

На правах рукописи



Красильников Владислав Петрович

**СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ
ОБРАБОТКА ЛОКАЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ–ИНСТРУМЕНТАМИ**

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 Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Любимов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: **Болдырев Александр Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», профессор кафедры
«Технология машиностроения»

Силкин Сергей Андрисович,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Костромской
государственный университет»,
доцент кафедры «Химия»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический
университет»

Защита диссертации состоится «29» июня 2021 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, 92 (9–101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:
http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Krasilnikov_VP

Автореферат разослан «28» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В настоящее время существует необходимость в изготовлении различных микроизделий размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Одной из основных проблем при изготовлении таких изделий является создание микроэлементов (микропазов, микровыступов и т.д.) и микрорельефа на поверхности труднообрабатываемых материалов.

Сканирующая микроэлектрохимическая размерная обработка является перспективным методом создания микроэлементов и микроизделий по ряду причин: отсутствие износа инструмента, отсутствие термического влияния на заготовку, независимость от механических свойств обрабатываемого материала.

При сканирующей микроэлектрохимической размерной обработке локальными электродами-инструментами наибольшее влияние на выходные параметры процесса (точность, качество, производительность) оказывают скорость и траектория перемещения электрода-инструмента, его торцевая площадь, параметры наносекундных импульсов. Однако влияние этих параметров изучено недостаточно. Большинство исследований являются экспериментальными, что приводит к большим временным и трудовым затратам, поэтому наиболее эффективными являются теоретические исследования процесса. Это позволит снизить трудоемкость и затраты на проектирование технологических операций сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки.

Таким образом, разработка математического описания процесса, позволяющего прогнозировать форму и размеры получаемых поверхностей, также позволяющего осуществлять подбор режимов реализации процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки, является **актуальной задачей**.

Цель работы. Целью данной работы является обоснование условий и технологических параметров сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки материалов локальными электродами-инструментами.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Проведение анализа современного состояния микроэлектрохимической обработки.

2. Проведение теоретического исследования сканирующей микроэлектрохимической обработки с целью определения рациональных режимов формообразования, а именно скорости перемещения инструмента и параметров импульсов напряжения.

3. Разработка методики проведения экспериментальных исследований процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами.

4. Проектирование технологического оборудования для реализации процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами.

5. Проведение экспериментальных исследований с целью определения оптимальных режимов сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились с использованием основных положений электрохимической обработки и математического моделирования. Математическое моделирование проводилось в программных обеспечениях Comsol Multiphysics 5.3, SciLab, MS Office 2010. Для проведения экспериментальных исследований использовалась спроектированная установка и современная измерительная и регистрирующая аппаратура (профилограф-профилометр KosakaLab SurfCorder 1700α, оптический микроскоп БМИ-1Ц, генератор сигналов произвольной формы Agilent 33521A, осциллограф Lecroy WaveAce 1012).

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель изменения обрабатываемой поверхности.
2. Модель изменения плотности тока, учитывающая влияние скорости перемещения локального электрода-инструмента на температуру и газосодержание в электролите.
3. Модель изменения плотности тока, учитывающая влияние длительности переднего фронта импульсов на токи заряжения и разряжения двойного электрического слоя.
4. Результаты экспериментальных исследований влияния скорости перемещения локального электрода-инструмента на шероховатость и производительность получаемых поверхностей.
5. Рациональные диапазоны изменения технологических параметров сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами.
6. Технологическая схема для реализации процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальным электродом-инструментом.

Научная новизна заключается в обосновании диапазонов скоростей перемещения локального электрода-инструмента, длительностей импульсов напряжения в нано- и микросекундном диапазоне, соотношения площадей рабочей части локального электрода-инструмента и обрабатываемой поверхности при сканирующей микроэлектрохимической обработке локальными электродами-инструментами.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработано экспериментальное оборудование для осуществления процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальным электродом-инструментом.
- на основе проведенных экспериментальных исследований даны рекомендации по выбору технологических параметров сканирующей микроэлектрохимической обработки, а именно, скорости перемещения инструмента.
- разработана методика получения электродов-инструментов и заготовок с шероховатостью R_a менее 100 нм и плоскостностью менее 3 мкм на 10 мм.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что на основе математического исследования получены результаты по изменению формы обрабатываемой поверхности, что позволяет производить подбор оптимальной траектории перемещения и формы поперечного сечения локального электрода-инструмента. Получены данные о температуре и газосодержании в межэлектродном зазоре, на основе чего можно дать рекомендации по выбору рациональных скоростей перемещения локального электрода-инструмента.

Получены результаты по влиянию параметров импульсов напряжения на процесс микроэлектрохимической обработки, что позволяет дать рекомендации по оптимальным диапазонам величин длительности импульсов напряжения, длительности переднего и заднего фронтов импульса, скважности их следования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- Региональная научно-техническая конференция «Высокие, критические электро- и нанотехнологии» (2015, 2016, 2020);

- Научно-практическая конференция «Молодежные инновации» (Тула, 2015);

- Всероссийская научно-техническая конференция «Высокие, критические, электро- и нанотехнологии» (Тула 2017, 2019);

- Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности» (Пермь, 2017, 2018, 2019);

- Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 2018, 2019);

- XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Санкт-Петербург, 2019);

- Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (Сочи, 2019).

Публикации. По результатам проведенных исследований было опубликовано 23 печатных работ, в том числе 5 статей в научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science или Scopus, 3 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК РФ, 3 статьи в базе данных РИНЦ. 12 докладов и тезисов докладов по материалам конференций различного уровня. Общий объем публикаций 14,77 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы из 164 наименований, одного приложения, общий объем – 136 страниц машинописного текста, включая 50 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой** главе проведен анализ современного состояния микроэлектрохимической размерной обработки (микроЭХРО). Было установлено, что существующие схемы электрохимической обработки (обработка вибрирующим электродом-инструментом, циклическая схема, импульсно-циклическая) имеют существенные недостатки: ухудшение условий промывки межэлектродного зазора (МЭЗ), высокая вероятность коротких замыканий, использование мощных источников питания, низкая общая производительность процесса. В результате анализа получено, что для дальнейшего развития микроЭХРО целесообразно применение технологической схемы сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами (ЭИ).

Проведен анализ физико-химических процессов при микроэлектрохимической размерной обработке, направлений

совершенствования процесса, анализ технологического оснащения при сканирующей микроэлектрохимической размерной обработке локальными электродами-инструментами.

Сделан вывод об актуальности разработки теоретического описания процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй** главе разработано теоретическое описание процесса сканирующей микроЭХРО локальным ЭИ с учетом изменения поверхности заготовки, исследовано влияние скорости перемещения локального ЭИ на процесс микроЭХРО, исследован процесс микроЭХРО при наносекундных длительностях импульсов напряжения. Выполнение теоретического исследования необходимо для проектирования операции микроЭХРО и определения рациональных режимов процесса.

Были подвергнуты анализу возможные траектории перемещения локальных электродов-инструментов (рис. 1).

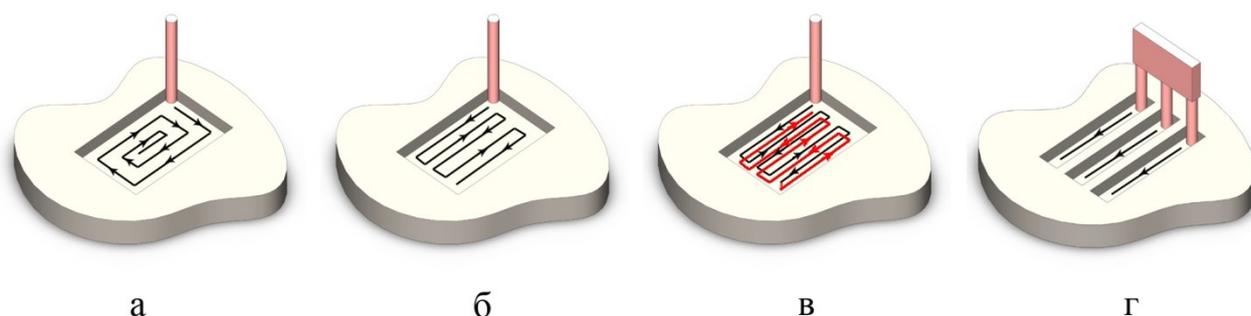


Рис. 1. Траектории перемещения локального электрода-инструмента: а – путевая схема; б – схема сканирования; в – одновременное или послойное удаление припуска; г – матричное удаление припуска

Разработана схема моделирования сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальным электродом-инструментом (рис. 2), позволяющая прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности. Для моделирования обработки использовалась модель идеального процесса, не учитывающая концентрационные изменения в растворе электролита.

Изменение формы обрабатываемой поверхности характеризуется законом Фарадея:

$$\frac{d\Gamma_a}{dt} = \eta \varepsilon_V i = -\eta \varepsilon_V \chi \frac{\partial \varphi}{\partial n} n \quad (1)$$

где $\Gamma_a = [x_a(l, t) y_a(l, t)]$ – вектор-функция, задающая обрабатываемую поверхность; $x_a(l, t) y_a(l, t)$ – координаты точки на обрабатываемой поверхности; l – натуральный параметр обрабатываемой поверхности; t – время; η – выход по току; ε_V – объемный электрохимический эквивалент обрабатываемого материала; n – единичный вектор внешней нормали к поверхности заготовки.

Текущее положение электрода-инструмента в процессе обработки можно характеризовать положением его центра $[x_0(t), y_0(t)]$ и углом поворота $\alpha_n(t)$ относительно центра (рис. 2).

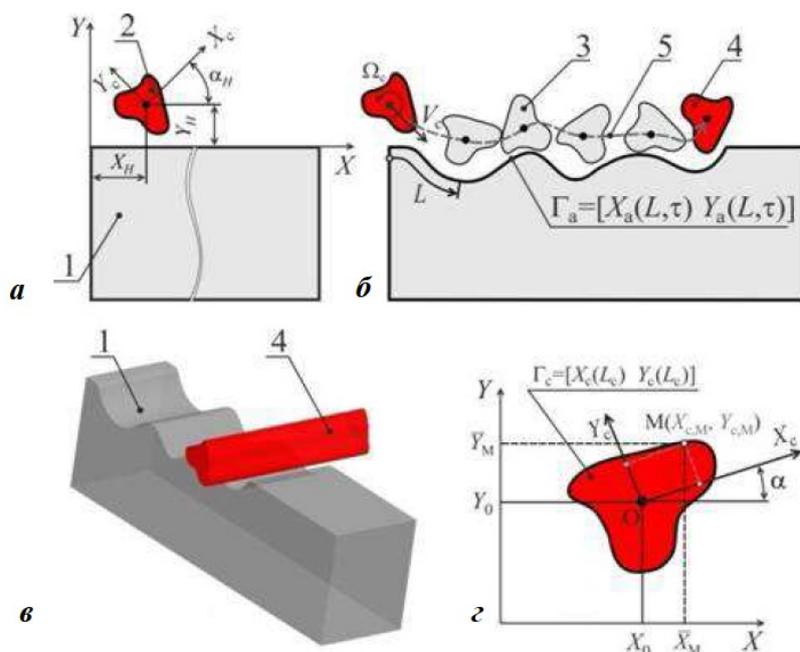


Рис. 2. Схема микроэлектрохимической размерной обработки локальным электродом-инструментом: (а) – электрод-инструмент и обрабатываемая заготовка до обработки, (б, в) – электрод-инструмент и обрабатываемая заготовка в процессе обработки, (г) – взаимосвязь координат точек поверхности электрода-инструмента в локальной и глобальной системах координат; 1 – обрабатываемая заготовка (анод), 2,3, 4 – электрод-инструмент в начальном, промежуточном и конечном положении, соответственно, 5 – траектория

Принимая, что проекции линейного перемещения центра ЭИ на координатные оси Ox и Oy равны $v_{c,x}(t)$ и $v_{c,y}(t)$, соответственно, а угловая скорость равна $\omega_c(t)$, текущее положение ЭИ может быть определено с использованием следующих уравнений:

$$\frac{dx_0}{dt} = v_{c,x}(t), \quad \frac{dy_0}{dt} = v_{c,y}(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega_c(t) \quad (3)$$

Начальное положение ЭИ будем задавать следующим образом:

$$x_0(0) = x_H, \quad y_0(0) = y_H, \quad \alpha(0) = \alpha_H \quad (4)$$

Геометрию поперечного сечения непрофилированного электрода-инструмента будем задавать параметрически $\Gamma_c = [x_c(l_c, t), y_c(l_c, t)]$ в системе координат $x_c - y_c$, связанной с электродом-инструментом (рис. 2 г). В глобальной системе координат, связанной с обрабатываемой заготовкой, координаты точек поверхности ЭИ можно определить с использованием следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \bar{x}(l_c, t) &= x_0(t) + x_c(l_c) \cos[\alpha(t)] - y_c(l_c) \sin[\alpha(t)] \\ \bar{y}(l_c, t) &= y_0(t) + x_c(l_c) \sin[\alpha(t)] + y_c(l_c) \cos[\alpha(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

где \bar{x}, \bar{y} – координаты точек поверхности инструмента в глобальной системе $x - y$.

Для удобства решения и анализа полученных результатов математическая модель была приведена к безразмерному виду. В качестве единицы длины был выбран диаметр описанной окружности для поперечного сечения электрода-инструмента ($d_{ЭИ}$), в качестве единицы электрического потенциала –

характерное значение технологического напряжения (U^*), а в качестве единицы скорости – характерное значение скорости перемещения ЭИ (v^*):

$$X = \frac{x}{d_{ЭИ}}, Y = \frac{y}{d_{ЭИ}}, X_c = \frac{x_c}{d_{ЭИ}}, Y_c = \frac{y_c}{d_{ЭИ}}, L_a = \frac{l_a}{d_{ЭИ}}, L_c = \frac{l_c}{d_{ЭИ}} \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{\varphi}{U^*}, I = \frac{d_{ЭИ}}{\chi U^*} i, V_c = \frac{v_c}{v^*}, \tau = \frac{v^*}{d_{ЭИ}} t, \Omega_c = \frac{d_{ЭИ}}{v^*} \omega_c$$

где X, Y – безразмерные координаты; Φ – безразмерный потенциал I – безразмерная плотность тока; \bar{V}_c – безразмерная скорость перемещения инструмента; τ – безразмерное время; Ω_c – безразмерная угловая скорость ЭИ.

Математическая модель:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\Phi) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dX_a}{d\tau} = \eta S_y \frac{\partial \Phi}{\partial X}, \frac{dY_a}{d\tau} = \eta S_y \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \quad (8)$$

$$\frac{dX_0}{d\tau} = V_{c,x}(\tau), \frac{dY_0}{d\tau} = V_{c,y}(\tau), \frac{d\alpha}{d\tau} = \Omega_c(\tau) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}(L_c, \tau) &= X_0(\tau) + X_c(L_c) \cos[\alpha(\tau)] - Y_c(L_c) \sin[\alpha(\tau)] \\ \bar{Y}(L_c, \tau) &= Y_0(\tau) + X_c(L_c) \sin[\alpha(\tau)] + Y_c(L_c) \cos[\alpha(\tau)] \end{aligned} \quad (10)$$

где S_y – это безразмерный параметр, который характеризует условия проведения процесса.

Граничные условия для решения системы уравнений (7) – (10) будут иметь следующий вид:

$$Y_a(L_0, 0) = 0, X_0(0) = X_H, Y_0(0) = Y_H, \alpha(0) = \alpha_H \quad (11)$$

$$\Phi|_{\text{анод}} = \bar{U}(\tau) - W a_a \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) \Big|_{\text{анод}}$$

$$\Phi|_{\text{катод}} = -W a_c \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) \Big|_{\text{катод}} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) \Big|_{\text{изолятор}} = 0$$

где $W a_a = \frac{\chi}{d_{ЭИ}} \left(\frac{\partial \eta}{\partial i} \right) \Big|_a$ и $W a_c = \frac{\chi}{d_{ЭИ}} \left(\frac{\partial \eta}{\partial i} \right) \Big|_c$ – числа Вагнера, учитывающие поляризации анода и катода, соответственно; \bar{U} – безразмерное значение напряжения, приложенного к электродам.

Для каждого шага по времени:

1) Рассчитывается распределение электрического поля (при геометрии электродов, соответствующих началу шага) в результате численного решения уравнения Лапласа (7) с граничными условиями;

2) Определяется новая форма обрабатываемой поверхности (при распределении плотности тока, соответствующей началу шага):

$$X_a^{n+1} = X_a^n + \Delta \tau \eta^n S_y \frac{\partial \Phi^n}{\partial X}, Y_a^{n+1} = Y_a^n + \Delta \tau \eta^n S_y \frac{\partial \Phi^n}{\partial Y} \quad (13)$$

3) Определяется новое положение центра ЭИ:

$$X_0^{n+1} = X_0^n + \Delta \tau V_{c,x}(\tau^n), Y_0^{n+1} = Y_0^n + \Delta \tau V_{c,y}(\tau^n) \quad (14)$$

4) Определяется новое значение угла поворота ЭИ:

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \Delta \tau \Omega_c^n \quad (15)$$

В соотношениях (13) – (15) верхний индекс n обозначает номер шага по времени, а $\Delta\tau$ - обозначает величину шага по времени.

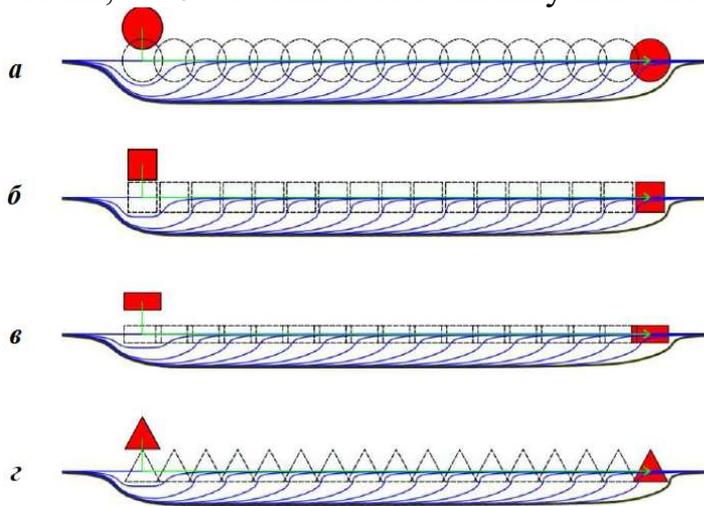


Рис. 3. Результаты моделирования микроэлектрохимической размерной обработки при линейном перемещении электрода – инструмента, имеющего различную форму поперечного сечения: а – круглая; б – квадратная; в – прямоугольная; г – треугольная

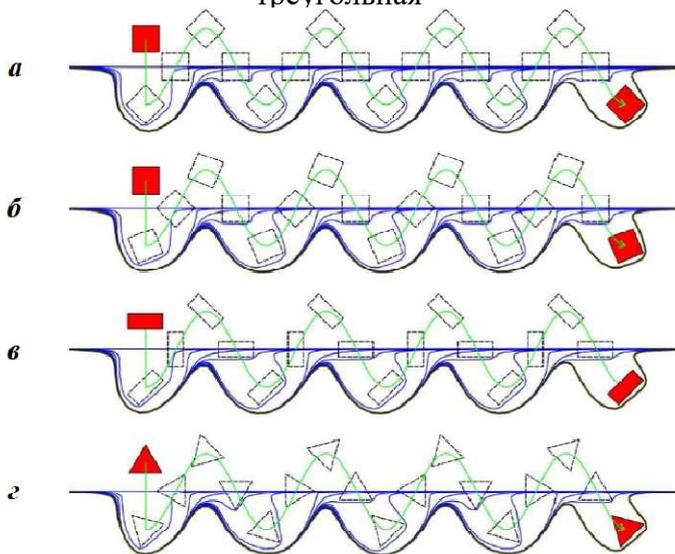


Рис. 4. Результаты моделирования микроэлектрохимической размерной обработки при линейном перемещении электрода – инструмента, имеющего различную форму поперечного сечения, с поперечной вибрацией: а, б – квадратная; в – прямоугольная; г – треугольная

В качестве исходных данных были приняты следующие значения параметров процесса: $\eta=1$, $S_y = 0.1$, $V_c = 1$, $\bar{U} = 1$, $Wa_a = Wa_c = 0$, $\Delta\tau = \pi/160$. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования предложенных моделей и методов для проектирования и оптимизирования процессов микроэлектрохимической обработки, в том числе и при получении поверхностей с микро – и нанопараметрами.

В результате были получены глубина и форма обрабатываемой поверхности в зависимости от различной траектории перемещения и формы поперечного сечения электрода-инструмента (рис. 3 -4).

При моделировании были приняты следующие значения параметров: безразмерный установившийся межэлектродный зазор принимался равным от 0,05 до 0,5, величина шага по безразмерному времени выбиралась из условия обеспечения устойчивости и точности численного решения и составляла, как правило, от 0,002 до 0,02. На исходных поверхностях заготовки и ЭИ задавалось от 20 до 100 линейных граничных элементов. В процессе моделирования расстояние между узлами сетки граничных элементов изменялось – увеличивалось на выпуклых участках обрабатываемой поверхности и уменьшалось на вогнутых участках.

Для обеспечения удовлетворительной точности численного решения и сокращения объема вычислений в процессе моделирования осуществлялась адаптация сетки граничных элементов.

Для нахождения зависимости температуры электролита и степени газосодержания в межэлектродном зазоре во время обработки от скорости перемещения электрода-инструмента необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 + \frac{K_g \cdot i_a \cdot L}{v_{эл} \cdot s} \\ K_g = \frac{K_H \cdot R \cdot T}{\mu \cdot p_{эл}} \\ \chi = \chi_0 \cdot [1 + \beta \cdot (T - T_0)] \cdot (1 - \xi)^{1.5} \\ T = T_0 + k \cdot \frac{U \cdot i_a \cdot L}{c_{эл} \cdot \rho_{эл} \cdot v_{эл} \cdot s} \\ i_a = \frac{\chi \cdot U}{s} \end{cases}$$

На первом этапе моделирования необходимо определить значения давления электролита и скорость его течения в МЭЗ при различных скоростях перемещения ЭИ и величинах межэлектродного зазора. Для этого решалось уравнение Навье-Стокса в безразмерном виде для расчетной области, представленной на рис.5:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \tau} + \left(V \cdot \frac{\partial V}{\partial \bar{X}} + U \cdot \frac{\partial V}{\partial \bar{Y}} \right) &= \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \bar{X}^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial \bar{Y}^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial \bar{X}} \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} + \left(V \cdot \frac{\partial U}{\partial \bar{X}} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial \bar{Y}} \right) &= \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \bar{X}^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \bar{Y}^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial \bar{Y}} \end{aligned} \quad (16)$$

где $\bar{P} = \frac{P}{\rho \cdot U_0^2}$ - безразмерное давление, $\text{Re} = \frac{\rho D \cdot U_0}{\mu}$ - число Рейнольдса, V, U - безразмерная скорость течения электролита.

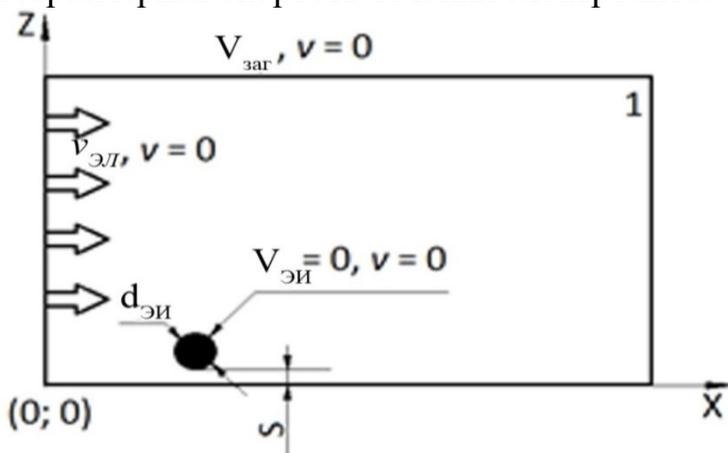


Рис. 5. Геометрия расчетной области: 1 – электролит; $v_{эл}$ – скорость течения электролита, $V_{заг}$ – скорость перемещения заготовки, $V_{ЭИ}$ – скорость движения электрода-инструмента, $d_{ЭИ}$ – диаметр электрода-инструмента, s – межэлектродный зазор, ν – кинематическая вязкость электролита

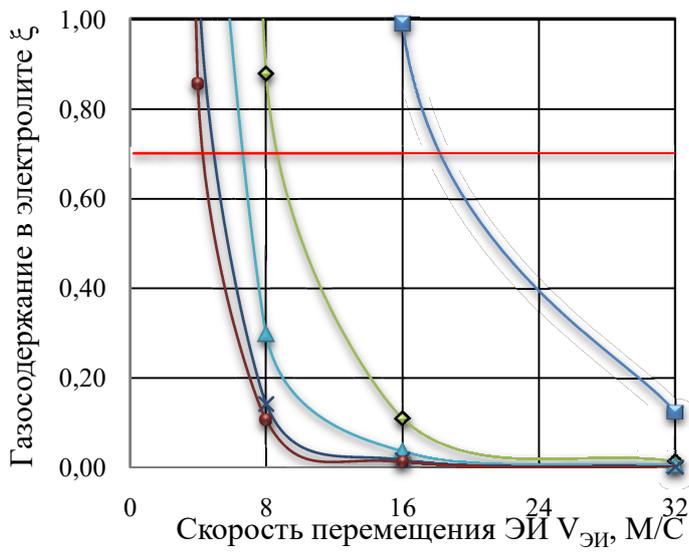
При моделировании вводились следующие допущения: электролит – ньютоновская жидкость, вязкость постоянна, скольжение на границе электрод-электролит отсутствует, влиянием поверхностного слоя можно пренебречь, электролит является несжимаемой жидкостью.

Результаты моделирования представлены на рис. 6-8.

Таким образом, скорость перемещения ЭИ определяют из условия достижения предельной степени газосодержания электролита на выходе из МЭЗ:

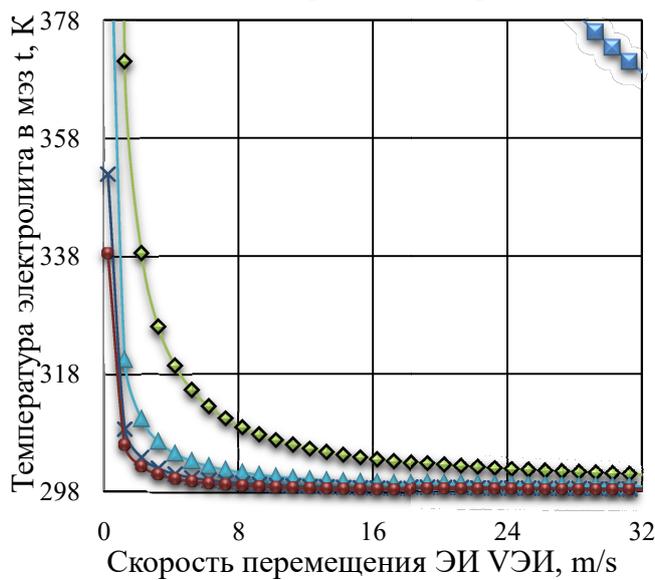
$$v_{ЭИ} \geq \frac{K_g \cdot (U - \Delta u) \cdot \chi \cdot L}{s^2 \cdot \xi_{кр}}, \quad (17)$$

где $\xi_{кр}$ – предельное значение



—■ 5 μm —◇ 25 μm —▲ 45 μm —× 65 μm —● 75 μm

Рис. 6. Зависимость объемного газосодержания от скорости перемещения электрода-инструмента при различных межэлектродных зазорах

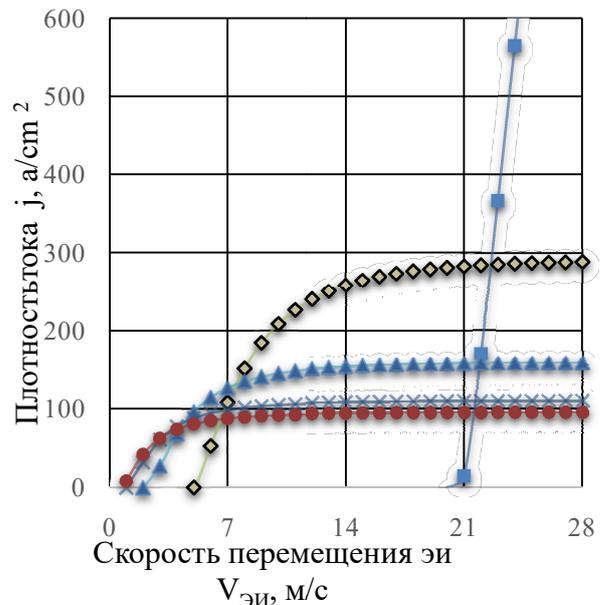


—■ 5 μm —◇ 25 μm —▲ 45 μm
—× 65 μm —● 75 μm

Рис. 7. Зависимость температуры электролита от скорости перемещения электрода-инструмента при различных межэлектродных зазорах

газосодержания в электролите.

Также было выявлено, что для каждой величины МЭЗ существует диапазон рациональных скоростей перемещения ЭИ, которые обеспечивают стабильное протекание процесса микроЭХРО, за счет выполнения условий по эвакуации продуктов ($\xi \leq \xi_{кр}$, $T < T_{кр}$), а также повышение производительности обработки при увеличении скорости перемещения ЭИ.



—■ 5 μm —◇ 25 μm —▲ 45 μm
—× 65 μm —● 75 μm

Рис. 8. Зависимость плотности тока от скорости перемещения электрода-инструмента при различных межэлектродных зазорах

Таблица 1

Рациональные скорости перемещения электрода-инструмента при различных величинах межэлектродного зазора

Межэлектродный зазор, мкм	Скорость перемещения электрода-инструмента, м/с
75	0,5-11
65	1-12

45	2-15
25	4-23
5	20-62

Математическая модель микроЭХРО ультракороткими импульсами представлена следующим дифференциальным уравнением:

$$C_a \frac{d\varphi_a}{dt} + i_{0,a} \left[\exp\left(\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \varphi_a\right) - \exp\left(-\frac{\alpha nF}{RT} \varphi_a\right) \right] = \sigma \frac{U(t) - \varphi_a}{S}. \quad (18)$$

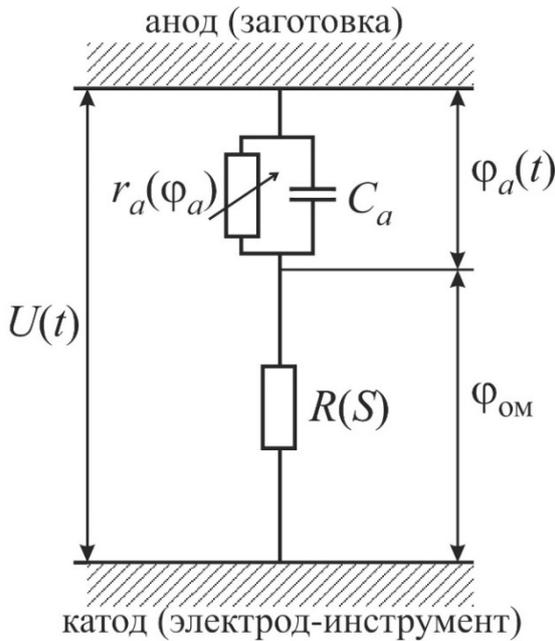


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема микроЭХРО с ультракороткими импульсами с учетом двойного слоя только на аноде (заготовке)

При получении математической модели учитывались омическое сопротивление электролита, емкость двойного электрического слоя (ДЭС) на аноде и сопротивление, обусловленное протеканием электрохимической реакции (рис. 9). Эффектом ДЭС на катоде пренебрегаем и не учитываем его поляризацию.

Начальное условие для уравнения (18) следует задавать в следующем виде:

$$\varphi_a|_{t=0} = \varphi_{a,0}, \quad \varphi_c|_{t=0} = \varphi_{c,0}, \quad (19)$$

Будем считать, что $\alpha=0,5$, $i_0 = i_{0,a} = i_{0,c}$, $C = C_a = C_c$, $\varphi = \varphi_a = \varphi_c$ и $\varphi_0 = \varphi_{a,0} = \varphi_{c,0}$.

В этом случае можно записать:

$$C \frac{d\varphi}{dt} + 2i_0 \sinh(A\varphi) = \sigma \frac{U(t) - p\varphi}{S}, \quad (20)$$

где $A = \frac{nF}{2RT}$ - параметр; $\sinh(A\varphi) = [\exp(A\varphi) - \exp(-A\varphi)]/2$ - гиперболический синус; p - параметр, значение которого равно количеству учитываемых ДЭС.

Часто потенциал электрода имеет значение существенно меньше, чем приложенное напряжение. В этом случае потенциалом электрода в правой части уравнения (20) можно пренебречь. Если, кроме того, пренебречь передним фронтом импульса напряжения, то уравнение (20) можно записать в следующем виде:

$$C \frac{d\varphi}{dt} + 2i_0 \sinh(A\varphi) = i_F^\infty, \quad (21)$$

где $i_F^\infty = \sigma \frac{U}{S}$ - установившееся значение фарадеевской плотности тока.

Аналитическое решение уравнения (21), удовлетворяющее начальному условию (19) имеет следующий вид:

$$\varphi(t) = \frac{1}{A} \ln \left[\frac{1}{2i_0} \left(\tanh \left(\frac{At}{2C} \sqrt{(i_F^\infty)^2 + 4i_0^2} - \operatorname{arctanh} \left(\frac{i_F^\infty - 2i_0 \exp(A\varphi_0)}{\sqrt{(i_F^\infty)^2 + 4i_0^2}} \right) \right) \sqrt{(i_F^\infty)^2 + 4i_0^2} + i_F^\infty \right) \right]. \quad (22)$$

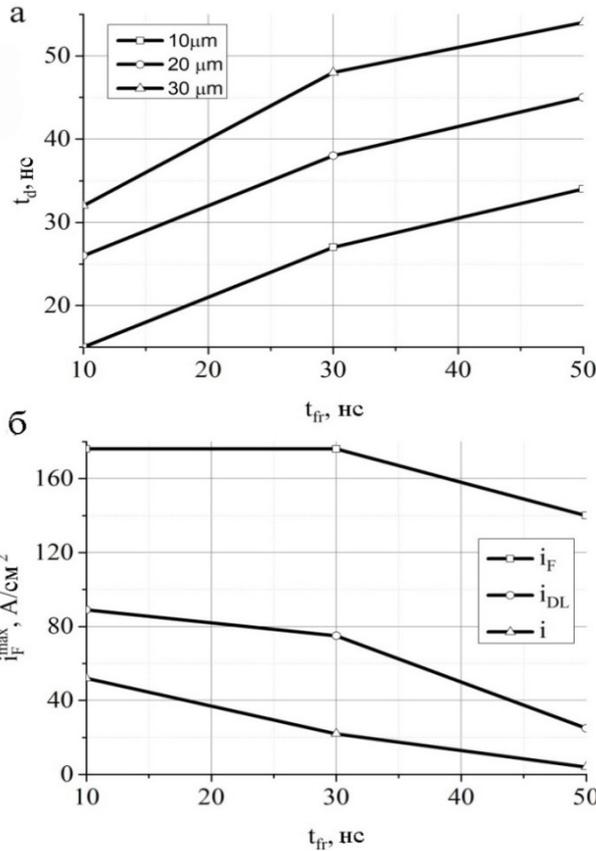


Рис. 10. а – зависимости времени задержки t_d от длительности переднего фронта импульса t_{fr} при различных межэлектродных зазорах S ; б – зависимости амплитуд фарадеевских токов i_F^{\max} от длительности переднего фронта импульса t_{fr} при различных межэлектродных зазорах S

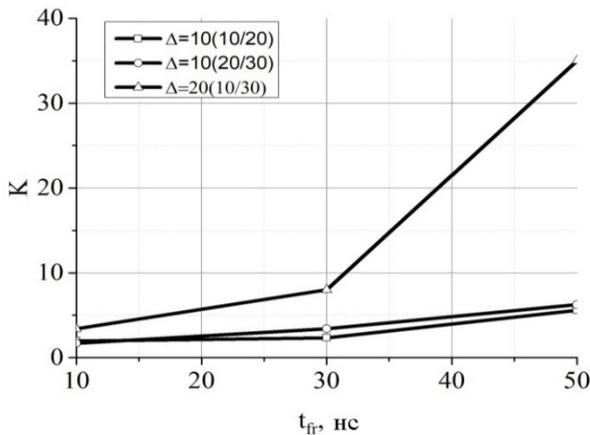


Рис. 11. Зависимость коэффициента локализации K от длительности переднего фронта импульса t_{fr} при различных значениях погрешности Δ

Из уравнения (22) следует, что начальная скорость изменения потенциала ДЭС равна i_F^∞/C , а стационарное значение потенциала после полного заряжения ДЭС (в предположении, что катодной составляющей можно пренебречь) равно $\varphi^\infty = \frac{1}{A} \ln \frac{i_F^\infty}{i_0}$, следует выражение для постоянной времени заряжения ДЭС:

$$\tau = \frac{C}{A \cdot i_F^\infty} * \ln \frac{i_F^\infty}{i_0}. \quad (23)$$

Плотность тока заряжения-разряжения ДЭС определяется следующим образом:

$$i_{DL} = C \frac{d\varphi}{dt}. \quad (24)$$

Плотность тока анодного растворения (фарадеевская плотность тока) во время импульса определяется следующим образом:

$$i_F = i_F^\infty - i_{DL}. \quad (25)$$

Во время паузы плотность тока анодного растворения равна по величине и противоположна по знаку плотности тока разряжения ДЭС:

$$i_F = -i_{DL}. \quad (26)$$

В результате интегрирования плотности тока анодного растворения за период следования импульсов можно определить величину количества электричества, которая пропорциональна величине растворенного материала заготовки:

$$q = \int_0^{t_{nep}} i_F dt, \quad (27)$$

где $t_{nep} = t_p$ - период следования импульсов; t_{off} - длительность паузы.

Производительность процесса можно охарактеризовать средней за период следования импульсов плотностью тока анодного растворения:

$$i_F^{cp} = \frac{q}{t_{nep}}. \quad (28)$$

При моделировании производилось численное решение уравнения (18) при следующих

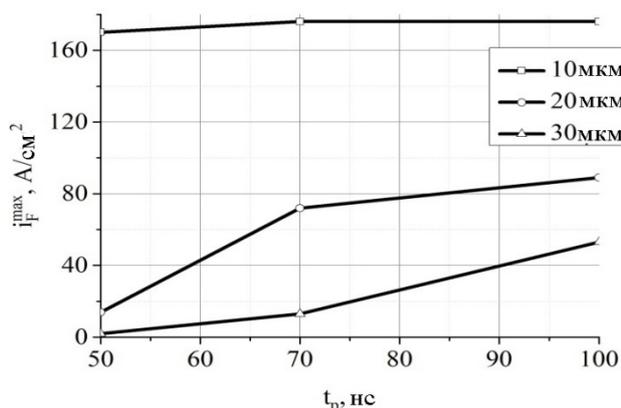


Рис. 12. Зависимости амплитуд фарадеевских токов i_F^{\max} от длительности импульса t_p при различных величинах межэлектродного зазора S

значениях параметров: $\sigma = 5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $U_{\text{имп}} = 4 \text{ В}$, $U_{\text{п}} = 0 \text{ В}$, $t_p = 10 \text{ нс}$, $t_{\text{off}} = 50 \text{ нс}$, $t_d = 2 \text{ нс}$, $\alpha = 0.5$, $n = 2$, $C = 0.2 \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-2}$, $i_0 = 100 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

В результате выявлено влияние длительности переднего фронта импульса тока на время задержки роста фарадеевского тока и его максимальной величины. Увеличение длительности переднего фронта импульса приводит к увеличению времени задержки начала роста фарадеевского тока и уменьшению его максимального значения.

Уменьшение длительности импульса напряжения с 100 до 50 нс приводит к снижению производительности, но положительно влияет на процесс выравнивания исходной погрешности.

Третья глава посвящена разработке методики проведения экспериментальных исследований, методики подготовки образцов и электродов-инструментов, методики оценки полученных экспериментальных результатов.

Были разработаны различные схемы сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами (рис. 13).

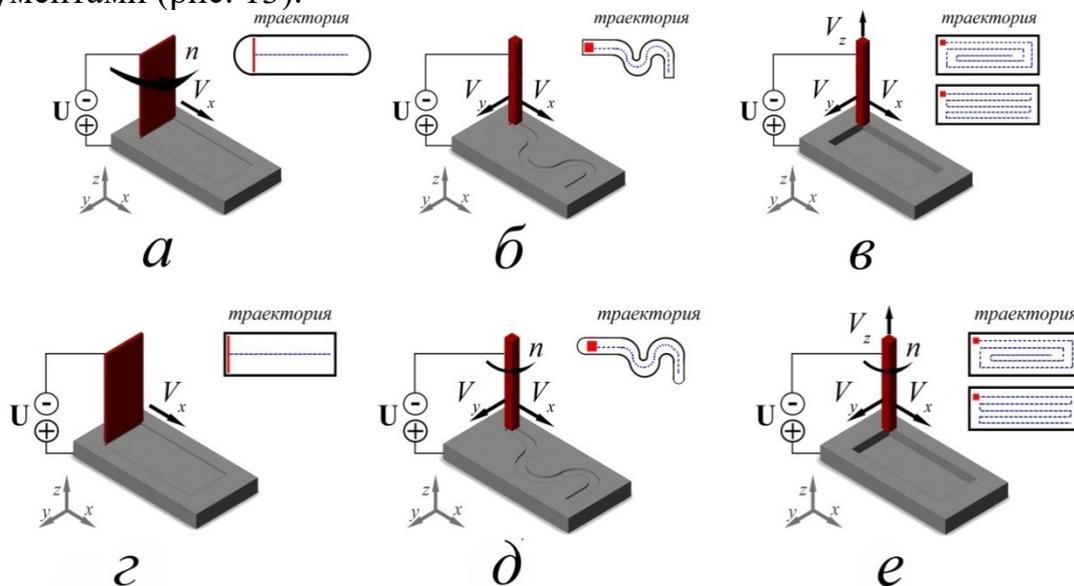


Рис. 13. Схемы электрохимического формообразования: а, д, е – схемы с вращением ЭИ; б, в, г – без вращения ЭИ; а, г – схемы обработки ЭИ-линией; б, д – схема точечным ЭИ по путевой траектории; в, е – схема точечным ЭИ по сканирующей траектории

Для выполнения экспериментальных исследований спроектированные ЭИ изготавливались из ЛО 70-1 ГОСТ 15527-70 и ВЧ ТУ 48-19-57-91.

В результате были получены электроды-инструменты различной конфигурации, представленные на рис. 14.

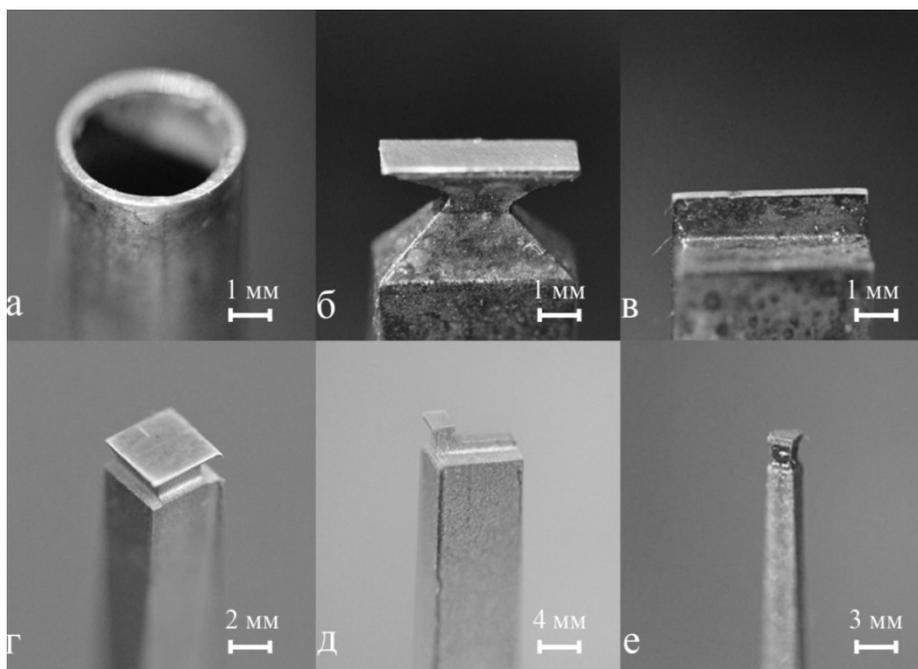


Рис. 14. Electrode-instrument tools: а – трубчатый ЭИ; б – ЭИ-линия с поднутрениями; в – ЭИ-линия без поднутрений; г, д, е – квадратные ЭИ с поднутрениями

В качестве оцениваемых параметров получаемых поверхностей были выбраны:

- шероховатость R_a , мкм
- погрешность Δ , мкм
- производительность, мкм/сек

Шероховатость поверхности R_a измерялась с помощью профилограф-профилометра KosakaLab SurfcoDerSE 1700 α -39. Размеры полученных поверхностей определялись с помощью оптического микроскопа БМИ-1Ц, оснащенного системой электронной индикации перемещения рабочего стола.

Четвертая глава посвящена разработке экспериментального оборудования для осуществления сканирующей микроЭХРО, а также экспериментальным исследованиям процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами.

Из анализа современного оборудования для микроэлектрохимической обработки было выявлено, что для реализации экспериментальных исследований требуется разработка специализированного оборудования. Спроектированное оборудование (рис. 15) включает в себя следующие блоки: система подачи электролита, система перемещений заготовки и инструмента, система формирования рабочих импульсов напряжения.

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены графики зависимости шероховатости поверхности R_a (рис. 16, в), плотности тока (рис. 17, б) и глубины травления (рис. 17, а) от скорости перемещения электрода-инструмента. Шероховатость поверхности до обработки и после представлены на рис. 16, а и б соответственно.

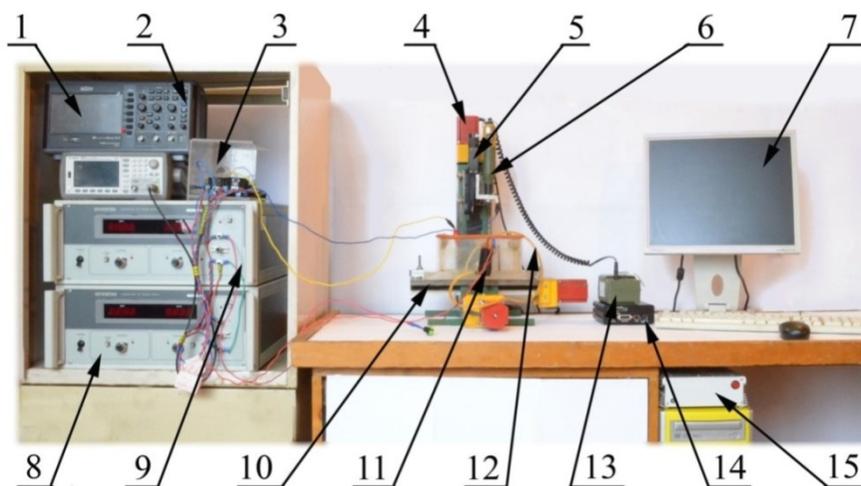


Рис. 15. Разработанное экспериментальное оборудование: 1 – генератор импульсов; 2 – осциллограф; 3 – коммутирующее устройство; 4 – 3-х координатный штатив; 5 – линейный транслятор; 6 – шпиндель; 7 – персональный компьютер; 8 – источник питания постоянного тока электрохимической ячейки; 9 – источник питания постоянного тока; 10 – электрохимическая ячейка; 11 – насос прокачки рабочей жидкости; 12 – магистраль подачи рабочей жидкости; 13 – блок управления шпинделем; 14 – блок управления линейным транслятором; 15 – блок управления 3-х координатным штативом

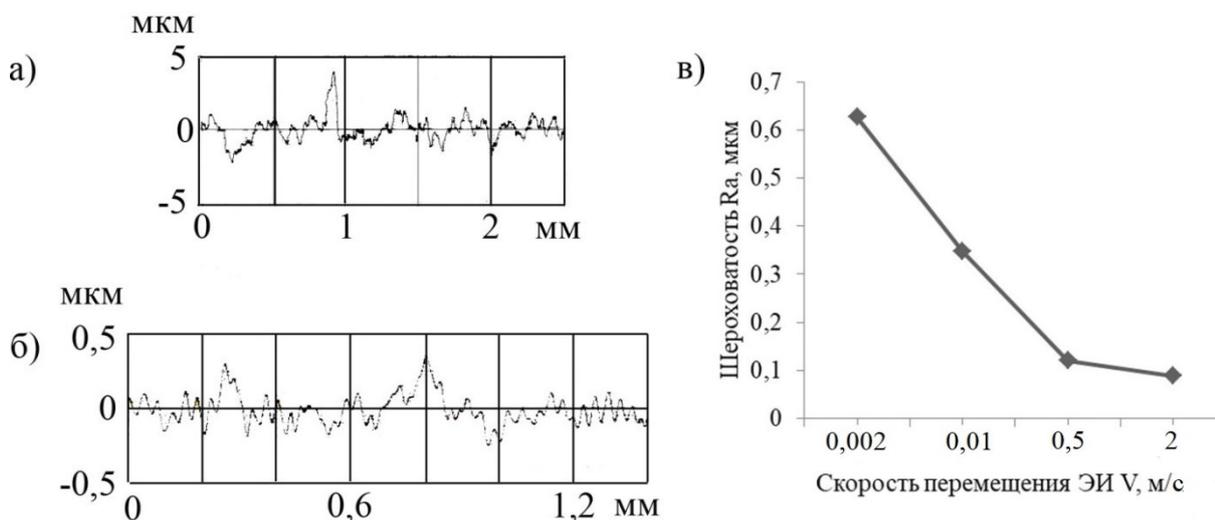


Рис. 16. Профилограммы поверхностей: а) до обработки; б) после сканирующей ЭХРО, скорость инструмента составляла 2 м/с; в) зависимость параметра шероховатости R_a от скорости перемещения электрода-инструмента V .

Из полученных результатов следует, что для сканирующей микроЭХРО в производительном режиме необходимо выбирать меньшие скорости до 0,007 м/с, а для получения точных поверхностей скорости должны превышать 0,5 м/с.

На рис. 18 представлена полость, полученная с помощью сканирующей микроЭХРО локальным электродом-инструментом.

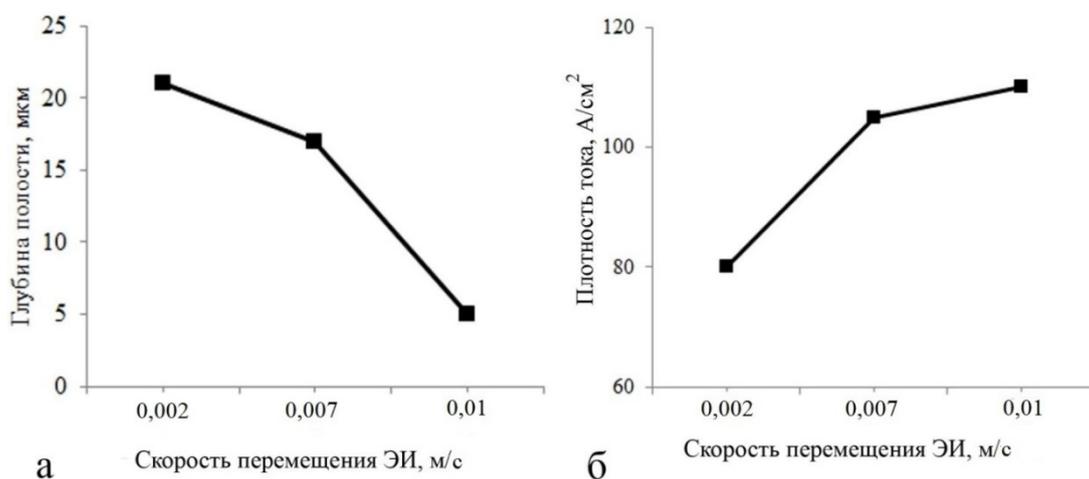


Рис. 17. Графики зависимостей глубины травления за один проход и плотности тока от скорости перемещения электрода-инструмента

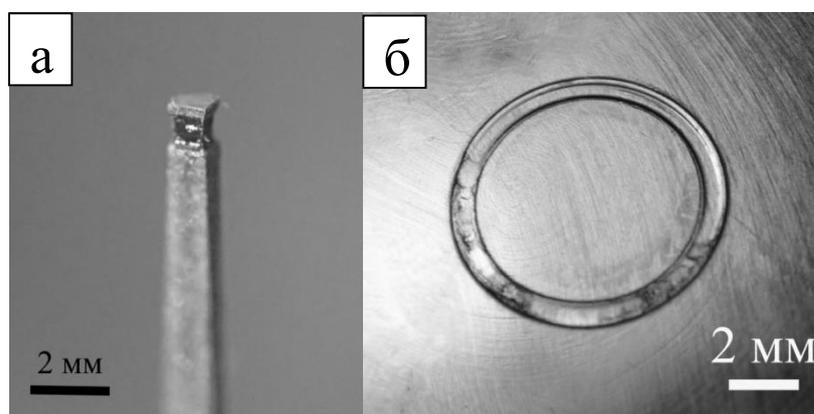


Рис. 18. Электрод-инструмент и полученная поверхность ($V_{ЭИ} = 2$ м/с): а – фотография торцевой части электрода-инструмента; б – фотография полученной полости

Проведенные экспериментальные исследования согласуются с теоретическими исследованиями.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Сканирующая микроэлектрохимическая размерная обработка является перспективным методом создания микроэлементов и микроизделий по ряду причин: отсутствие износа инструмента, отсутствие термического влияния на заготовку, независимость от механических свойств обрабатываемого материала. При сканирующей микроэлектрохимической размерной обработке локальными электродами-инструментами наибольшее влияние на выходные параметры процесса (точность, качество, производительность) оказывают скорость и траектория перемещения электрода-инструмента, его торцевая площадь, параметры наносекундных импульсов. Однако влияние этих параметров изучено недостаточно. Большинство исследований являются экспериментальными, что приводит к большим временным и трудовым затратам, поэтому наиболее эффективными являются теоретические исследования процесса.

2. Разработана схема численного моделирования микроэлектрохимической размерной обработки поверхностей локальным электродом – инструментом, позволяющая прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности. Показана возможность применения предложенной схемы моделирования для различных схем обработки.

3. Определено влияние скорости перемещения локального ЭИ на процесс сканирующей микроЭХРО. Показано, что при увеличении скорости перемещения температура электролита в МЭЗ и газосодержание электролита уменьшаются, а плотность тока увеличивается. Выявлено, что для каждой величины МЭЗ существует диапазон рациональных скоростей перемещения ЭИ, которые обеспечивают стабильное протекание процесса микроЭХРО, за счет выполнения условий по эвакуации продуктов, а также повышение производительности обработки при увеличении скорости перемещения ЭИ.

4. Выявлено влияние длительности переднего фронта импульса тока на время задержки роста фарадеевского тока и его максимальной величины. Увеличение длительности переднего фронта приводит к уменьшению максимального значения фарадеевского тока. Показано изменение эффективности выравнивания исходной погрешности в зависимости от длительности переднего фронта импульса тока. Уменьшение длительности импульса напряжения с 100 до 50 нс приводит к снижению производительности, но положительно влияет на процесс выравнивания исходной погрешности.

5. Разработана методика подготовки образцов для экспериментальных исследований процесса сканирующей микроэлектрохимической обработки из стали X18H10T ГОСТ 5949-75 и электродов-инструментов из ЛО 70-1 ГОСТ 15527-70, ВЧ ТУ 48-19-57-91. Предлагаемая методика позволяет получать образцы с шероховатостью поверхности $R_a = 0,04 \mu\text{м}$ и отклонением от параллельности 3 мкм/10 мм.

6. Разработана методика проведения экспериментальных исследований сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки при скоростях перемещения локального электрода-инструмента в диапазоне 100-800 мм/мин по различным траекториям, а также методика оценки полученных результатов, позволяющая анализировать точность и шероховатость получаемых поверхностей.

7. Спроектировано экспериментальное оборудование для осуществления процесса сканирующей микроэлектрохимической размерной обработки локальными электродами-инструментами. Оборудование включает в себя следующие блоки: система подачи электролита, система перемещений заготовки и инструмента, система формирования рабочих импульсов напряжения.

8. По разработанной методике на спроектированном оборудовании проведены экспериментальные исследования влияния скорости перемещения локального электрода-инструмента на шероховатость получаемых поверхностей, плотность тока, а также глубину травления. Проведенные экспериментальные исследования согласуются с теоретическими исследованиями.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. **Любимов В.В., Красильников В.П. Анализ кинематико-геометрических характеристик размерной электрохимической обработки // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 12. Тула: изд-во ТулГУ, 2018 – С. 265-270.**

2. **Любимов В.В., Волгин В.М., Красильников В.П. Теоретическое исследование параметров импульсов тока при электрохимической обработке с микро- и нанопараметрами // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 2. Тула: изд-во ТулГУ, 2019 – С. 402-410.**

3. **Любимов В.В., Волгин В.М., Красильников В.П. Исследование электрохимической обработки с использованием пакетов импульсов**

напряжения наносекундной длительности // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.10. Тула: изд-во ТулГУ, 2020 – С. 355-363.

4. Lyubimov V.V., Volgin V.M., Gnidina I.V., Krasilnikov V.P. The Scanning Dimensional Microelectrochemical Machining with the Ultra-small Interelectrode Gap // Procedia CIRP 55, 2016. – PP. 89-94.

5. Lyubimov V., Volgin V., Krasilnikov V. Theoretical Investigation of Current Pulses Parameters in Electrochemical Machining with Micro - and Nanoparameters // Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering.– Springer International Publishing, 2019. – PP.1-5.

6. Krasilnikov V.P., Lyubimov V.V. Electrochemical machining under the conditions of the electrode-tool spatial displacements // XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Book 3: Abstracts. – Saint Petersburg, 2019. – P. 152.

7. Lyubimov V.V., Volgin V.M., Krasilnikov V.P. Investigation of kinematic-geometric characteristics of electrochemical machining // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer Cham, 2019. – PP. 391-398.

8. Lyubimov V., Krasilnikov V., Volgin V. Investigation of Electrochemical Machining Using Nanosecond Voltage Pulse Packets. // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer Cham, 2021. – PP. 163-170.

9. Красильников В.П. Исследование зависимости электрохимического формообразования от скорости перемещения электрода-инструмента // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. – С. 59-61.

10. Красильников В.П. Влияние скорости перемещения электрода-инструмента на процесс электрохимического формообразования // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. – С. 165-167.

11. Красильников В.П. Теоретическое исследование влияния формы электрода-инструмента на процесс сканирующей электрохимической обработки // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2020. – С. 59-60.

12. Галанов В.М., Красильников В.П. Разработка прибора для предварительной оценки качества поверхности с использованием лазерного луча // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: сборник трудов региональной научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 184-187.

13. Красильников В.П., Сидоров В.Н. Технология изготовления электродов-инструментов для электрохимического формообразования подвижным инструментом // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: материалы всероссийской научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 75-80.

14. Красильников В.П. Экспериментальные исследования зависимости параметров электрохимического формообразования от скорости перемещения электрода-инструмента // Высокие, критические электро- и нанотехнологии:

материалы всероссийской научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 48-53.

15. Красильников В.П. Исследование влияния технологических параметров защитной маски на скорость бокового травления при электрохимическом формообразовании в кремнии // Молодежные инновации: сборник трудов научно-практической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – С. 141-142.

16. Красильников В.П. Теоретическое исследование влияния скорости перемещения электрода-инструмента на степень газосодержания электролита при электрохимическом формообразовании в кремнии // Молодежные инновации: сборник трудов научно-практической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – С. 139-141.

17. Красильников В.П. Исследование процесса электрохимического формообразования в кремнии при различной конфигурации защитной маски // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: сборник трудов региональной научно-практической конференции», Тула: ТулГУ, 2015. – С. 65-71.

18. Волгин В.М., Любимов В.В., Гнидина И.В., Красильников В.П., Татарин В.Н. Моделирование формирования микро- и наноструктурированных поверхностей при анодном растворении без использования масок // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: сборник трудов региональной научно-практической конференции», Тула: ТулГУ, 2015. – С. 37-53.

19. Красильников В.П. Исследование влияния скорости перемещения электрода-инструмента на качество сканирующей электрохимической обработки // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: материалы региональной научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. – С. 95-99.

20. Волгин В.М., Красильников В.П., Давыдов А.Д. Моделирование процессов ионного переноса при восстановлении иодат-иона на вращающемся дисковом электроде // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: материалы региональной научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. – С. 33-51.

21. Красильников В.П., Сидоров В.Н. Теоретическое исследование влияния формы электрода-инструмента на процесс электрохимического формообразования // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: материалы всероссийской научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 140-145.

22. Волгин В.М., Давыдов А.Д., Кабанова Т.Б., Гнидина И.В., Красильников В.П. Влияние комплексообразования на массоперенос при анодном растворении металлического вращающегося дискового электрода // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: материалы всероссийской научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 74-99.

23. Любимов В.В., Красильников В.П., Гнидина И.В., Волгин В.М. Исследование электрохимической обработки с использованием пакетов импульсов напряжения наносекундной длительности // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: материалы всероссийской научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 40-49.

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 060к

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95