

На правах рукописи



ДО ВАН ДОНГ

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ**

Специальность 05.02.07 Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тула 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Волгин Владимир Мирович

Официальные оппоненты: Рахимьянов Харис Магсуманович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВПО «Новосибирский государственный техни-
ческий университет», заведующий кафедрой
«Технологии машиностроения»

Грачев Олег Евгеньевич
кандидат технических наук, ООО «Кварц
Групп» (г. Москва), руководитель проекта
управления по производству

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»
(г. Барнаул)

Защита диссертации состоится «30» ноября 2015 г. в 10.00 часов на заседа-
нии диссертационного Совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государ-
ственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, ауд. 9-101.

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

[\(http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/do-vd/\)](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/do-vd/)

Автореферат разослан « 09 » октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время электрохимическая обработка (ЭХО) проволочным электродом-инструментом (ПЭИ) является одним из распространенных методов разрезания и вырезания деталей сложной формы, которые изготовлены из труднообрабатываемых материалов. Это обусловлено следующими факторами: отсутствием значительного механического воздействия на ПЭИ и заготовку, что позволяет производить обработку маложестких деталей с высокой точностью; отсутствием термического воздействия на заготовку и инструмент; отсутствием износа ПЭИ; использованием импульсов технологического напряжения сверхкороткой длительности (порядка нескольких наносекунд) и сверхмалых межэлектродных зазоров (порядка нескольких микрометров); возможностью получения сложных форм при использовании простых схем движения инструмента и обрабатываемой заготовки.

Закономерности электрохимического формообразования при получении элементов сложной формы в настоящее время изучены недостаточно, так как большинство работ, посвященных исследованию процесса ЭХО ПЭИ, являются экспериментальными. Особенно, при использовании ПЭИ с некруглым сечением, позволяющим значительно повысить эффективность ЭХО микродеталей. Экспериментальное определение технологических параметров обработки (режимов обработки и траектории перемещения ПЭИ) достаточно трудоемко и связано с большими затратами материальных ресурсов и времени. Поэтому более эффективно для проектирования операций электрохимического проволочного вырезания использовать методы, базирующиеся на использовании современных информационных технологий автоматизированного проектирования. Это позволит значительно снизить затраты на этапе технологической подготовки производства.

Таким образом, разработка методов проектирования операций ЭХО подвижным ПЭИ, базирующихся на математических моделях, обеспечивающих прогнозирование формы и размеров обрабатываемой поверхности с учетом возможных топологических изменений поверхности обрабатываемой заготовки является **актуальной научной задачей.**

Цель работы.

Целью данной работы является повышение эффективности технологии электрохимической обработки проволочным электродом инструментом за счет прогнозирования формы и размеров реза, базирующихся на разработанных математических моделях.

Для достижения цели в работе необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ современных методов разрезания и вырезания материалов.
2. Разработать математические модели процесса электрохимического проволочного вырезания и методы численного моделирования ЭХО подвижным ПЭИ с учетом возможных топологических изменений поверхности обрабатываемой заготовки.
3. Провести исследование влияния выхода по току, скорости и траектории перемещения ПЭИ на геометрию реза.
4. Провести исследование различных технологических схем формирования типовых элементов.
5. Провести экспериментальные исследования электрохимического проволочного вырезания для проверки результатов моделирования.
6. Разработать методику проектирования технологических операций электрохимического проволочного вырезания и метод повышения точности при электрохимической обработке ПЭИ.

Объектом исследования является электрохимическая обработка проволочным электродом-инструментом.

Предметом исследования являются физико-химические процессы электрохимической обработки подвижным ПЭИ и их математические модели и методы моделирования.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях теории электрохимической обработки с использованием математического моделирования.

При проведении теоретических исследований электрохимической обработки ПЭИ использовались следующие программные продукты: SolidWorks, Компас, Scilab, SciDAVis, Office, Inkscape, Microsoft Visual Studio Express. При проведении экспериментальных исследований применялась современная измерительная и регистрирующая аппаратура.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель изменения геометрии реза, учитывающая влияние плотности тока на выход по току.

2. Закономерности влияния скорости и траектории перемещения электрода-инструмента на геометрию реза.

3. Технологические схемы электрохимического проволочного вырезания, обеспечивающие требуемую точность обработанных поверхностей.

4. Результаты экспериментальных исследований по выбору технологических схем и назначению режимных параметров по оценкам точности реза.

Научная новизна состоит из следующих элементов:

- Обоснованы условия осуществления электрохимического проволочного вырезания для достижения требуемой точности обработки.

- Установлены и формализованы взаимосвязи геометрических параметров реза с технологическими параметрами обработки.

Практическая значимость состоит в следующем:

- Разработан метод моделирования электрохимического формообразования проволочным электродом-инструментом, позволяющий прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности с учетом топологических изменений;

- Разработаны рекомендации по выбору технологических параметров (режимов и технологических схем) для реализации процесса ЭХО ПЭИ.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что на основе теоретического анализа получены зависимости геометрии реза от скорости и траектории перемещения проволочного ЭИ, учитывающие влияние плотности тока на выход по току.

Реализация результатов работы.

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение» и включены в разделы лекционных курсов 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 на кафедре «Электро и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Современные электро- и нанотехнологии в промышленности России (Молодежные инновации)» (Тула, 2012, 2013 гг), региональных научно-технических конференциях «Совре-

менная электротехнология в промышленности Центра России” (Тула, 2013, 2014 гг), Всероссийской научно–технической конференции “Высокие, критические электро- и нанотехнологии” (Тула, 2013, 2014 гг), Международной молодежной конференции (Гагаринские чтения. М., 2013, 2014 гг), “10-й европейский симпозиум электрохимических технологий”.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 статей, в том числе 4 статья в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных журналов ВАК. Общий объем публикаций 3,0 печ.л., авторский вклад 1,9 печ.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 20 таблиц, библиографический список из 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и определены задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен аналитический обзор по теме диссертации, в котором рассмотрены современные методы резки материалов. Проведен сравнительный анализ методов разрезания и вырезания материалов. Определено, что ЭХО ПЭИ является одним из наиболее перспективных методов обработки микродеталей по ряду показателей, таких, как отсутствие значительного механического воздействия на ПЭИ и заготовку, что позволяет производить обработку маложестких деталей с высокой точностью; отсутствие износа ПЭИ; отсутствие термического воздействия на заготовку и инструмент; обеспечение высокой производительности, а также возможность непосредственного управления величиной снимаемого припуска с помощью уменьшения значения ширины реза. Проведен анализ физико-химических процессов ЭХО ПЭИ, направлений повышения технологических показателей и математических моделей процесса с целью определения геометрии реза и создания математической базы для разработки моделирования.

Сделан вывод об актуальности разработки методов моделирования ЭХО подвижным ПЭИ с учетом возможных топологических изменений поверхности обрабатываемой заготовки. На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе проведено теоретическое исследование электрохимического формообразования проволочным электродом-инструментом (рис. 1).

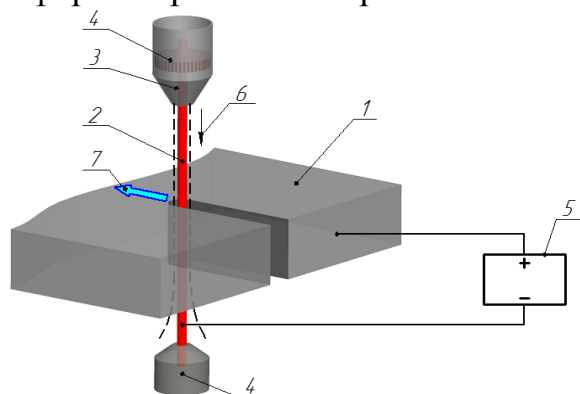


Рис. 1. Схема электрохимической обработки движущимся ПЭИ: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – проволочный электрод инструмент; 3 – сопло; 4 – электрододержатель; 5 – источник питания; 6 – направление подачи электролита; 7 – направление перемещения ПЭИ

Обработку осуществляют при перемещении проволочного ЭИ 2 по командам от системы управления. Заготовка 1 подключается к положительному полюсу (анод) источника питания 5, ПЭИ — к отрицательному (катод). Верхний и нижний концы ПЭИ фиксируются в электрододержателях 4, которые перемещается по заданной траектории реза. Сопло 3 формирует струю электролита 6. Образующиеся при электролизе продукты растворения удаляются из межэлектродного промежутка потоком электролита.

В настоящей работе разработана схема моделирования электрохимического формообразования проволочным электродом-инструментом, позволяющая прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности. Для моделирования процесса ЭХО ПЭИ (рис. 2) будем использовать модель идеального формообразования, не учитывающую концентрационные изменения в растворе.

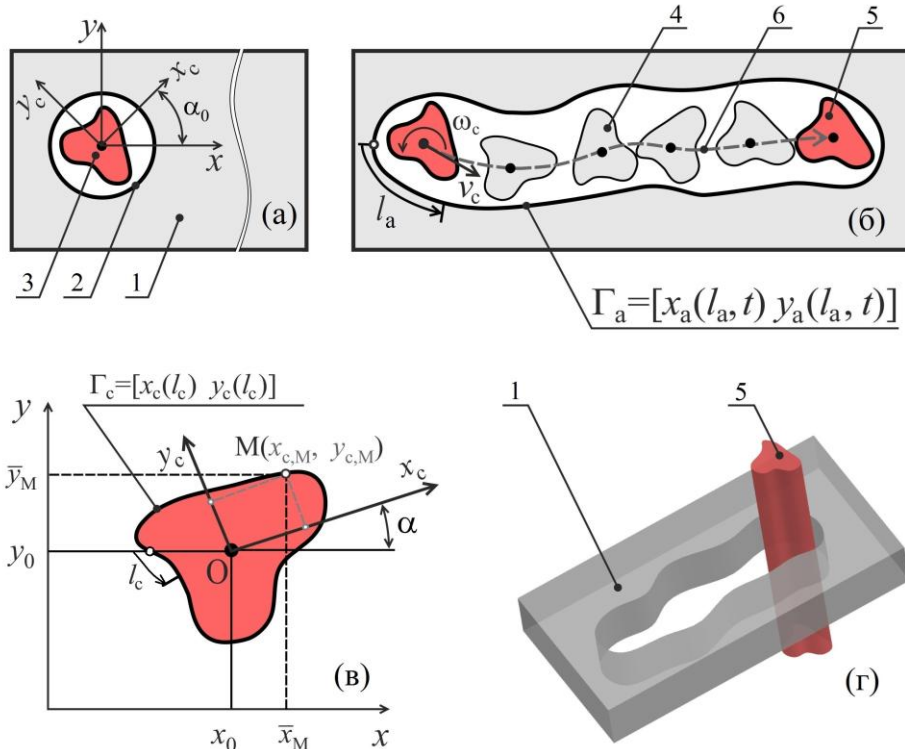


Рис. 2. Схема электрохимического формообразования ПЭИ: (а) – электрод-инструмент и обрабатываемая заготовка до обработки, (б, г) – электрод-инструмент и обрабатываемая заготовка в процессе обработки, (в) – взаимосвязь координат точек поверхности электрода-инструмента в локальной и глобальной системах координат; 1 - обрабатываемая заготовка, 2 - исходное отверстие в заготовке, 3, 4, 5 - электрод-инструмент в начальном, промежуточном и конечном положении, соответственно, 6 - траектория перемещения ПЭИ

Перемещение обрабатываемой поверхности, обусловленное анодным растворением металла, будем описывать следующим соотношением:

$$\frac{d\Gamma_a}{dt} = \frac{\eta\varepsilon}{\gamma} \mathbf{i} = -\frac{\eta\varepsilon\chi}{\gamma} \frac{\partial\phi}{\partial n} \mathbf{n} \quad (1)$$

где $\Gamma_a = [x_a(l_a, t) \quad y_a(l_a, t)]$ – вектор-функция, задающая обрабатываемую поверхность; $x_a(l_a, t)$, $y_a(l_a, t)$ – координаты точки на обрабатываемой поверхности; l_a – натуральный параметр обрабатываемой поверхности; η – выход по току; ε – электрохимический эквивалент материала заготовки; \mathbf{i} – плотность тока; χ – удельная электропроводность электролита; γ – плотность материала заготовки; ϕ – потенциал электрического поля; \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности обрабатываемой заготовки.

Для удобства решения и анализа полученных результатов математическая модель была приведена к безразмерному виду. При этом в качестве единицы длины был выбран диаметр описанной окружности поперечного сечения электрода-инструмента ($d_{\text{ПЭИ}}$), в качестве единицы электрического потенциала – значение технологического напряжения (U^*), а в качестве единицы скорости – характерное значение скорости перемещения ПЭИ (v_c^*):

$$\begin{aligned}
X &= \frac{x}{d_{\text{ПЭИ}}}, Y = \frac{y}{d_{\text{ПЭИ}}}, X_0 = \frac{x_0}{d_{\text{ПЭИ}}}, Y_0 = \frac{y_0}{d_{\text{ПЭИ}}}, L_a = \frac{l_a}{d_{\text{ПЭИ}}} \\
L_c &= \frac{l_c}{d_{\text{ПЭИ}}}, \Phi = \frac{\phi}{U^*}, \bar{U} = \frac{U}{U^*}, I = K_i i, \bar{V}_c = \frac{v_c}{v_c^*}, \tau = \frac{v_c^*}{d_{\text{ПЭИ}}} t \\
\bar{T} &= \frac{V_c^*}{d_{\text{ПЭИ}}} T, \Omega_c = \frac{d_{\text{ПЭИ}}}{v_c^*} \omega_c, \Omega_{\bar{U}} = \frac{d_{\text{ПЭИ}}}{v_c^*} \omega_U, \Omega_{\bar{V}_c} = \frac{d_{\text{ПЭИ}}}{v_c^*} \omega_{v_c}
\end{aligned} \tag{2}$$

где X, Y, X_0, Y_0 - безразмерные координаты; L_a - безразмерный натуральный параметр обрабатываемой поверхности; L_c - безразмерный натуральный параметр поверхности ЭИ; Φ - безразмерный потенциал; \bar{U} - безразмерное напряжение; I - безразмерная плотность тока; $K_i = \frac{d_{\text{ПЭИ}}}{\chi U^*}$ - коэффициент, характеризующий условия проведения процесса обработки; \bar{V}_c - безразмерная скорость перемещения инструмента; τ - безразмерное время; \bar{T} - безразмерное время обработки; Ω_c - безразмерная угловая скорость вращения ЭИ; $\Omega_{\bar{U}}$ - безразмерная угловая скорость изменения переменного составляющего напряжения; $\Omega_{\bar{V}_c}$ - безразмерная угловая скорость изменения переменной составляющей скорости ЭИ.

Модель процессов ЭХО проволочным ЭИ представлена следующими уравнениями:

$$\bar{U}(\tau) = \bar{U}_n + \frac{\bar{U}_\kappa - \bar{U}_n}{\bar{T}} \tau + A_{\bar{U}} \sin \Omega_{\bar{U}} \tau \tag{3}$$

$$\bar{V}_c(\tau) = \bar{V}_{cn} + \frac{\bar{V}_{ck} - \bar{V}_{cn}}{\bar{T}} \tau + A_{\bar{V}_c} \sin \Omega_{\bar{V}_c} \tau \tag{4}$$

$$\text{div}(\text{grad } \Phi) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{dX_a}{d\tau} = S_y \frac{\partial \Phi}{\partial X}, \frac{dY_a}{d\tau} = S_y \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \tag{6}$$

$$\frac{dX_0}{d\tau} = \bar{V}_{c,x}(\tau), \frac{dY_0}{d\tau} = \bar{V}_{c,y}(\tau), \frac{d\alpha_c}{d\tau} = \Omega_c(\tau) \tag{7}$$

$$\bar{X}(L_c, \tau) = X_0(\tau) + X_c(L_c, 0) \cos[\alpha_c(\tau)] - Y_c(L_c, 0) \sin[\alpha_c(\tau)] \tag{8}$$

$$\bar{Y}(L_c, \tau) = Y_0(\tau) + X_c(L_c, 0) \sin[\alpha_c(\tau)] + Y_c(L_c, 0) \cos[\alpha_c(\tau)]$$

где $\bar{U}_n, \bar{U}_\kappa$ - начальное и конечное напряжение, приложенное к электродам, $A_{\bar{U}}$ - переменное составляющие напряжение; $\bar{V}_{cn}, \bar{V}_{ck}$ - начальная и конечная скорость перемещения ЭИ, $A_{\bar{V}_c}$ - переменная составляющая скорость перемещения ЭИ; $X_0(L_c, \tau), Y_0(L_c, \tau)$ - координаты точки на центре ПЭИ; α_c - угол поворота относительно центра ЭИ; \bar{X}, \bar{Y} - безразмерные координаты точек поверхности инструмента в глобальной системе $X - Y$ (рис.2); $\bar{V}_{c,x}, \bar{V}_{c,y}$ - проекции линейного перемещения центра ЭИ на координатные оси X и Y соответственно; $S_y = \frac{\eta \varepsilon \chi U^*}{\gamma d_{\text{ПЭИ}} v_c^*}$ - безразмерный параметр, характеризующий условия проведения процесса обработки.

Система уравнений включает в себя уравнения изменения технологического напряжения и перемещения электрода-инструмента (3-4); уравнение Лапласа для расчета распределения электрического потенциала в межэлектродном простран-

стве (5); уравнение перемещения обрабатываемой поверхности, обусловленное анодным растворением металла (6); уравнение перемещения центра проволочного электрода-инструмента в процессе обработки (7) и уравнение перемещения точек поверхности ЭИ в глобальной системе координат, связанной с обрабатываемой заготовкой (8).

Начальные условия зададим, принимая, что в начальный момент времени обрабатываемая поверхность представляет собой окружность, соосную описанной окружности поперечного сечения электрода-инструмента, и отстоящую от описанной окружности на величину начального безразмерного межэлектродного зазора S_0 . Начальные и граничные условия для системы уравнений (3) - (8), приведенные к безразмерному виду, можно записать следующим образом (рис. 2):

$$X_0(0) = X_H, Y_0(0) = Y_H, \alpha_c(0) = \alpha_H, \quad (9)$$

$$X_a(L_a, 0) = (0.5 + S_0) \cos\left(\frac{L_a}{0.5 + S_0} - \pi\right), Y_a(L_a, 0) = (0.5 + S_0) \sin\left(\frac{L_a}{0.5 + S_0} - \pi\right), \quad (10)$$

$$\Phi|_{\text{анод}} = \bar{U}(\tau) - Wa_a \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) \Big|_{\text{анод}}, \quad \Phi|_{\text{катод}} = -Wa_c \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) \Big|_{\text{катод}} \quad (11)$$

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

где $Wa_a = \frac{\chi}{d_{ПЭИ}} \left(\frac{\partial E_n}{\partial i} \right) \Big|_a$ и $Wa_c = \frac{\chi}{d_{ПЭИ}} \left(\frac{\partial E_n}{\partial i} \right) \Big|_c$ - числа Вагнера, учитывающие поляризации анода и катода, соответственно.

Для установления взаимосвязей геометрических параметров реза с технологическими параметрами обработки разработан метод моделирования, учитывающий топологические изменения обрабатываемой поверхности. В рамках этого метода все время обработки разбивается на некоторое количество шагов. Для каждого шага по времени:

1) вначале рассчитывается распределение электрического поля (при геометрии электродов, соответствующих началу шага) в результате численного решения уравнения Лапласа (5) с граничными условиями (11):

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

$$X_a^{n+1} = X_a^n + \Delta\tau S_y \frac{\partial \Phi^n}{\partial X}, \quad Y_a^{n+1} = Y_a^n + \Delta\tau S_y \frac{\partial \Phi^n}{\partial Y}, \quad (12)$$

3) далее определяется новое положение центра ПЭИ:

$$X_0^{n+1} = X_0^n + \Delta\tau \bar{V}_{c,x}(\tau^n), \quad Y_0^{n+1} = Y_0^n + \Delta\tau \bar{V}_{c,y}(\tau^n) \quad (13)$$

4) далее определяется новое значение угла поворота ЭИ:

$$\alpha_c^{n+1} = \alpha_c^n + \Delta\tau \Omega^n \quad (14)$$

В соотношениях (12) – (14) верхний индекс n обозначает номер шага по времени, а $\Delta\tau$ - обозначает величину шага по времени. Данный метод позволяет прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности при ЭХО ПЭИ.

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 ПЭИ 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 моделирование осуществлялась адаптация сетки граничных элементов. При этом был использован достаточно простой метод, обладающий при этом достаточно высокой эффективностью. Суть этого метода заключается в следующем: при увеличении длины граничного элемента более чем в 1.5 раза по сравнению с его начальной длиной, элемент разбивался на два элемента одинаковой длины; при уменьшении длины граничного элемента более чем в 2 раза по сравнению с его начальной длиной, элемент исключался, при этом два соседних граничных элемента заменялись одним.

Проведен анализ обработки типовых элементов – прямые и угловые пазы, отверстия квадратного и треугольного поперечного сечения (рис. 3, 4). Утолщенные линии на рисунках обозначают исходное (круглое) отверстие и полученное после обработки. Пунктирной линией обозначена траектория перемещения ПЭИ. В качестве исходных данных были приняты следующие значения параметров процесса: $\eta = 1$, $\bar{V}_c = 1$, $\bar{U} = 1$, $Wa_a = Wa_c = 0$. Показана возможность применения предложенной схемы моделирования для различных схем формообразования, в том числе, и для случаев, когда могут происходить топологические изменения обрабатываемой поверхности.

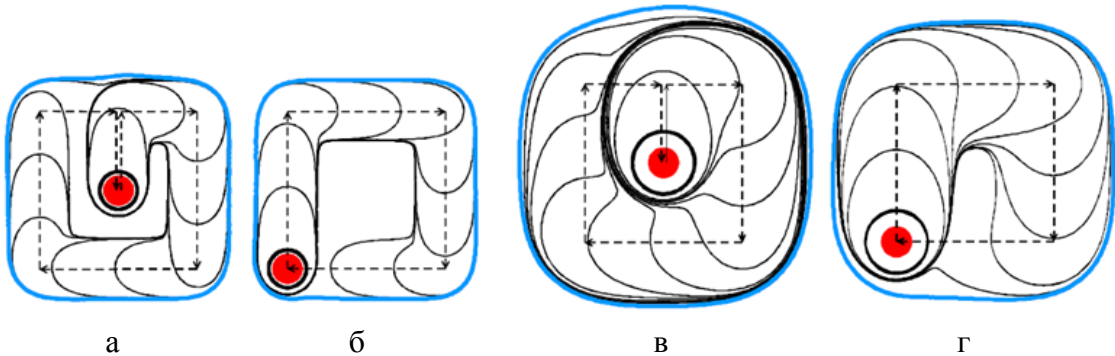


Рис. 3. Результаты моделирования ЭХО квадратного отверстия ПЭИ при установившихся зазорах: а, б - $S_y = 0.1$; в, г - $S_y = 0.5$; для различных схем перемещения электрода-инструмента: а, в – из центра квадрата, б, г – из угла квадрата

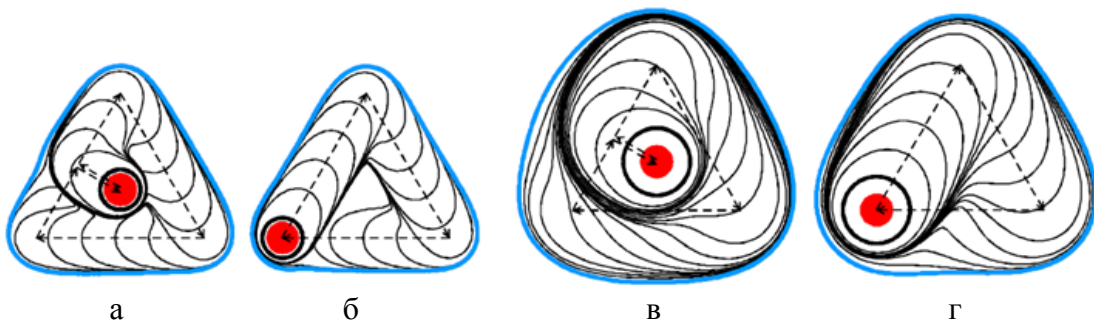


Рис. 4. Результаты моделирования ЭХО треугольного отверстия ПЭИ при установившихся зазорах: а, б - $S_y = 0.1$; в, г - $S_y = 0.5$; для различных схем перемещения электрода-инструмента: а, в – из центра треугольника, б, г – из вершины треугольника

В отличие от формирования прямолинейных пазов и угловых участков при обработке более сложных элементов, таких как отверстия квадратного и треугольного поперечного сечения, могут происходить топологические изменения обрабатываемой поверхности (рис. 5). В рассмотренных случаях обработки отверстий топологические изменения могут происходить в результате того, что в процессе обработки не весь материал заготовки внутри отверстия анодно растворяется. При моделировании было принято, что при отделении части материала, расположенного в центральной части формируемого отверстия, от заготовки (т.е. при самопересечении обрабатываемой поверхности) эта часть материала заготовки

удаляется из зоны обработки.

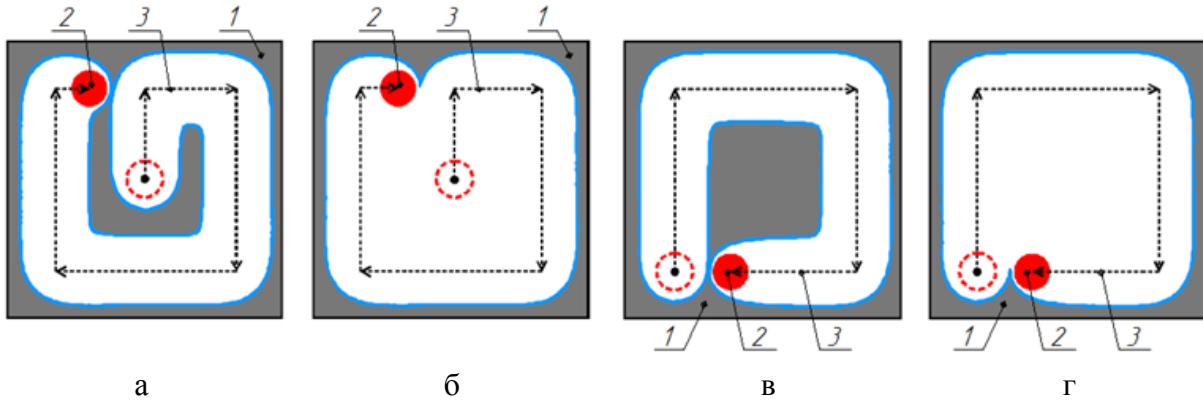


Рис.5. Геометрия реза до (а, в) и после (б, г) взаимопересечения (топологического изменения) обрабатываемой поверхности для различных траекторий перемещений ПЭИ. Безразмерный межэлектродный зазор равен 0.1

Расширена возможность моделирования за счет учета зависимости выхода по току от плотности тока, и учета переменной скорости ПЭИ. При ЭХО стали 5ХНМ в растворах 5% NaCl и 10% NaNO₃ для зависимости выхода по току от анодной плотности характерны три зоны. Зона I – зона малых значений плотности тока, в которой значение выхода по току при ЭХО в активирующем электролите (NaCl) практически равно единице, а в пассивирующем электролите (NaNO₃) очень мало отличается от нуля. Зона II – зона средних значений плотности тока, в которой значение выхода по току при ЭХО в активирующем электролите убывает от 1 до 0,5, а в пассивирующем электролите увеличивается от 0 до 0,7. Зона III – зона больших значений плотности тока, в которой значение выхода по току достаточно слабо зависит от плотности тока. Рассмотрено влияние выхода по току на геометрию реза. Показано, что при средних и больших плотностях тока параметры реза слабо зависят от типа электролита; при малых значениях плотности тока обработку целесообразно осуществлять в активирующем электролите, так как при обработке в растворе NaNO₃ выход по току очень мал, а следовательно, очень велика энергоемкость процесса.

Электрохимическое вырезание ПЭИ применяются, в основном, для вырезания сквозных отверстий сложной формы. При обработке с постоянным наклоном проволоки необходимо решение, обеспечивающее ее движение при формировании углов в контурах деталей. Получена зависимость бокового зазора от скорости перемещения ПЭИ при обработке в разных электролитах (рис. 6).

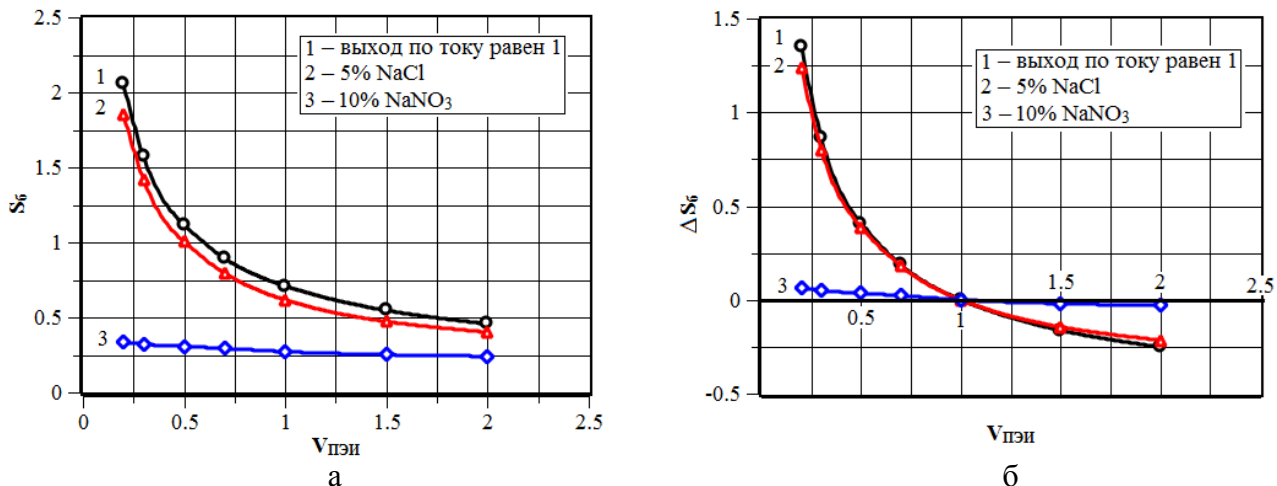


Рис. 6. Зависимость бокового зазора (а) и изменения бокового зазора (б) от скорости перемещения ПЭИ при обработке стали 5ХНМ в разных электролитах: $S_y = 0,2$ и $K_i = 0,1$

Проведено моделирование электрохимического проволочного вырезания стали 12Х18Н10Т в 10% водном растворе NaNO_3 . Получена зависимость размерного бокового зазора от скорости перемещения электрода при различных значениях диаметра ПЭИ и напряжения (рис. 7). Из результатов моделирования следует, что увеличение напряжения в 2 раза позволяет увеличить боковой зазор в 1,6 раза, а увеличение диаметра проволочного электрода-инструмента в 2 раза позволяет увеличить боковой зазор в 1,2 раза.

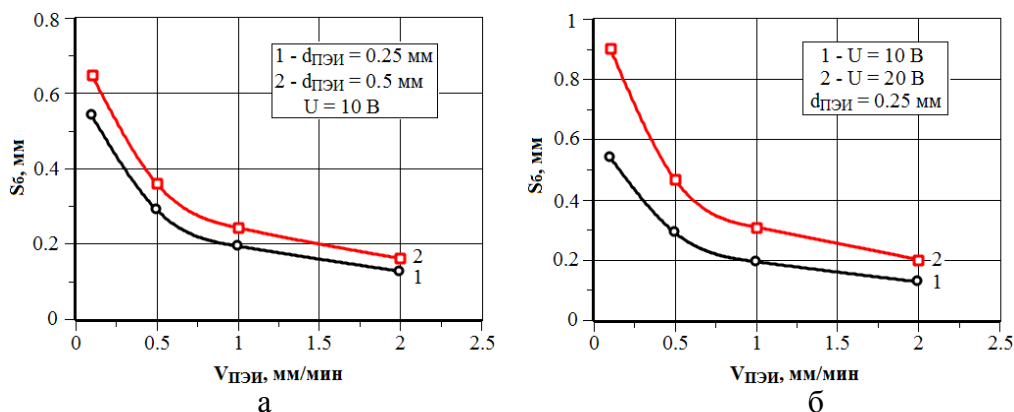


Рис. 7. Зависимость бокового зазора при различных значениях диаметра ПЭИ (а) и при различных значениях напряжения (б) от скорости перемещения ПЭИ

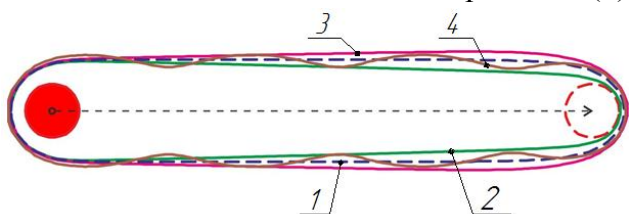


Рис. 8. Результаты моделирования электрохимической обработки при различных законах изменения технологического напряжения при прямолинейном перемещении электрода-инструмента при $S_0=0.1$: 1 - $U = 1$; 2 - $U = 1 - 0.75\tau$; 3 - $U = 1 + 0.75\tau$; 4 - $U = 1 + 0.75\sin(2\tau)$

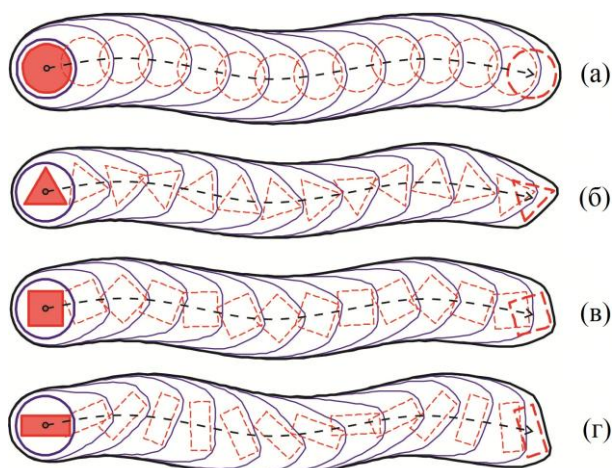


Рис. 9. Результаты моделирования электрохимической обработки при прямолинейном перемещении, поперечной вибрации и вращении электрода-инструмента с различной формой поперечного сечения при $S_0=0.1$, $\Omega=0.5$, $A=0.2$, $\Omega_v=1$: а - круг; б - треугольник; в - квадрат; г - прямоугольник

В отличие от постоянного технического напряжения, при изменении технологического напряжения можно получать резы более сложных форм (рис. 8). В рассмотренных случаях обработки при прямолинейном перемещении ПЭИ с постоянной скоростью и постоянном выходе по току могут получить резы с уменьшением (рис. 8-2) или увеличением (рис. 8-3) по длине реза ширины. Кроме того, можно получить резы с синусоидальными формами (рис. 8-4).

Было проведено моделирование ЭХО при прямолинейном перемещении, поперечной вибрации и вращении ПЭИ с различной формой поперечного сечения - круг, треугольник, квадрат, прямоугольник (рис. 9). Из полученных результатов следует, что размеры и форма реза зависит от формы поперечного сечения электрода-инструмента: форма реза при обработке ПЭИ с круглым и квадратным сечением - симметричная, а для ПЭИ треугольного и прямоугольного сечения - несимметричная.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию с целью определения технологических показателей процесса электрохимического проволочного вырезания, направленная на проверку теоретических положений изложенных, выше, для выявления основных закономерностей данного процесса.

Были предложены различные схемы формообразования типовых элементов - прямого и углового пазов, отверстия квадратного поперечного сечения и наклонного отверстия (рис. 10). Для получения закрытых вырезов (рис. 10б) необходимо в заготовке предварительно сверлить отверстие, затем в полученное отверстие вводить ПЭИ. Общий вид экспериментальной электрохимической установки, использованной при проведении экспериментов, представлен на рис. 11.

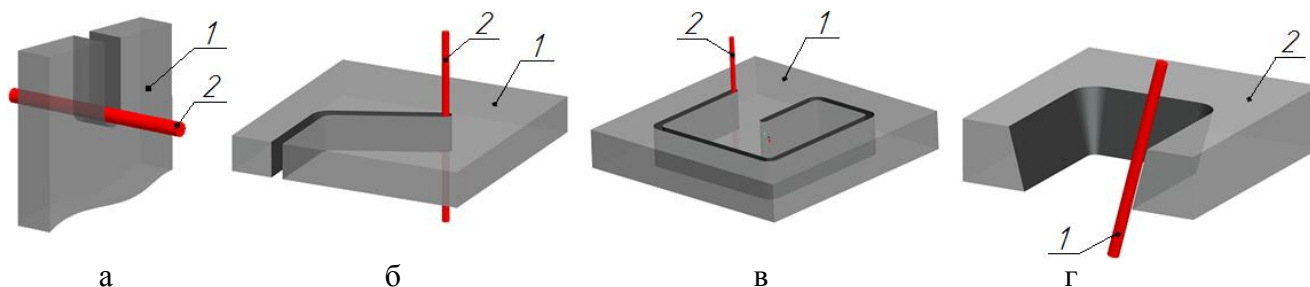


Рис. 10. Различные схемы формообразования типовых элементов:

а – схема формообразования открытого прямолинейного выреза; б – схема формообразования открытого угла; в – схема формообразования закрытого квадратного отверстия для перемещения инструмента из центра квадрата; г – схема формообразования открытого наклонного отверстия; 1 – заготовка; 2 – проволочный электрод инструмент

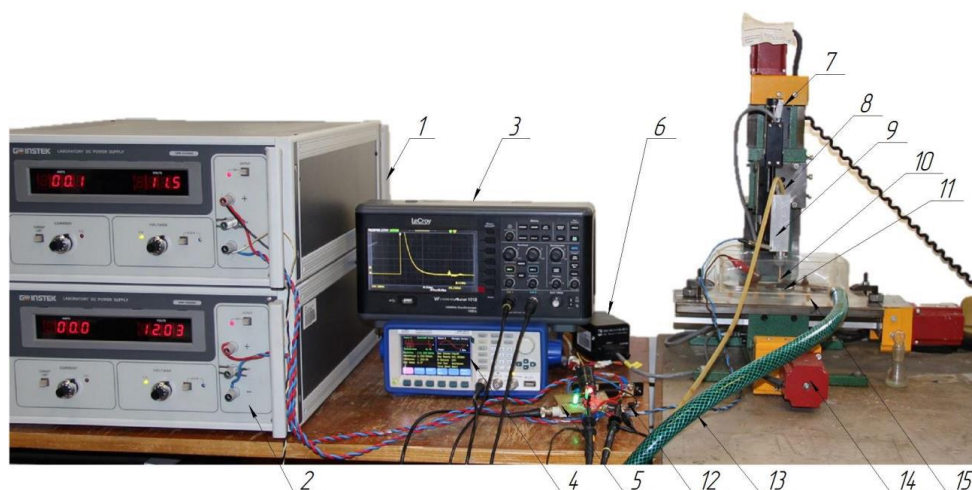


Рис. 11. Общий вид экспериментальной установки:

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

Экспериментальная обработка осуществлялась при использовании заготовок из стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632–72 толщиной 4 мм, ПЭИ диаметром 0,25 мм изготовленным из латуни, при этом в качестве электролита применялся 8% NaNO_3 .

На рис. 12 представлены фотографии полученных пазов при различных условиях экспериментальной обработки. Значения ширин пазов, полученные экспериментально, а также значения, полученные в результатах моделирования, приведены в табл. 1. Как следует из таблицы, результаты моделирования находятся в хорошем соответствии с результатами экспериментальных исследований.

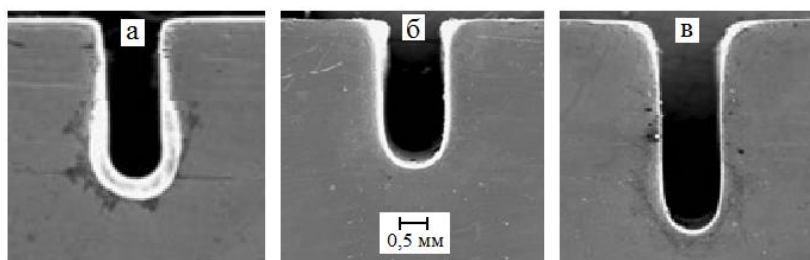


Рис. 12. Пазы, полученные ЭХО проволочным ЭИ при различных условиях обработки:
а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3

Таблица 1 – Результаты экспериментальных и теоретических исследований ЭХО ПЭИ

Номер образца	Амплитуда импульсов напряжения, В	Период импульсов напряжения, мкс	Коэффициент заполнения импульсами напряжения, %	Скорость ПЭИ мм/мин	Ширина паза В мм		Погрешность ширины паза ΔB , мм	Относительная погрешность $\frac{\Delta B}{B}$, %
					эксперимент	расчет		
1	12	200	50	0,062	1,140	1,191	0,051	4,48
2	15	200	50	0,086	1,274	1,233	-0,041	-3,2
3	15	100	50	0,125	1,149	1,136	-0,013	-1,16

Четвертая глава посвящена разработке методики проектирования операций электрохимического проволочного вырезания, позволяющая прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности.

Была разработана схема алгоритма проектирования операций электрохимической обработки ПЭИ. Алгоритм составлен, исходя из условий оптимизации несущих элементов конструкции и вспомогательного оборудования станка по результатам оптимизации режимов технологического процесса, применительно к требованиям конкретного производства.

Проектирования операций ЭХО ПЭИ начинается с ввода исходных данных: геометрия и материал детали, точность размеров и качество поверхности. Затем производится выбор схемы вырезания, состава электролита, материала и диаметра ПЭИ. Затем производится расчет режимов вырезания, геометрии реза и положения ПЭИ. После определения нового положения проволочного электрода инструмента производится проверка окончания обработки заготовки. Если обработка еще не завершена, то осуществляется переход к расчету геометрии реза и описанная выше последовательность расчетов выполняется для нового положения ПЭИ. В противном случае осуществляется переход к оценке точности и качества вырезания. Если точность размеров и качество поверхности вырезания не удовлетворяют требованиям, то осуществляется переход к выбору схемы вырезания, состава электролита, материала и диаметра ПЭИ и описанная выше последовательность расчетов повторяется. Если точность и качество вырезания удовлетворяют требованиям, то обработка заканчивается.

Продемонстрировано применение этой схемы для вырезания отверстия пятиугольного поперечного сечения и предложены различные схемы электрохимического проволочного вырезания для уменьшения погрешности обработки

Для повышения точности обработки предложены различные схемы вырезания. На рис.13 показаны две основных схемы ЭХО ПЭИ: обработка за два прохода (рис. 13а) и обработка с удалением всего материала внутри контура (рис. 13б).

Видно, что при применении схемы обработки за два прохода ПЭИ погрешность равна 0,07 мм, и схемы обработки с удалением всего материала внутри кон-

тура погрешность равна 0,09 мм, поэтому для обработки целесообразно использовать схему обработки в два прохода. Разработанная методика, базирующаяся на разработанных математических моделях и методах анализа, позволяет определить рациональные условия проведения операций и сформировать требуемую геометрию реза с заданной точностью.

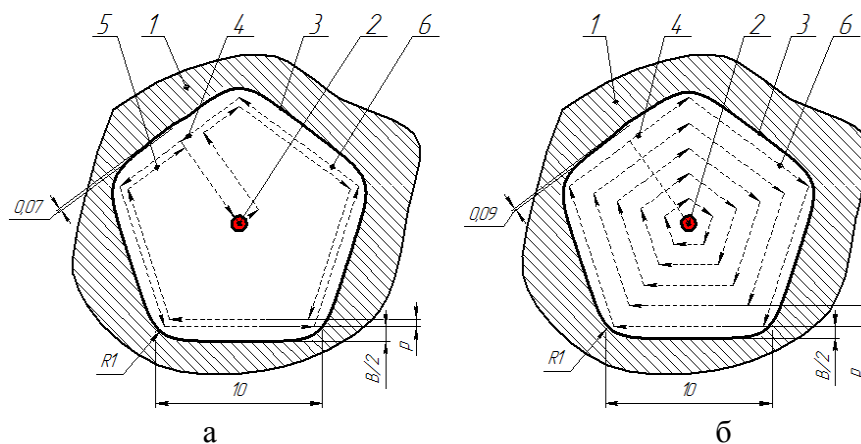


Рис. 13. Схема обработки отверстия пятиугольного поперечного сечения; (а) - обработка за два прохода; (б) - обработка с удалением всего материала внутри контура; 1 – обрабатываемая деталь; 2 – ПЭИ; 3 – обрабатываемая поверхность детали; 4 – направление перемещения инструмента; 5 – траектория ПЭИ при черновой обработке; 6 – траектория ПЭИ при чистовой обработке; p – шаг проходов, $B/2$ – полуширина реза

В табл. 2 представлены основные показатели электрохимической проволочной вырезания в заготовках из стали 12X18H10T. Показано что, невозможно проводить обработку по варианту 7, так как плотность тока в электродной проволоке больше допустимой. Для вырезания заготовок большой толщины необходимо использовать ПЭИ с большим диаметром или уменьшить скорость перемещения проволоки.

Таблица 2 - Основные показатели ЭХО проволочным ЭИ (материал заготовки – 12X18H10T, электролит - 10%NaNO₃, $t_3 = 20^0$, напряжение $U = 10V$)

Вариант	Толщина заготовки мм	Диаметр ПЭИ мм	Скорость ПЭИ мм/мин	Торцевой зазор мм	Ширина реза мм	Сила тока А	Плотность тока в электролите А/мм ²	Плотность тока ПЭИ А/мм ²
1	0.1	0.1	0.5	0.087	0.540	0.022	0.695	2.778
2	0.5	0.25	1	0.055	0.637	0.257	0.656	5.245
3	1	0.5	2	0.030	0.821	1.326	0.844	6.754
4	2	0.1	0.5	0.087	0.540	0.436	0.695	55.566
5	5	0.25	1	0.055	0.637	2.573	0.656	52.451
6	10	0.5	2	0.030	0.821	13.255	0.844	67.543
7	30	1	3	0.024	1.327	96.421	1.024	122.829

Исследовано влияние толщины заготовки и рабочего напряжения на ограничение величины плотности тока в электродной проволоке и на производительности ЭХО проволочным ЭИ при вырезании материала 12X18H10T в 10% растворе NaNO₃, $t_3 = 20^0$. Из результатов исследования следует, что увеличение напряжения в 3 раза позволяет уменьшить производительность приблизительно 1,7 раза, а увеличение толщины заготовок в 2 раза позволяет уменьшить производительность приблизительно 2,8 раза, обеспечивая $v = 3,1$ мм / мин для $H = 5$ мм. Это по-

тому что увеличение рабочего напряжения или толщины заготовок увеличивает плотность тока в электродной проволоке, позволяет наступать перегорание проволоки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для разрезания и вырезания деталей сложной формы из труднообрабатываемых материалов одним из перспективных методов является электрохимическая обработка проволочным электродом-инструментом. Ввиду того, что экспериментальное определение технологических параметров обработки (режимов обработки и траектории перемещения ПЭИ) достаточно трудоемко и связано с большими затратами материальных ресурсов и времени, разработка методов проектирования операций ЭХО подвижным ПЭИ с использованием математических моделей, обеспечивающих прогнозирование формы и размеров обрабатываемой поверхности, является актуальной задачей.

2. Разработана математическая модель и методы моделирования ЭХО ПЭИ, позволяющие прогнозировать форму и размеры обработанной поверхности при перемещении ЭИ по произвольной траектории с учетом топологических изменениях обработанной поверхности.

3. Теоретические исследования и результаты вычислительных экспериментов показали, что основными параметрами, влияющим на параметры реза, являются: скорость и траектория перемещения электрода-инструмента, выход по току и технологическое напряжение. Показано, что при увеличении скорости перемещения ПЭИ, боковой зазор уменьшается. Проведенное сравнение численных результатов при обработке в активирующем (5% NaCl) и в пассивирующем электролитах (10% NaNO₃) позволяет выбирать наиболее подходящий электролит для ЭХО. Доказано, что при средних и больших плотностях тока параметры реза слабо зависят от типа электролита; при малых значениях плотности тока обработку целесообразно осуществлять в активирующем электролите, так как при обработке в растворе NaNO₃ выход по току очень мал, а следовательно, очень велика энергоёмкость процесса.

4. Проведен анализ обработки типовых элементов – прямые и угловые пазы, отверстия квадратного и треугольного поперечного сечения. Показана возможность применения предложенной схемы моделирования для различных схем формообразования, в том числе, и для случаев, когда могут происходить топологические изменения обрабатываемой поверхности.

5. Исследованы закономерности электрохимического формирования элементов электродами-инструментами с различной формой поперечного сечения, совершающими сложное движение – перемещение вдоль обрабатываемой поверхности с поперечной осцилляцией и вращением электрода относительно его центра. Показано как различные формы проволочного электрода-инструмента и формы его движения могут быть использованы для расширения возможностей управления процессами ЭХО.

6. В результате проведенных исследований показано, что повышение точности обработки может быть обеспечено за счет изменении траектории перемещения электрода-инструмента, или локализации зоны обработки.

7. Проведено экспериментальное исследование процесса электрохимического проволочного вырезания. Установлено, что результаты теоретических исследований с использованием разработанных моделей находятся в хорошем соответствии с результатами экспериментальных исследований и известными точными решениями, что свидетельствует о достаточной адекватности математических моделей и методов анализа и достоверности полученных результатов.

8. Разработана методика проектирования операций электрохимического проволочного вырезания, позволяющая прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности.

9. Исследованы зависимости тока, плотности тока в электролите и плотности в ПЭИ от толщины заготовки, диаметра и скорости перемещения ПЭИ. Показано, что для вырезания заготовок большой толщины необходимо использовать ПЭИ с большим диаметром или уменьшить скорость перемещения проволоки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Волгин В.М., До Ван Донг, Давыдов А.Д. Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - Вып. 11. - С. 122-136.

2. Волгин В.М., До Ван Донг. Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом: Влияние скорости перемещения инструмента на геометрию реза // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - Вып. 7. - С. 85-93.

3. До Ван Донг. Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом: Влияние выхода по току на геометрию реза // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. - Вып. 11. - Ч. 2. - С. 37-44.

4. Volgin V.M., Do V.D., Davydov A.D. Modeling of wire electrochemical machining // Chemical Engineering Transactions. Vol. 41, 2014. P. 91-96.

5. До Ван Донг. Электрохимическая обработка проволочным электродом-инструментом // Сб. трудов НТК «Современные электро- и нанотехнологии в промышленности России» (Молодежные инновации). Тула: ТулГУ. 2012. С.65-67.

6. До Ван Донг. Распределение плотности тока по поверхности заготовки при электрохимической обработке проволочным электродом // XXXIX Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2013 г. М.: МАТИ, 2013. Т3, 216с. С. 134-136.

7. Волгин В.М., До Ван Донг, Давыдов А.Д. Моделирование электрохимического формообразования проволочным электродом-инструментом // Сб. трудов I региональной НТК «Высокие и критические электро- и нанотехнологии». Тула. ТулГУ. 2013. С.3-21.

8. Волгин В.М., До Ван Донг, Давыдов А.Д. Моделирование электрохимической обработки ультракороткими импульсами на основе обобщенной теории Фрумкина-Батлера-Фольмера // Сб. трудов I региональной НТК «Высокие и критические электро- и нанотехнологии». Тула. ТулГУ. 2013. С.41-58.

9. До Ван Донг. Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом с учетом зависимости выхода по току от плотности тока // XL Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной конференции в 9 томах. Москва, 7-11 апреля 2014 г. М.: МАТИ, 2014. Т3, 180с. С. 140-141.

10. Volgin V., Do D., Davydov A. Modeling of wire electrochemical machining // Program & Book of Abstracts 10th European Symposium on Electrochemical Engineering (10th ESEE) Chia, Sardinia, Italy. 2014. P. 47.

11. До Ван Донг. Методика проектирования операций электрохимического проволочного вырезания // Сб. трудов II региональной НТК «Высокие и критические электро- и нанотехнологии». Тула. ТулГУ. 2014. С.22-29.

Изд. Лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 2015

Формат бумаги 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

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

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

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 97а.