (ЭХМФО) занимает лидирующие позиции во всем объеме получаемых микроизделий. Это связано с рядом неоспоримых преимуществ по сравнению как с традиционными, так и с нетрадиционными методами обработки. Во-первых, форма электрода-инструмента (ЭИ) остается неизменной на протяжении всего процесса обработки. Во-вторых, электрохимическое анодное растворение протекает, не оказывая практически никакого воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали. В-третьих, при ЭХМФО электрод-инструмент не разрушается, что в отличие от электроэрозионной обработки позволяет изготавливать такие электроды минимальных размеров.

На данный момент в технической литературе отсутствуют данные о технологическом обеспечении и технологических режимах, позволяющих проводить электрохимическую микрообработку на межэлектродных зазорах величиной порядка 5 мкм.

В связи с этим обоснование рациональных режимов и разработка технологического обеспечения для осуществления процесса электрохимического микроформообразования на малых и сверхмалых межэлектродных зазорах (МЭЗ) с применением пакетов микросекундных импульсов технологического напряжения для

получения микрополостей с точностью порядка 5 мкм является **актуальной научной задачей**.

Цель работы

Целью настоящей работы является повышение точности электрохимического микроформообразования с помощью использования сверхмалых межэлектродных зазоров и применения пакетов микросекундных импульсов напряжения.

Для достижения указанной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ получаемых микроизделий и их классификации, а также возможных конкурентных методов микроформообразования относительно электрохимической обработки.

2. Провести теоретические исследования по обоснованию условий электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения с целью выбора и обоснования рациональных технологических параметров обработки.

3. Разработать технологическое обеспечение, позволяющее осуществлять электрохимическое микроформообразование на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

4. Разработать комплексную методику получения фасонных поверхностей в заготовках и регистрации форм импульсов тока при электрохимическом микроформообразовании на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

5. Провести экспериментальные исследования для определения рациональных технологических режимов электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения, обеспечивающих увеличение точности и уменьшение шероховатости поверхностей элементов в заготовках.

Методы исследования

Теоретические исследования проводились на основе положений теории электрохимической обработки с использованием математического моделирования. Параметры обработки при электрохимическом микроформообразовании рассчитывались с использованием программных продуктов РТС Matlab, Maple и MS Office 2010. При проведении экспериментальных исследований применялась современная измерительная и регистрирующая аппаратура.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния процесса газонаполнения и нагрева, а также скважности и длительности импульсов напряжения на плотность тока при электрохимическом микроформообразовании на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

2. Технологическая схема для электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

3. Результаты экспериментальных исследований по получению фасонных поверхностей в металлических заготовках и регистрации форм импульсов тока при электрохимическом микроформообразовании на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

4. Рациональные диапазоны изменения технологических режимов для электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

Научная новизна заключается в обосновании условий осуществления электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения для достижения максимальной точности обработки.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

– разработаны рекомендации по выбору технологических параметров (режимов) для реализации процесса ЭХМФО на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения;

– разработано технологическое обеспечение и создано экспериментальное оборудование для ЭХМФО на сверхмалых межэлектродных зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения;

– разработано программное обеспечение для полной автоматизации процесса ЭХМФО на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения;

– на основе разработанной автоматизированной системы для регулирования межэлектродного зазора при электрохимической обработке металлических и полупроводниковых материалов был получен патент на полезную модель;

– отдельные результаты работы использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 150700 «Машиностроение» (профиль «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов»): включены в разделы лекционных курсов ряда дисциплин («Технология и методы обработки концентрированными потоками энергии», «Технология физико-химической обработки металлических и неметаллических материалов», «Физико-химические методы микро- и нанообработки»); применяются при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также при проведении научно-исследовательской работы.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что на основе математического моделирования получена зависимость плотности тока от времени, учитывающая влияние процесса газонаполнения и нагрева электролита, длительности переднего фронта импульсов напряжения и временных параметров пакетов микросекундных импульсов напряжения.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации)» (Тула, 2010, 2011), региональных научно-технических конференциях «Современная электротехнология в промышленности Центра России» (Тула, 2010–2013), Всероссийской научно-технической конференции «Высокие, критические электро- и нанотехнологии» (Тула, 2011, 2012), X Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов» (Тула, 2011, 2012), Международной молодежной конференции (ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. М., 2011, 2013).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 5 печатных работ, в том числе 3 работы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК. Общий объем публикаций 1,5 печ.л., авторский вклад 1,3 печ.л.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка литературы из 104 наименований, 1 приложения; общий объем – 164 страниц машинописного текста, включая 85 рисунков и 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой** главе проведен анализ получаемых микроизделий и их классификации, а также возможных конкурентных методов микроформообразования по сравнению с электрохимической обработкой. Также рассмотрено современное состояние вопроса о применении ЭХМФО на сверхмалых межэлектродных зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения, а также пути повышения точности электрохимического микроформообразования.

Установлено, что микросистемные технологии нашли широкое распространение в медицинской, биомолекулярной, микроэлектронной и авиационной промышленности, в связи с чем существует необходимость в технологическом решении, позволяющем получать микроизделия, размером менее 0,1 мм, с высокой точностью, порядка 1 – 5 мкм, и высоким качеством обработанной поверхности. Существующие классификации микроизделий разделяют такие изделия по различным признакам и не обладают универсальностью. Исходя из этого предложена классификация микроизделий, учитывающая их применяемость, материал и геометрические параметры формообразующих поверхностей и их взаимное расположение.

Определено, что ЭХМФО является наиболее перспективным методом в области изготовления микрообъектов и микроизделий по множеству показателей, таких, как отсутствие износа электрода-инструмента, незначительное влияние на поверхностный слой обрабатываемой поверхности, обеспечение высокой производительности, а также возможность непосредственного управления величиной снимаемого припуска. Также установлено, что в литературе отсутствуют сведения о технологическом обеспечении и рациональных технологических режимах для электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения, позволяющих получать микроизделия с точностью порядка 5 – 15 мкм.

В результате анализа научно-технической литературы установлено, что для увеличения точности МЭХО необходимо уменьшение величины межэлектродного зазора до 1 – 20 мкм одновременно с ограничением вводимой в МЭЗ энергии за счет использования импульсов напряжения длительностью $T_{\text{имп}} = 1 \dots 100$ мкс и их пакетирования.

Сделан вывод об актуальности исследования технологических процессов, происходящих при электрохимическом микроформообразовании и разработке технологического оснащения для электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй** главе приведены результаты теоретического исследования электрохимического микроформобразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

Для определения рациональных технологических параметров электрохимического микроформобразования на сверхмалых зазорах с использованием пакетов микросекундных импульсов напряжения и, в частности, для расчета временных характеристик вводимой энергии в МЭЗ предложено использовать коэффициент локализации $K_{л}$, который, в свою очередь, можно описать следующим образом:

$$K_{л} = \frac{E \int_0^t \eta(t) I_1(t) dt}{E \int_0^t \eta(t) I_2(t) dt},$$

где E – электрохимический эквивалент для газа; $\eta(t)$ – зависимость анодного выхода газа по току от времени; $I_1(t)$ – функция, описывающая изменение тока в электролизере во времени на меньшем межэлектродном зазоре; $I_2(t)$ – функция, описывающая изменение тока в электролизере во времени на большем межэлектродном зазоре.

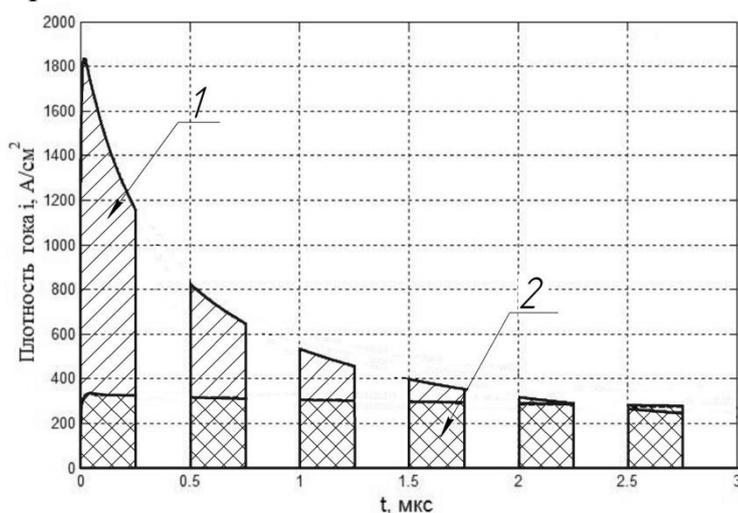


Рис. 1. Соотношение площадей импульсов тока:

- 1 - импульсы тока для $s = 5$ мкм;
- 2 - импульсы тока для $s = 20$ мкм

$$K_{л} = \frac{\sum S_{имп1}}{\sum S_{имп2}}$$

В связи с тем, что расчёт площади фигуры для каждого импульса в пакете довольно трудоемкая задача, было предложено для определения коэффициента локализации использовать огибающие кривые по максимумам отдельных импульсов тока (рис. 2).

Тогда для определения коэффициента локализации возможно использовать следующее соотношение:

$$K_{л} = \frac{S_1 \cdot D_1}{S_2 \cdot D_2},$$

Учитывая, что определённый интеграл является площадью части графика функции в пределах интегрирования, можно утверждать, что коэффициент локализации можно найти из соотношения площадей под кривыми функции тока от времени (рис. 1).

В таком случае коэффициент локализации определится как соотношение сумм площадей импульсов тока для двух различных межэлектродных зазоров:

где S_1 и S_2 – площади под огибающими кривыми по максимумам импульсов тока в пакете; D_1 и D_2 – коэффициенты заполнения пакетов импульсами тока.

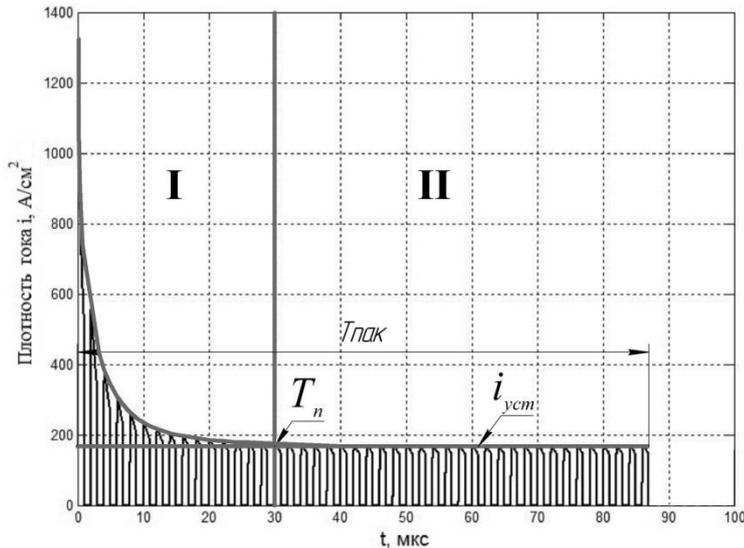


Рис. 2. Определение перехода величины плотности тока в пакете импульсов в область установившихся значений: I – зона обработки с высокой точностью; II – зона обработки с высокой производительностью; $i_{уст}$ – установившееся значение плотности тока в пакете; T_n – точка перегиба; $T_{пак}$ – длительность пакета импульсов тока в пакете

Обоснована возможность использования точек перегиба огибающих кривых для определения перехода плотности тока в пакете в диапазон установившихся значений $i_{уст}$ и соответственно переход электрохимического микроформобразования из области достижения высокой точности I в область высокой производительности II.

Отдельно проанализированы лимитирующие факторы и разработана соответствующая математическая модель ЭХМФО на сверхмалых МЭЗ с применением пакетов микросекундных импульсов напря-

жения, которая учитывает нагрев и газонаполнение электролита, а также импульсно-циклический характер энергетического воздействия на электрохимическую ячейку. В результате расчетов получено, что нагрев электролита до температуры кипения в МЭЗ, равном 5 мкм, произойдет за $1,7 \cdot 10^{-5}$ с, в то время как для зазора величиной 50 мкм это время составит $1,7 \cdot 10^{-3}$ с. Особое внимание уделено объемной доле газа в электролите. В частности, рассмотрены вопросы скорости газонаполнения, которая в математических моделях В.В. Любимова и С.Н. Веневцевой принята постоянной, что не соответствует действительности. Это связано с пропорциональной зависимостью скорости газонаполнения электролита от плотности тока, которая, в свою очередь, зависит от межэлектродного зазора. Выяснено, что максимальное значение скорости наблюдается при МЭЗ = 5 мкм и составляет 167 мм/с, в то время как при МЭЗ = 100 мкм оно равно 30 мм/с. После всех подстановок была получена система уравнений, описывающая зависимость плотности тока от времени с учетом нагрева и газообразования:

$$\left\{ \begin{array}{l} U(t) = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_\phi}} \right); \\ T(t) = T_0 + \frac{U(t) \cdot i(t) \cdot t}{c_э \cdot \rho_э \cdot s} \leq 180 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \varepsilon(t) = \frac{i(t) \cdot t \cdot k_n \cdot R_n \cdot \left(\frac{U(t) \cdot i(t) \cdot t}{c_э \cdot \rho_э \cdot s} + T_0 + 273 \right)}{\mu \cdot \rho_э \cdot s} \leq 0,76; \\ \chi(t) = \chi_{18} \cdot [1 + \beta \cdot (T(t))] \cdot (1 - \varepsilon(t))^{1,5}; \\ i(t) = \frac{U(t) \cdot \chi(t)}{s}. \end{array} \right.$$

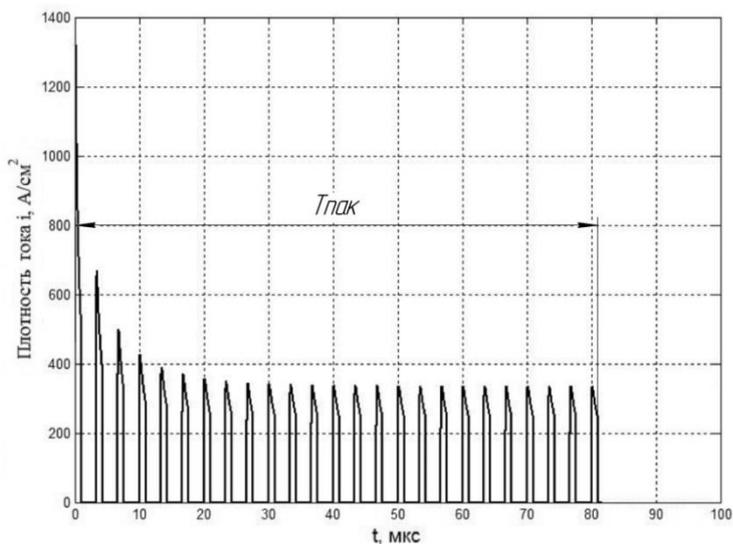


Рис. 3. Зависимость плотности тока от времени при $s = 5$ мкм, $D = 30$ %

В результате расчетов по полученной системе уравнений, описывающей процесс ЭФХМО на сверхмалых межэлектродных зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения и с учетом применения импульсно-циклических схем обработки, были получены зависимости плотности тока от различных условий, например от времени (рис. 3). На основе полученных данных были определены зависимости уста-

новившегося значения плотности тока в пакете от коэффициента заполнения импульсами напряжения и длительности импульсов для различных межэлектродных зазоров. В результате проведенного математического моделирования изменения плотности тока при электрохимическом микроформообразовании можно установить диапазон рациональных параметров обработки. При этом учитывались не только величина установившейся плотности тока, но и точка перегиба, причем выбор длительности импульсов тока и коэффициента заполнения импульсами напряжения определялась относительно величины установившейся плотности тока. В свою очередь, длительность пакета импульсов определялась исходя из точек перегиба огибающей линии по максимумам импульсов тока для выбранных длительности импульсов тока и коэффициента заполнения импульсами напряжения. Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рациональные режимы электрохимического микроформообразования

№ п/п	Режимы	Показатели	
1	МЭЗ, мкм	5 – 10	20 – 50
2	Длительность пакета, мс	40-100	80-160
3	Длительность импульса, мкс	1-10	5-20
4	Коэффициент заполнения импульсами напряжения, %	20-40	30-55

Определено, что для обеспечения наиболее точного электрохимического микроформообразования необходимо использовать МЭЗ величиной менее 5 мкм, Длительность импульсов тока необходимо установить в пределах 1-3 мкм, коэффициент заполнения должен быть не более 30 %, длительность пакетов импульсов тока не должна превышать 50 мкс, после чего необходима промывка межэлектродного зазора для обновления электролита и возвращения к начальным условиям обработки.

Цель третьей главы разработка технологического обеспечения для проведения экспериментальных исследований процесса электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения.

Было показано, что для реализации режимов обработки, определенных в результате математического моделирования, необходимо использовать оборудование, которое позволило бы с высокой точностью позиционировать электрод-инструмент относительно заготовки. С учетом того, что область данного исследования микро-электрохимической обработки лежит в диапазоне сверхмалых МЭЗ, во внимание принимался тот факт, что общая погрешность перемещений ЭИ должна быть на порядок меньше самого межэлектродного зазора.

Проведенный анализ серийно выпускаемого оборудования позволил сделать вывод о невозможности применения готовых технологических решений. В связи с этим возникла потребность в проектировании, изготовлении и сборке из готовых модулей экспериментальной электрохимической установки, удовлетворяющей всем требованиям для проведения необходимого исследования. Анализ предложений различных компаний, занимающихся реализацией программных позиционеров и линейных трансляторов, позволил выбрать оптимальный вариант 3D-стола с учетом соотношения цены, точности перемещений и размеров рабочей зоны, которым и является 3-координатный стол «Вариант Г1 (программный)», производства ООО «МП Реабин». Данный 3-координатный 3D-стол является устройством для высокоточного перемещения шпиндельной головки относительно рабочего стола как вручную (посредством клавиатуры), так и по программе. Работа 3D-стола осуществляется при подключенном PC-совместимом компьютере и блоке управления БУ-03 через программы управления CNC, например, Mach2, ККАМ4 и пр. Для высокоточного перемещения электрода-инструмента и выставления межэлектродного зазора был выбран моторизованный линейный привод 8MT30-50 производства компании «Vicon Standa», так как характеристики данного устройства полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям. В частности приводы серии 8MT173-DCE поставляются с двигателем постоянного тока, включая энкодер, что позволяет отслеживать положение платформы с точностью до 400 нм. Перемещениями управляет контроллер 8DCMC3, подключенный к персональному компьютеру. В комплект привода также входят различные средства для разработки программного обеспечения и кроссплатформенная библиотека для использования встроенных команд и работы с приводом. В результате проведенной работы была разработана система перемещения и позиционирования электрода-инструмента с точностью 400 нм, позволяющая проводить ЭХМФО в мультиплицирующем режиме на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения. Разработаны и изготовлены электрододержатель, электроды-инструменты, рабочая ванна, система подачи электролита в зону обработки. Рабочая область экспериментальной установки составляет 100x200 мм.

Было установлено, что для энергообеспечения электрохимической ячейки с необходимыми характеристиками серийно изготавливаемых источников питания не существует, в связи с чем появилась потребность в разработке и изготовлении такого источника. Для этого была разработана система энергообеспечения электрохимической ячейки на основе коммутирующей схемы с использованием полевых MOSFET-транзисторов, спроектирована и изготовлена печатная плата, проведена отладка оборудования, подобраны необходимые элементы, компоненты и датчики. Функциональная и электрическая схемы разработанного коммутирующего устройства приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

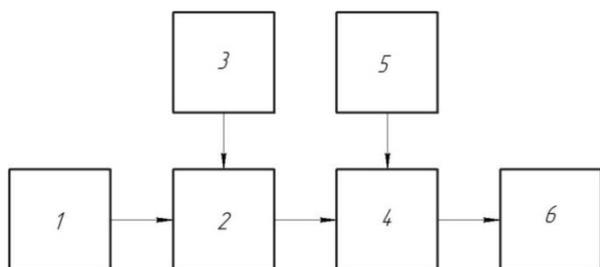


Рис. 4. Функциональная схема источника импульсов напряжения на основе транзистора, работающего в «ключевом» режиме: 1 - задающий генератор импульсов (пакетов импульсов); 2 - драйвер транзистора; 3 - стабилизированный источник питания драйвера; 4 – коммутирующее устройство; 5 - источник питания нагрузки; 6 – нагрузка (электрохимическая ячейка)

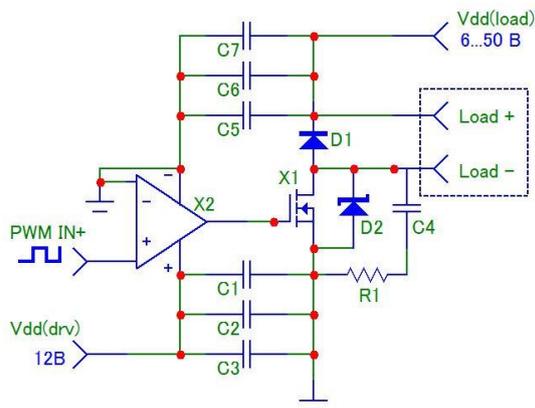


Рис. 5. Электрическая схема коммутирующего устройства на MOSFET-транзисторах: C1...C7 - конденсаторы; R1 - резистор; D1 – диод Шоттке; D2 – супрессор (TVS диод); X1 – MOSFET-транзистор; X2 – драйвер

В результате получено коммутирующее устройство, позволяющее использовать при ЭХМФО импульсы требуемой формы, длительностью от 100 нс, амплитудой от 4 до 16 В, с возможностью регулировки коэффициента заполнения импульсами напряжения от 10 до 90 % и частоты следования до 10 МГц. Также в системе энергообеспечения предусмотрен токовый датчик, позволяющий регистрировать форму импульсов тока с точностью до 40 мА и длительностью от 3 мкс. Общий вид экспериментальной автоматизированной электрохимической установки представлен на рис. 6.

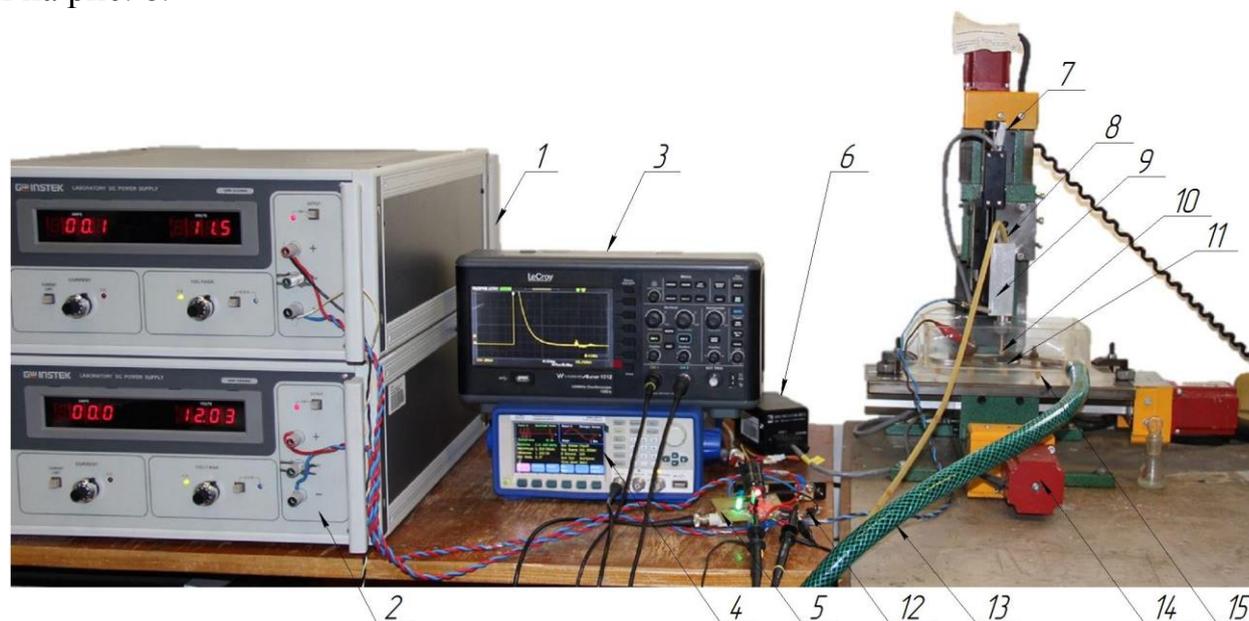


Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки:

- 1 - линейный источник питания нагрузки; 2 - линейный источник питания коммутационного устройства и насоса системы прокачки электролита; 3 - осциллограф; 4 - задающий генератор импульсов; 5 - коммутирующее устройство; 6 - блок управления высокоточным приводом; 7 - высокоточный привод; 8 - магистраль подачи электролита; 9 - электрододержатель; 10 - электрод-инструмент; 11 - заготовка; 12 - датчик тока; 13 - шланг для слива отработанного электролита; 14 - 3D-стол; 15 - рабочая ванна

Разработаны система синхронизации и автоматического управления (САУ) экспериментальной электрохимической установкой, а также соответствующее программное обеспечение. Предложена и реализована схема определения «нулевого»

межэлектродного зазора с точностью до 2 мкм. Разработанная САУ и программное обеспечение позволяют в широком диапазоне регулировать временные параметры процесса электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения. Так, например, возможно задать длительность одного пакета импульсов напряжения от 100 мс, количество пакетов от 1 шт, частоту следования от 30 МГц. На основе разработанной автоматизированной системы для регулирования межэлектродного зазора при электрохимической обработке металлических и полупроводниковых материалов был получен патент на полезную модель.

Четвертая глава посвящена проведению экспериментальных исследований электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения с целью определения диапазонов рациональных технологических режимов и условий обработки для достижения высоких точностных показателей процесса. Для этого разработана комплексная методика проведения экспериментальных исследований для изучения ЭХМФО на сверхмалых зазорах: $s = 1 \dots 20$ мкм с применением пакетов ($T_{\text{пак}} = 100 \dots 500$ мс) микросекундных импульсов напряжения длительностью $T_{\text{имп}} = 0,1 \dots 100$ мкс, включающая в себя методику получения, оцифровки и анализа осциллограмм пакетов импульсов тока, методику электрохимического микроформообразования с последующим анализом точности полостей, методику получения мультиплицированных полостей, регулярных микрорельефов и геометрических элементов в поверхностях заготовок.

В соответствии с разработанной методикой были изготовлены электроды-инструменты с необходимыми геометрическими характеристиками. При этом изготовление ЭИ для регистрации и оцифровки форм импульсов тока проводилось в три этапа: высокоточное точение, получистовое фрезерование боковых граней и получение рабочей части на электроэрозионном проволочно-вырезном станке для формирования необходимой геометрии с заданной шероховатостью (табл. 2).

Таблица 2

Параметры ЭИ для исследования пакетов импульсов тока при ЭХМФО

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал ЭИ	ЛО 70-1 ГОСТ 15527-70
2	Диаметр отверстия для подачи электролита, мм	3
3	Площадь рабочей части, мм ²	20
4	Шероховатость рабочей части Ra, мкм	1,5

Заготовки для проведения экспериментальной электрохимической обработки изготавливались из стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632–72) толщиной 3 мм круглой формы диаметром 50 мм. Обрабатываемые поверхности заготовок подвергались шлифовке шкуркой №200, далее №500, 1000 и 2000. Для снижения шероховатости применялось механическое полирование на фетровом круге с пастой ГОИ №2. Измерение шероховатости поверхности электрода-инструмента и заготовок проводилось на профилографе–профилометре Kosaka Lab. Surfscorder SE 1700α–39.

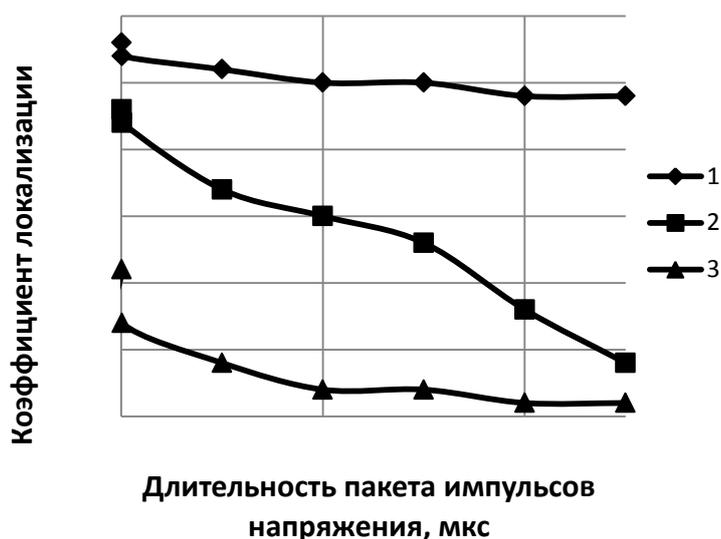


Рис. 8. Зависимость коэффициента локализации для МЭЗ, равного 5 мкм, от длительности пакета импульсов напряжения при различных условиях:

- 1 - $T_{имп} - 1$ мкс, $D - 20\%$; 2 - $T_{имп} - 50$ мкс, $D - 50\%$; 3 - $T_{имп} - 100$ мкс, $D - 80\%$

С учетом полученных данных были уточнены рациональные режимы электрохимического микроформообразования с использованием пакетов микросекундных импульсов напряжения (табл. 3) для высокоточной обработки, при которой $K_d > 3$, и точной обработки с приемлемой производительностью, при которой $3 > K_d > 2$.

В результате проведенных исследований были получены осциллограммы форм импульсов тока для различных режимов электрохимического микроформообразования. После оцифровки и анализа осциллограмм импульсов тока были получены семейства огибающих кривых для различных условий и режимов обработки, на основе которых были получены коэффициенты локализации. В частности, на рис. 8 приведены зависимости коэффициента локализации от длительности пакета импульсов напряжения для различных межэлектродных зазоров и коэффициентов локализации.

Таблица 3

Уточненные режимы ЭХМФО с использованием пакетов микросекундных импульсов напряжения

№ п/п	Параметр	Диапазон значений для МЭЗ, мкм	
		5 – 10	20 – 50
1	Длительность импульсов напряжения, мкс	1 – 10	20 – 50
2	Коэффициент заполнения импульсами напряжения, %	20 – 30	30 – 50
3	Длительность пакетов импульсов напряжения, мс	300 – 500	150 – 300

Данные показатели хорошо согласуются с данными, полученными при математическом моделировании процесса электрохимического микроформообразования. С использованием предложенных уточнённых режимов электрохимического микроформообразования были получены фасонные элементы в поверхности заготовок (рис. 9).

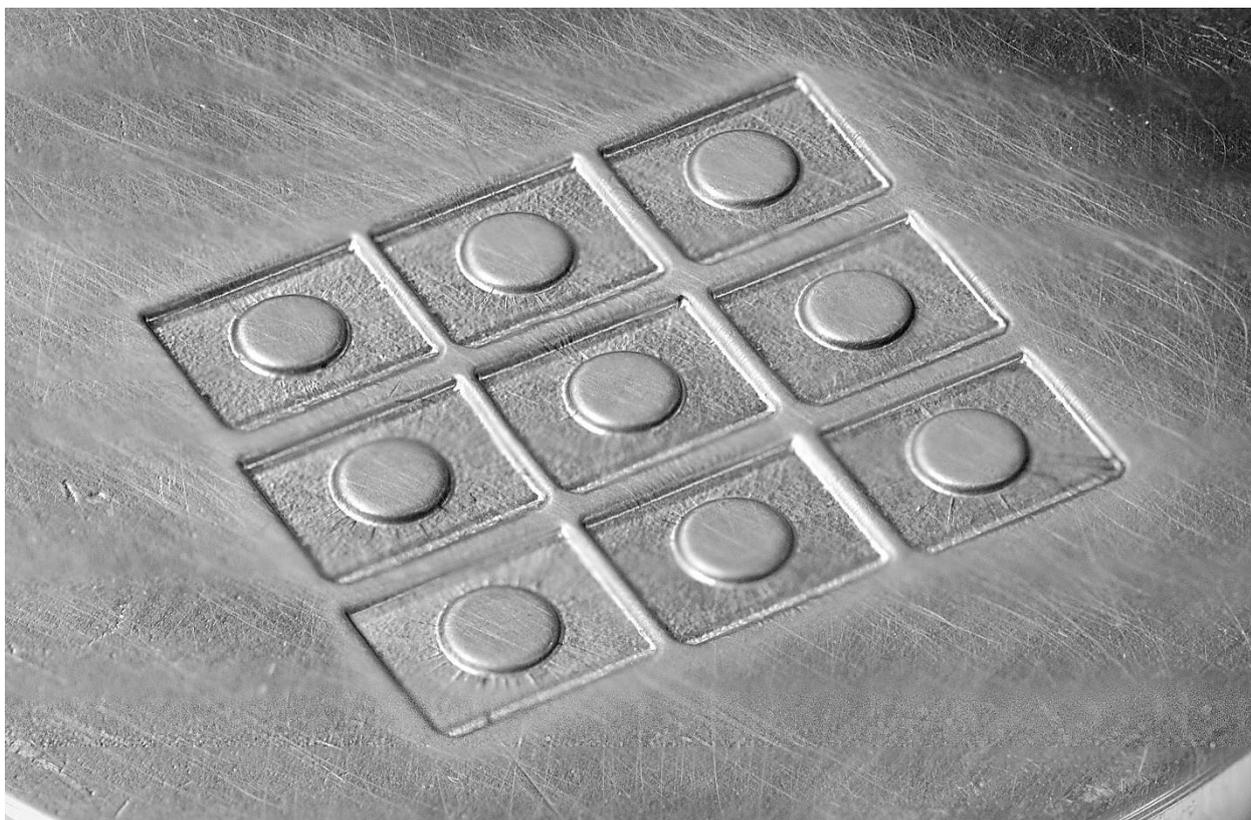


Рис. 9. Фасонные элементы в поверхности заготовки, полученные в мультиплицирующем режиме (МЭЗ 5 мкм, $T_{имп} - 20$ мкс, $D - 50\%$, $T_{пак} - 500$ мс)

Полученные полости наглядно демонстрируют возможности электрохимического микроформообразования на сверхмалых межэлектродных зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения. Разработанная методика и установленные рациональные режимы позволяют получать фасонные элементы с точностью до 5 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача по обоснованию рациональных режимов и разработке технологического обеспечения для осуществления процесса электрохимического микроформообразования на малых и сверхмалых межэлектродных зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов технологического напряжения для получения микрополостей с точностью порядка 5 мкм. Полученные в работе данные могут найти применение в медицинской и биомолекулярной технике, электронике и авиапромышленности. Отдельные результаты работы использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 150700 «Машиностроение» (профиль «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов»): включены в разделы лекционных курсов ряда дисциплин («Технология и методы обработки концентрированными потоками энергии», «Технология физико-химической обработки металлических и неметаллических материалов», «Физико-химические методы микро- и нанообработки»); применяются при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также при проведении научно-исследовательской работы.

1. Проведенный анализ современного состояния микрообработки позволяет определить метод электрохимического микроформообразования как самый перспективный в области изготовления микрообъектов и микроизделий по множеству показателей. Определено, что для увеличения точности ЭХМФО необходимо

уменьшение величины межэлектродного зазора до 1 – 20 мкм. Однако в литературе отсутствуют сведения о технологическом обеспечении и рациональных технологических режимах для ЭХМФО на сверхмалых зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения, позволяющих получать микроизделия с точностью порядка 5 – 15 мкм.

2. Предложено описание процесса ЭХМФО на сверхмалых межэлектродных зазорах с применением пакетов микросекундных импульсов напряжения с помощью огибающих кривых. Обоснована возможность использования точек перегиба огибающих кривых по максимумам импульсов тока в пакетах для определения перехода плотности тока в диапазон установившихся значений. Определено, что использование сверхмалых межэлектродных зазоров накладывает существенные ограничения на количество вводимой в МЭЗ энергии. В частности, при уменьшении МЭЗ с 30 до 1 мкм скорость газонаполнения увеличивается с 58 до 173 мм/с, а скорость нагрева - с 0,2 до 11 °С/мкс. При этом время полного заполнения МЭЗ газом уменьшается с 200 до 50 мкс, а время до закипания электролита уменьшается с 300 до 64 мкс. Исходя из этого определено, что длительность импульсов напряжения должна быть ограничена примерно 100 мкс.

3. Разработано технологическое обеспечение, позволяющее с точностью до 1 мкм устанавливать межэлектродный зазор и использовать импульсы требуемой формы, длительностью от 100 нс, амплитудой от 4 до 16 В, с возможностью регулировки коэффициента заполнения от 10 до 90 % и частоты следования до 10 МГц.

4. Разработана комплексная методика проведения экспериментальных исследований для изучения электрохимического микроформообразования на сверхмалых зазорах: $s = 1 \dots 20$ мкм с применением пакетов ($T_{\text{пак}} = 100 \dots 500$ мс) микросекундных импульсов напряжения длительностью $T_{\text{имп}} = 0,1 \dots 100$ мкс.

5. Проведены экспериментальные исследования формы пакетов импульсов тока, протекающего в электрохимической ячейке и огибающих кривых импульсов тока, установлены рациональные технологические режимы электрохимического микроформообразования на сверхмалых межэлектродных зазорах с применением микросекундных импульсов напряжения. Доказано, что для достижения точности обработки $\Delta < 10$ мкм необходимо использовать межэлектродные зазоры менее 10 мкм, $T_{\text{имп}}$ в диапазоне 1 – 10 мкс, $T_{\text{пак}}$ в диапазоне 300 – 500 мс, D в диапазоне 20 – 30 %.

6. Разработанное технологическое обеспечение и технологические режимы ЭХМФО позволяют получать мультиплицированные полости и геометрические элементы поверхностей в заготовке, расположенные с различной систематизацией, с точностью копирования микрорельефа рабочей части электрода-инструмента Δ до 6 мкм. Это делает возможным применение данного метода обработки при получении микропресс-форм в электронной и авиакосмической промышленности, различных микроизделий, микродатчиков и сенсоров в биомолекулярной и медицинской отраслях промышленности.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. **Веневцев А.Ю.** Экспериментальная установка для электрохимического микроформообразования с применением ультракоротких импульсов напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 8. С. 321 – 326.

2. **Веневцев А.Ю.** Усовершенствование установки для электрохимической обработки полупроводниковых материалов с применением импульсно-циклических схем // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 8. С. 335 – 341.

3. **Любимов В.В., Веневцев А.Ю.** Исследование электрохимического получения микро- и нанорельефов в полупроводниковых материалах с применением импульсно-циклических схем // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 9. Ч.2. С. 358 – 364.

4. **Веневцев А.Ю.** Создание экспериментальной электрохимической установки для получения микро- и нанорельефов импульсами наносекундной длительности // Материалы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «ТЕХНИКА XXI ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ». Тула: ТулГУ 2012. С. 227-230.

5. **Веневцев А.Ю., Веневцева С.Н., Максимов Д.А.** Анализ перспектив применения наносекундных импульсов в размерной электрохимической обработке // XXXVIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ: научные труды Международной молодежной конференции: в 9 т. Москва, 9-13 апреля 2013 г. М.:МАТИ, 2013. Т3. С. 123-125.

Изд.лиц.ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать

Формат бумаги 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,2 Уч. изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ

Тулльский государственный университет. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95.