

УДК 621.9.047

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТОМ

В. П. ЖИТНИКОВ¹, Н. М. ШЕРЫХАЛИНА², А. О. ЧУКАЛОВА³, А. А. СОКОЛОВА⁴

¹zhitnik@mail.ru, ²n_sher@mail.ru, ³nasya-chyk@mail.ru, ⁴alexandrakrasich@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 21.12.2016

Аннотация. Разработан алгоритм численного моделирования электрохимической обработки на примере задачи прорезания пазов эллипсоидальным электрод-инструментом. Проведен вычислительный эксперимент с различными способами задания сетки узловых точек на анодной поверхности. Проведены исследования для эллипсоидального электрод-инструмента с различными соотношениями полуосей и различной продолжительностью процесса. Проведена оценка погрешности с использованием численных данных, полученных для сеток с разным числом узлов и разной величины шага по времени.

Ключевые слова: нестационарный процесс, метод граничных элементов, равномерная сетка.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим нестационарную задачу электрохимической обработки (ЭХО) с помощью электрод-инструмента (ЭИ) некоторой формы. ЭИ движется внутри заготовки со скоростью V_{et} под некоторым углом α к оси абсцисс. Начальное отверстие в заготовке имеет некоторую форму, разность потенциалов между электродами равна U . Форма межэлектродного пространства (МЭП) показана на рис. 1.

Процесс электрохимического растворения определяется законами Фарадея и Ома [1]

$$V_{ecm} = k\eta E, \quad E = j/\kappa, \quad k = \kappa\varepsilon/\rho, \quad (1)$$

где E , j – напряженность и плотность тока на границе анода; κ – электропроводность электролита; $\eta = \eta(j)$ – выход по току; ε – электрохимический эквивалент; ρ – плотность растворяемого материала.

При моделировании ЭХО будем использовать определенные допущения, позволяющие разработать модели, которые могут быть исследованы с помощью современных компьютерных средств. Электрическое поле считается потенциальным и соленоидальным. Отсюда следует, что потенциал $\Phi(X, Y)$ удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta\Phi = 0$.

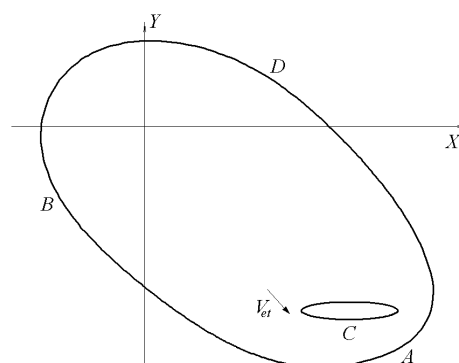


Рис. 1. Схема МЭП:

ADB – обрабатываемая поверхность (анод);
C – ЭИ (катод)

Для задач ЭХО границы, как правило, бывают двух типов: непроницаемые (поверхности изолированных частей электродов) и рабочие поверхности электродов. На непроницаемых границах и границах, являющимися линиями тока, нормальная составляющая напряженности

$$E_n = \frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0. \quad (2)$$

На границах, соответствующих электродам, величина потенциала на аноде и катоде

$$\Phi_a = 0, \quad \Phi_c = -U. \quad (3)$$

При решении нестационарной задачи граница ЭИ движется, как показано на рис. 1 со скоростью V_{et} . Граница детали также подвижна, нормальная скорость ее движения определяется уравнением (1).

Формулировка нестационарных задач

Перейдем к безразмерным величинам. Для этого из (1) определяется величина стационарного зазора l в задаче об обработке плоским горизонтальным ЭИ

$$V_{et} = V_{ecm} = kE_n = k \frac{U}{l}, \quad l = \frac{kU}{V_{et}}. \quad (4)$$

Безразмерные величины x , y , τ и φ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= X/l, \quad y = Y/l, \\ \tau &= \frac{V_{et}}{l} t = \frac{V_{et}}{kU/V_{et}} t = \frac{kU}{l^2} t, \quad \varphi = \Phi/U. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом

$$v_{et} \cos \alpha = -\frac{dy_c}{d\tau} = -\frac{1}{V_{et}} \frac{dY_c}{dt} = \cos \alpha, \quad v_{et} = 1. \quad (6)$$

Представим (1) в безразмерном виде

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial n} n. \quad (7)$$

Здесь $\gamma = (x_a(p, \tau), y_a(p, \tau))$ – вектор-функция, задающая обрабатываемую поверхность; $x_a(p, \tau)$, $y_a(p, \tau)$ – координаты точки на обрабатываемой поверхности; p – параметр, определяющий положение точки на обрабатываемой поверхности; n – единичный вектор внешней нормали к поверхности обрабатываемой заготовки.

Перемещение ЭИ в процессе обработки можно определить следующим образом:

$$\frac{dx_c}{dt} = \cos \alpha, \quad \frac{dy_c}{dt} = \sin \alpha \quad (8)$$

(на рис. 1 предполагается, что $\alpha < 0$).

При численном решении безразмерное время дискретизируется, т. е. разбивается на некоторое количество шагов, на каждом шаге решается краевая задача для уравнения Лапласа

$$\Delta \varphi = 0 \text{ с условиями } \varphi_a = 0, \quad \varphi_c = -1. \quad (9)$$

При этом определяются нормальные производные $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$. Далее, согласно (7) и (8), производится шаг по времени (например по методу Эйлера)

$$\Delta x_c = \cos \alpha \cdot \Delta t, \quad \Delta y_c = \sin \alpha \cdot \Delta t, \quad (10)$$

$$\Delta x_a = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cos \theta_a^n \cdot \Delta t, \quad \Delta y_a = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \sin \theta_a^n \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где θ_a^n – угол наклона внешней нормали к поверхности анода.

Далее процесс повторяется.

Известны решения задач ЭХО, полученные

на основе методов конечных разностей и конечных элементов [2–4], граничных элементов [5–8]. Тем не менее, возникает много вопросов о погрешностях полученных численных решений.

Метод граничных элементов

Решение краевой задачи для уравнения Лапласа с граничными условиями первого рода (9) на основе интеграла Грина сводится к граничному интегральному уравнению [7, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \varphi(\zeta) &= \frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} \frac{1}{r(\zeta, \xi)} \frac{\partial r}{\partial n} \varphi(\xi) d\Gamma + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} \ln \frac{1}{r(\zeta, \xi)} \frac{\partial \varphi(\xi)}{\partial n} d\Gamma, \quad \forall \zeta \in \Gamma, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\zeta = (X, Y)$ – точка наблюдения, $\xi = (X, Y)$ – точка расположения источника; $r(\zeta, \xi)$ – расстояние между точкой наблюдения и источником.

Для решения интегрального уравнения (12) будем использовать метод граничных элементов. Для упрощения расчетов, следуя [7], будем использовать постоянные граничные элементы, в которых потенциал и напряженность электрического поля имеют постоянные значения.

Разобьем границу Γ на n прямолинейных граничных элементов. Расчетные точки (узлы) расположим в середине граничного элемента. Дискретная форма уравнения (12) будет иметь вид

$$\frac{1}{2} \varphi_k = \sum_{m=1}^n F_{km} \varphi_m + \sum_{m=1}^n G_{km} \varphi'_m, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} G_{km} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_m} \ln \frac{1}{r(\zeta_k, \xi)} d\Gamma, \\ F_{km} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_m} \frac{1}{r(\zeta_k, \xi)} \frac{\partial r}{\partial n} d\Gamma \end{aligned} \quad (14)$$

(при наличии особенности во втором интеграле в (14) берется его главное значение). Интегралы, входящие в (14), вычисляются точно.

Пусть расстояния от середины k -го элемента до начала и конца m -го элемента равны r_{km}^b и r_{km}^e , θ_{km}^b ; θ_{km}^e – углы между отрезками, соединяющими середину k -го граничного элемента с начальной и конечной точкой m -го граничного элемента, соответственно, и внешней нормалью к m -му граничному элементу при прохождении границы в положительном направлении (таким образом, что область межэлектродного пространства всегда находится слева), l_m – длина

m -го граничного элемента. При этих обозначениях значения коэффициентов G_{km} и F_{km} в (13) равны

$$G_{km} = -\frac{1}{2\pi} \left(r_{km}^e \sin \theta_{km}^e (\ln r_{km}^e - 1) - r_{km}^b \sin \theta_{km}^b (\ln r_{km}^b - 1) + r_{km}^b \cos \theta_{km}^b (\theta_{km}^e - \theta_{km}^b) \right), \quad m \neq k, \\ G_{km} = \mp \frac{1}{2\pi} l_m \left(\ln \frac{l_m}{2} - 1 \right), \quad m = k, \quad (15)$$

$$F_{km} = \frac{1}{2\pi} \begin{cases} \theta_{km}^e - \theta_{km}^b, & m \neq k, \\ 0, & m = k. \end{cases} \quad (16)$$

Знак « \mp » в (15) выбирается при проходе вдоль анода (против часовой стрелки), « $+$ » выбирается при проходе вдоль катода (по часовой стрелке).

Подставляя в систему уравнений (13) граничные условия постоянства потенциала на катоде и аноде, получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для расчета нормальных производных на элементах

$$\sum_{m=1}^n G_{km} \phi_m = \frac{1}{2} \phi_k - \sum_{m=1}^n F_{km} \phi_m, \quad k = \overline{1, n}. \quad (17)$$

Алгоритм решения задачи

Как было указано выше, разобьем границы анода и катода на n_1 и n_2 прямолинейных граничных элементов соответственно. Координаты начальных и конечных точек этих элементов

$$\begin{cases} (x_m^b, y_m^b), & m = \overline{1, n_1 + n_2}, \\ (x_m^e, y_m^e), & m = \overline{1, n_1 + n_2}, \end{cases}$$

при этом

$$x_m^b = x_{m-1}^e, \quad y_m^b = y_{m-1}^e (y_m^b), \\ m = \overline{2, n_1 + n_2}, \quad (m \neq n_1 + 1), \quad (18)$$

$$x_1^b = x_{n_1}^e, \quad y_1^b = y_{n_1}^e (y_m^b)$$

$$x_{n_1+1}^b = x_{n_1+2}^e, \quad y_{n_1+1}^b = y_{n_1+2}^e.$$

Здесь элементы пронумерованы последовательно, сначала анод, затем катод, при этом сохраняется положительное направление обхода.

Координаты середин элементов:

$$(x_m^c, y_m^c) = \left(\frac{x_m^b + x_m^e}{2}, \frac{y_m^b + y_m^e}{2} \right), \\ m = \overline{1, n_1 + n_2}. \quad (19)$$

Подставляя в систему уравнений (17) граничные условия постоянства потенциала на аноде и катоде (9), получим СЛАУ для расчета нормальных производных на элементах

$$\sum_{m=1}^{n_1+n_2} G_{km} \phi_m = 0 + \sum_{m=n_1+1}^{n_1+n_2} F_{km} = 0, \quad k = \overline{1, n_1}, \\ \sum_{m=1}^{n_1+n_2} G_{km} \phi_m = -\frac{1}{2} + \sum_{m=n_1+1}^{n_1+n_2} F_{km} = -1, \\ k = \overline{n_1+1, n_1+n_2}. \quad (20)$$

Матрица СЛАУ – заполненная, поэтому для решения задачи можно применить, например, метод Гаусса.

Полученные значения нормальных производных используются на следующих шагах алгоритма решения нестационарной задачи.

Способ сдвига узлов заключается в первоначальном сдвиге угловых точек полигона (рис. 2).

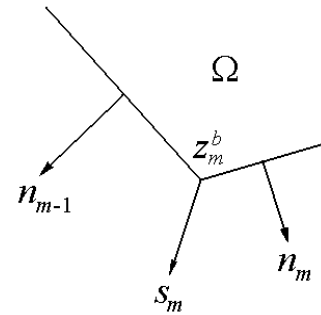


Рис. 2. Сдвиг вершин полигона

При этом сдвиг проводится по средневзвешенным значениям напряженностей и углов

$$\theta_m^{av} = \frac{l_{m-1} \theta_{m-1}^n + l_m \theta_m^n}{l_{m-1} + l_m}, \quad m = \overline{2, n_1}, \\ \theta_1^{av} = \frac{l_{n_1} \theta_{n_1}^n + l_1 \theta_1^n}{l_{n_1} + l_1}. \quad (21)$$

$$\phi_m^{av} = \frac{l_{m-1} \phi_{m-1}' + l_m \phi_m'}{l_{m-1} + l_m}, \quad m = \overline{2, n_1}, \\ \phi_1^{av} = \frac{l_{n_1} \phi_{n_1}' + l_1 \phi_1'}{l_{n_1} + l_1}. \quad (22)$$

Формула шага по методу Эйлера аналогична (11)

$$\Delta x_m^e = \phi_m^{av} \cos \theta_m^{av} \cdot \Delta t, \\ \Delta y_m^e = \phi_m^{av} \sin \theta_m^{av} \cdot \Delta t, \quad m = \overline{1, n_1}. \quad (23)$$

Затем применяются формулы (18), (19) для вычисления $x_m^b, y_m^b, x_m^c, y_m^c$.

Тестирование алгоритма и программы

Рассмотрим задачу об эллипсе внутри эллипса (рис. 3, а).

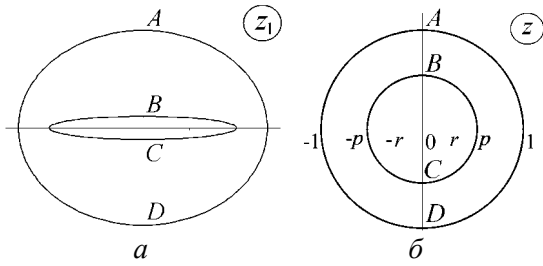


Рис. 3. Образы МЭП в задаче об эллипсе внутри эллипса: *a* – физическая плоскость; *б* – параметрическая плоскость

Задача решена в параметрическом виде в [10]. В качестве параметрической плоскости выбирается кольцо плоскости z (рис. 3, б)

$$z_1(z) = \frac{g}{2} \left(\frac{z}{r} + \frac{r}{z} \right), z(z_1) = r \left(\frac{z_1}{g} + \sqrt{\frac{z_1^2}{g^2} - 1} \right) \quad r < p. \quad (24)$$

При этом

$$\varphi = -\frac{1}{\ln p} \ln |z| = -\frac{1}{\ln p} \ln \left| r \left(\frac{z_1}{g} + \sqrt{\frac{z_1^2}{g^2} - 1} \right) \right|,$$

$$\bar{E} = -\frac{1}{\ln p} \frac{1}{\sqrt{z_1^2 - g^2}}.$$

На рис. 4 приведены результаты фильтрации [11, 12] решения системы уравнений (20). Показаны значения $\partial\varphi_a/\partial n$ и $\partial\varphi_c/\partial n$ в точках с наибольшей погрешностью.

Чтобы улучшить результат вычисления напряженности, используется следующее распределение узлов на катоде

$$z_m = e^{i\sigma_m}, \quad m = \overline{n_1 + 1, n_1 + n_2},$$

$$\sigma_m = \pi \left(\arctg \beta - \arctg \left(\beta - 2\beta \frac{m}{n_1} \right) \right) / \arctg \beta. \quad (25)$$

На рис. 4 приведены результаты расчетов при $\beta=5$ для отношения полуосей катода $k_1=0.1$. Оценка погрешности показывает 4 верных знака на аноде и 3 знака на катоде для $n=320$, что вполне приемлемо для расчетов.

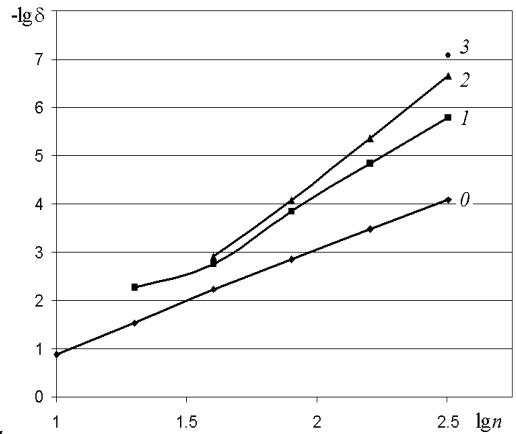
Вычислительный эксперимент

Зададим начальную форму МЭП в соответствии с (24) (эллипс в эллипсе, см. рис 3, а). Зададим отношение полуосей внутреннего эллипса (ЭИ)

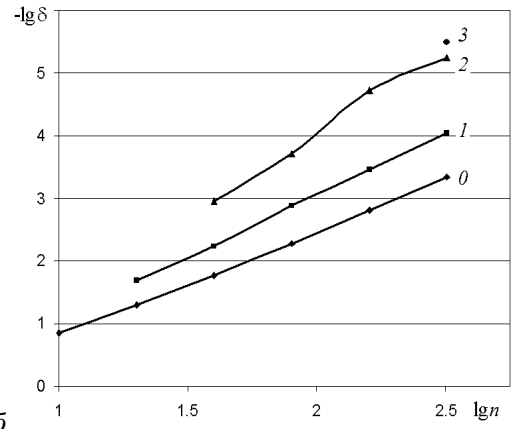
$$k_1 = \frac{\text{Im } z_1(ip)}{\text{Re } z_1(p)} = \frac{p^2 - r^2}{p^2 + r^2}, \quad (26)$$

а также отношение больших полуосей внешнего и внутреннего эллипса

$$k_2 = \frac{\text{Re } z_1(1)}{\text{Re } z_1(p)} = p \frac{r^2 + 1}{p^2 + r^2}. \quad (27)$$



a



б

Рис. 4. Результаты вычисления напряженности: *a* – на аноде; *б* – на катоде

Величину g выберем так, чтобы полуширина внутреннего эллипса равнялась заданному значению L

$$g = L \frac{2r}{r^2 + 1}. \quad (28)$$

Решая систему уравнений (26), (27), найдем r и p :

$$r = p \sqrt{\frac{1-k_1}{1+k_1}}, \quad p = \frac{k_2 - \sqrt{k_2^2 - 1 + k_1}}{1 - k_1}. \quad (29)$$

На рис. 5 представлены результаты численного решения задачи для $\alpha=-\pi/2$ (движение ЭИ вертикально вниз) $L=1$; $k_2=1,5$; $n=320$; $k_2=1,5$; $k_1=0,1$. При расчете шаг по безразмерному времени $\Delta\tau=0,01$, на рисунке показаны конфигурации при $\tau_j = 0, 1, 2, \dots, 10$.

При увеличении τ видно расхождение узлов, что приводит к потере точности и устойчивости решения.

На рис. 6 приведены результаты расчетов процесса при движении ЭИ вниз под углом $-\pi/4$ со сгущением узлов на аноде по формуле (25) при $\beta=5$. Несмотря на начальное сгущение узлов их расхождение с течением времени ухудшает результаты расчетов.

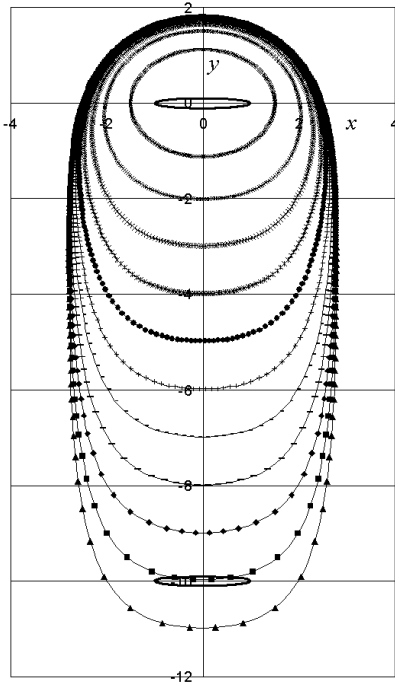


Рис. 5. Обработка эллипсоидальным ЭИ при движении вниз при $k_1=0,1$.

Шаг по времени $\Delta\tau=1$, $\tau_{\max} = 10$

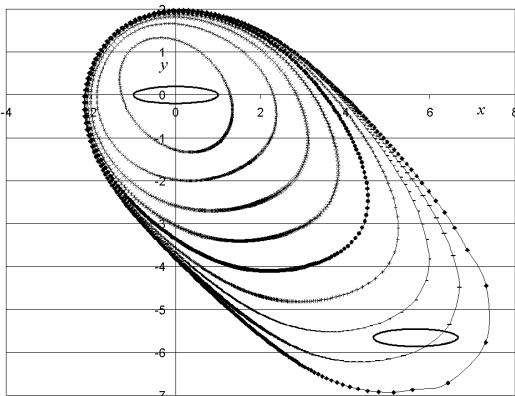


Рис. 6. Обработка эллипсоидальным ЭИ при движении под углом для $k_1=0,2$ со сгущением ($\beta = 5$).

Шаг по времени $\Delta\tau=1$, $\tau_{\max} = 8$

Поэтому было решено использовать равномерное по длине $l(s)$ разбиение анодной границы.

При совершении шага очередная конфигурация x_m, y_m $m = \overline{0, n}$ интерполируется сплайнами (отдельно $x(s)$, $y(s)$ и $l(s)$ – длина участка границы, отсчитываемая от 0-й точки; изначально $s_m = m$), задается положение узлов l_m , и решаются уравнения по определению параметра $s = s_m$, при котором $l(s_m) = l_m$. Координаты m -го узла с помощью сплайнов заменяются на $x_m^e(s_m), y_m^e(s_m)$. Рис. 7 показывает существенное улучшение картины.

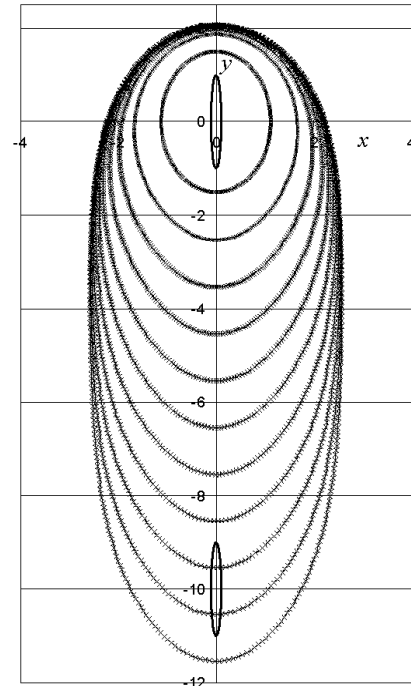


Рис. 7. Обработка эллипсоидальным ЭИ для $k_1=0,1$.

Шаг по времени $\Delta\tau=1$, $\tau_{\max} = 10$

Это позволяет расширить диапазон исследуемого времени процесса. На рис. 8 диапазон расширен в 10 раз. За счет удлинения границы анода узлы расходятся, однако это не носит такого катастрофического характера, как без регулирования положения узлов в процессе решения.

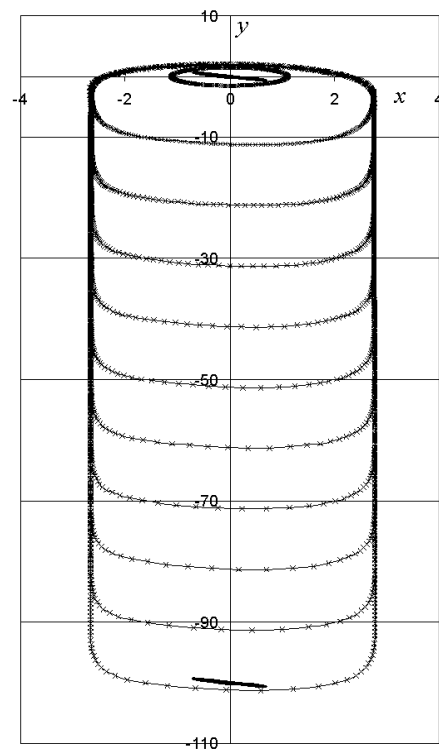


Рис. 8. Обработка эллипсоидальным ЭИ для $k_1=0,1$ под наклоном $\pi/4$.

Шаг по времени $\Delta\tau=10$, $\tau_{\max} = 100$

Чтобы найти границы диапазона τ_{\max} , в котором можно производить вычисления по этой схеме, был произведен эксперимент по увеличению τ_{\max} в два раза. При $\tau_{\max} = 100$ погрешность визуально не обнаруживается (рис. 9), но при $\tau > 100$ в нижней части картины возникает расширение, увеличивающееся с возрастанием τ (рис. 10).

Для визуализации погрешности на рис. 11 изображены участки анодной границы в измененном масштабе. На рис. 11, а ($\tau_{\max} = 100$) расширение границы не превышает 1%, на рис. 11, б ($\tau_{\max} = 200$) около 4% (в отношении к полуширине паза). Для большей наглядности на рис. 12, а картина растянута в ширину. Цифрой 1 обозначено решение для $\tau_{\max} = 100$; цифрой 2 – $\tau_{\max} = 200$. Становится видным колебание границы для $\tau_{\max} = 200$. Было отмечено, что в связи с начальной погрешностью (порядка 10^{-16}) вычисления x -координаты первой точки сетки возникает ненулевая проекция вектора напряженности на ось x , увеличивающая сдвиг точки в ту же сторону при шаге по времени. При длительном процессе сдвиг существенно увеличивается, и первая точка смещается на боковую часть границы.

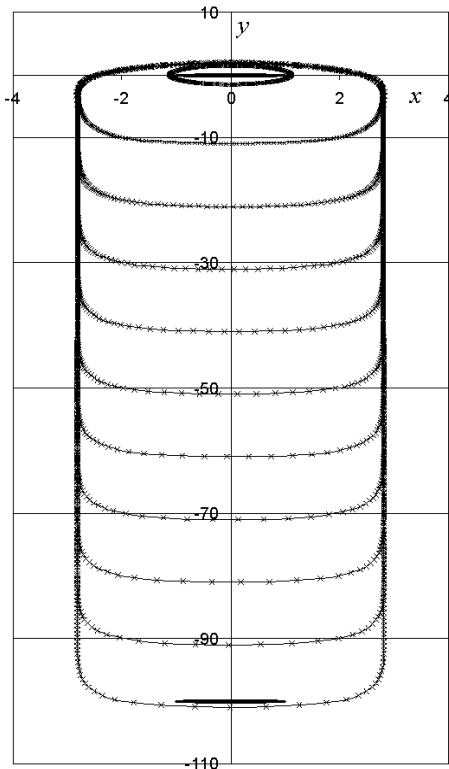


Рис. 9. Обработка эллипсоидальным ЭИ для $k_1=0,1, \Delta\tau=10, \tau_{\max} = 100$

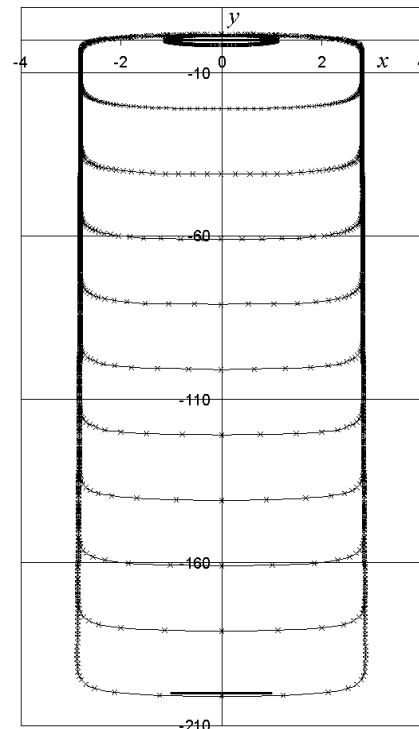
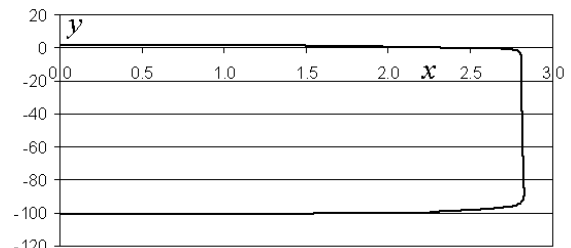
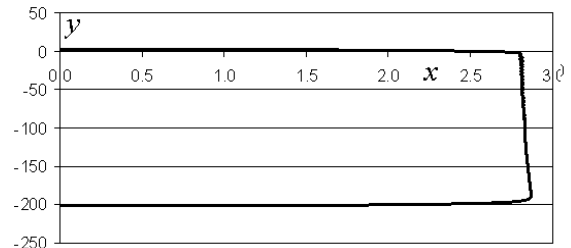


Рис. 10. Обработка эллипсоидальным ЭИ для $k_1=0,1, \Delta\tau=20, \tau_{\max} = 200$



а



б

Рис. 11. Визуализация погрешности: а – $\tau_{\max} = 100$; б – $\tau_{\max} = 200$

Фиксация первой точки позволяет существенно уменьшить осцилляцию (кривая 3 на рис. 12, а).

На рис. 12, б совмещены нижние части кривых для $\tau_{\max} = 100$ (кривая 1) и $\tau_{\max} = 200$ (кривая 2). Отстояние кривых друг от друга в этом месте не превышает 5% (в отношении к вертикальному зазору).

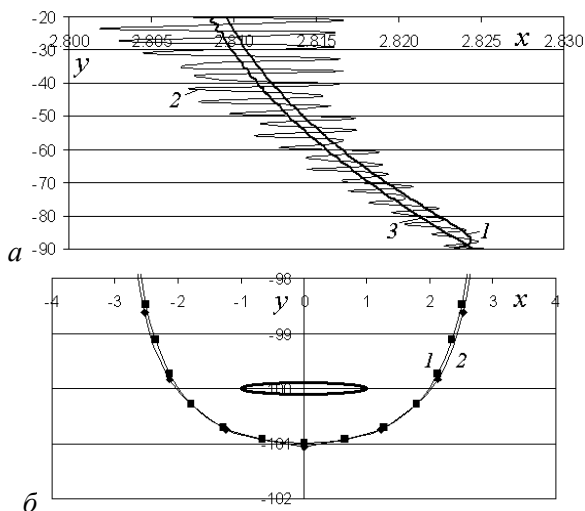


Рис. 12. Визуализация погрешности:
a – средняя часть кривых;
б – нижняя часть кривых ($\tau_{\max} = 100$)

Для оценки погрешности были проведены расчеты с разным числом элементов $n = n_1 = n_2$ и разными шагами по времени $\Delta\tau$. Поскольку основные расчеты проводились при $n=320$, $\Delta\tau = 0,01$, то проводилось последовательное уменьшение n в два раза и синхронное увеличение $\Delta\tau$ в два раза. Это позволило одновременно оценить влияние на погрешность дискретизации по пространству и времени.

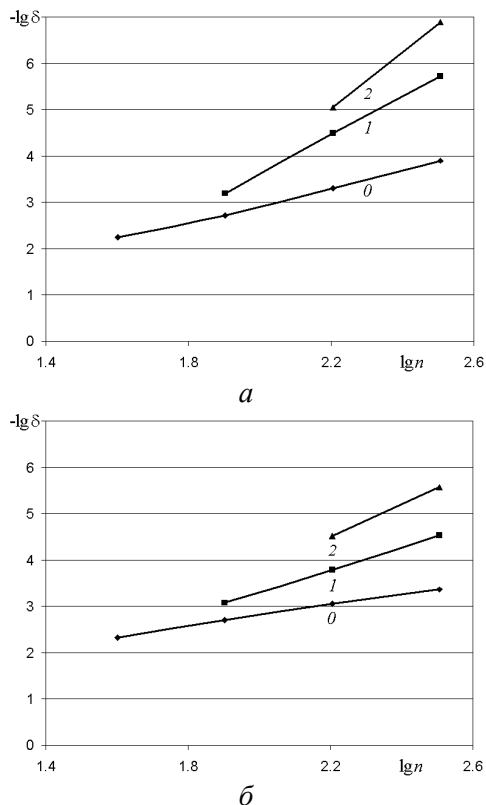


Рис. 13. Оценка погрешности при $\tau_{\max} = 10$:
a – вертикального зазора; *б* – бокового полуразмера

На рис. 13 приведены результаты фильтрации для $\tau_{\max} = 10$ двух характерных параметров: вертикального зазора и боковой полуширины паза в точке, соответствующей началу элемента с номером $n_1/4$. Буквой δ обозначена оценка относительной погрешности (в отношении к рассматриваемому параметру). Результаты фильтрации показывают, что при $\tau_{\max} = 10$ прямой расчет позволяет достичь точности 3 и более значащих цифр, фильтрация позволяет увеличить точность на 2–3 цифры.

Для $\tau_{\max} = 100$ (рис. 14) картина качественно сохраняется, однако видно, что по зазору максимальная точность немного превышает 1 значащую цифру (конкретней $\delta \approx 0,5 \cdot 10^{-1}$ или 5 % от величины зазора), а по боковому полуразмеру 2–3 знака (точнее $\delta \approx 3 \cdot 10^{-3}$). Фильтрация позволяет существенно повысить точность, в особенности по зазору.

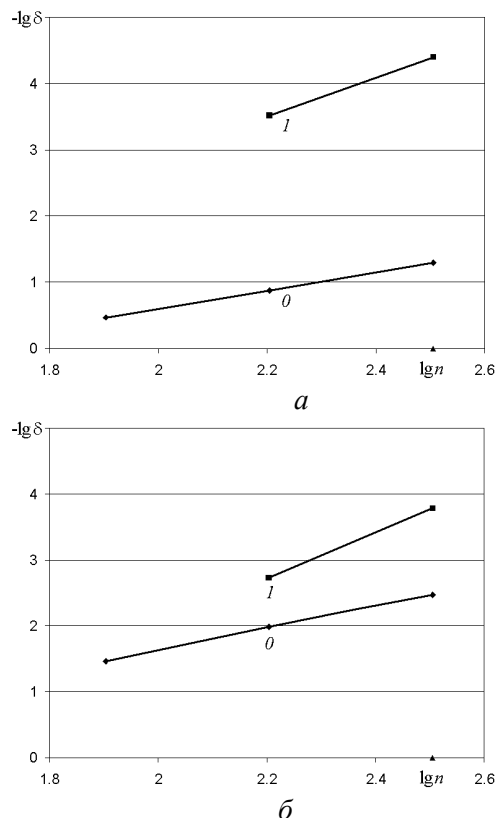


Рис. 14. Оценка погрешности при $\tau_{\max} = 100$:
a – вертикального зазора; *б* – бокового полуразмера

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен вычислительный эксперимент с различными способами задания узловых точек сетки на анодной поверхности, которая в нестационарном процессе претерпевает большие растяжения. Была выбрана равномерная сетка на

каждом шаге. Для этого после каждого шага по измененной сетке строились сплайны (отдельно по x и y), и по сплайнам восстанавливалась равномерная сетка.

С помощью этого алгоритма были проведены исследования для эллипсоидального электрод-инструмента с различными соотношениями полуосей и различной продолжительностью процесса τ_{\max} . Были получены результаты для $\tau_{\max} = 10$, $\tau_{\max} = 100$ и $\tau_{\max} = 200$.

Проведена оценка погрешности с использованием численных данных, полученных для сеток с разным числом узлов и разной величины шага по времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Клоков В. В.** Электрохимическое формообразование. Казань: Казан. ун-т, 1984. 80 с. [[V. V. Klokov "Electrochemical shaping" (in Russian), Kazan: KGU, 1984.]]
- 2. Ястребов В. Н., Каримов А. Х.** Математическое моделирование нестационарного процесса электрохимического скругления кромок деталей ГТД // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов. Казань: КАИ, 1989. Вып. 1. С. 23–34. [[V.N. Yastrebov, A. H. Karimov "Mathematical modeling of nonstationary electrochemical process of GTD parts edge rounding" (in Russian), *Electrochemical and electrical methods of materials treatment*. Kazan, KAU, vol. 1, p.23-24, 1989.]]
- 3. Мустянтц А. Н., Эрлихман Ф. М., Энгельгардт Г. Р., Дикусар А. И.** Электрохимическое формообразование в условиях локальной изоляции анодной поверхности. I. Теоретический анализ // Электронная обработка материалов. 1989. № 3. Р. 11-15. [[A. N. Mustyantse, F. M. Erlichman, G. R. Engelhardt, A. I. Dikusar "Electrochemical formation in the conditions of local isolation of the anode surface. I. Theoretical analysis", (in Russian), *Electronic treatment of materials*, no 3, pp. 11-15, 1989.]]
- 4. Christiansen S., Rasmussen H.** Numerical solutions for two-dimensional annular electrochemical machining problems // J. Inst. Maths. Applics. 1976. № 18. P. 295–307.
- 5. Volgin V. M., Davydov A. D.** Modeling of multistage electrochemical shaping. // Journal of Materials Processing Technology. 2004. V. 3. P. 466–471.
- 6. Н. М. Миназетдинов** Об одной задаче размерной электрохимической обработки // ПМТФ. 2009, т. 50, № 3. С. 214–220. [[N. M. Minazetdinov, "About one problem of dimensional electrochemical machining," (in Russian), in *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 50, no. 3, pp. 214-220, 2009.]]
- 7. Волгин В. М., До Ван Донг, Давыдов А. Д.** Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом // Изв. ТулГУ. Техническии науки. 2013. Вып. 11. С. 122–136. [[V. M. Volgin, Do Van Dong, A. D. Davydov, "Modeling of electrochemical machining by wire electrode-tool," (in Russian), *Izv. TulGU*, vol. 11, pp. 122-136, 2013.]]
- 8. Volgin V. M., Do V. D., Davydov A. D.** Modeling of wire electrochemical machining // Chem. Eng. Trans. 2014. Vol. 41. P. 91–96.
- 9. Петров А. Г.** Схема без насыщения для обтекания решетки профилей и вычисление точек отрыва в вязкой жидкости // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. Т. 51, № 7. С. 1326–1338. [[A. G. Petrov, "The scheme of cascade flow profiles without saturation and calculation of separation points in a viscous fluid", (in Russian), in *Journal of computational mathematics and physics*, vol.51, no. 7, pp. 1326-1338, 2011.]]
- 10. Житников В. П., Шерыхалина Н. М., Муксимова Р. Р.** Дополнительные главы теории функций комплексного переменного: учебное электронное издание локального доступа. Уфа: УГАТУ, 2014. 85 с. № гос. регистрации 0321402284. [[V.P. Zhitnikov, N.M. Sherykhalina, R.R. Muksimova "Additional chapters of the theory of functions of complex variable", (in Russian), *educational electronic edition of the local access*, Ufa: USATU, 2014, state registration number 0321402284.]]
- 11. Житников В. П., Шерыхалина Н. М.** Моделирование течений вязкой жидкости с применением методов многокомпонентного анализа. Уфа: Гилем. 2009. 336 с. [[V.P. Zhitnikov, N.M. Sherykhalina "Modelling of weighty fluid using multicomponent analysis methods", (in Russian). Ufa, Gilem. 2009.]]
- 12. Zhitnikov V. P., Sherykhalina N. M., Sokolova A. A.** Problem of Reliability Justification of Computation Error Estimates // Mediterranean Journ. of Soc. Sci. 2015. Vol. 6, No. 2. P. 65–78.

ОБ АВТОРАХ

ЖИТНИКОВ Владимир Павлович, проф. каф. выч. мат. и кибернетики. Дипл. инж.-физ. (МФТИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук по мех. жидкости, газа и плазмы (Казанск. ун-т, 1993). Засл. деят. науки РБ. Иссл. в обл. волн. течений жидкости, э/хим. формообразования, числ.-аналит. методов.

ШЕРЫХАЛИНА Наталия Михайловна, проф. каф. ВМиК. Дипл. инж.-системотехн. (УГАТУ, 1993). Д-р физ.-мат. наук по мат. моделированию, числ. методам и комплексам программ (УГАТУ 2012). Иссл. в обл. волновых течений жидкости, разработки числ.-аналит. методов, методов оценки погрешности и достоверности числ. результатов.

ЧУКАЛОВА Анастасия Олеговна, магистрант. Иссл. в обл. э/хим. формообразования, числ. методов.

СОКОЛОВА Александра Алексеевна, аспирант каф. выч. мат. и кибернетики. Дипл. магистр по прикладн. математике и информатике (УГАТУ, 2014). Иссл. в обл. решения задач матем. моделирования физ. процессов.

METADATA

Title: Simulation of unsteady electrochemical machining by ellipsoidal electrode tool.

Authors: V. P. Zhitnikov¹, N. M. Sherykhalina², A. O. Chukalova³, A. A. Sokolova⁴

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ⁴alexandrakrasich@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1 (75), pp. 24-32, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: An algorithm for the numerical simulation of electrochemical machining is developed. The problem of cutting by ellipsoidal electrode-tool is considered for example. Computational experiments with different ways of nodal points defining on the anode surface were carried out. The research for an ellipsoidal-electrode tool with different ratios of semi-axes and the different duration of the process was made. Error estimation using numerical data obtained for nets with different numbers of nodes and different values of the time step was done.

Key words: non-stationary process, boundary element method, uniform grid.

About authors:

ZHITNIKOV Vladimir Pavlovich, Prof., Dept. of computer science and robotics. Dipl. Engineer-physicist (Moscow Physical-Technical Inst., 1973). Cand. of Phys.-Math. Sci. (MIPT, 1984), Dr. of Phys.-Math. Sci. (KSU, 1993).

SHERYKHALINA Nataliya Mikhailovna, Prof., Dept. of computer science and robotics. Dipl. Engineer-system master (UGATU, 1993). Cand. of Phys.-Math. Sci. (BGU, 1996), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2012).

CHUKALOVA Alnastasiya Olegovna, master student.

SOKOLOVA Alexandra Alekseevna, postgraduate student. master's degree (UGATU, 2014). Dept. of computer science and robotics.