

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПЛАСТИНЧАТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

В. П. Житников¹, Р.Р. Муксимова², А. А. Соколова¹

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, Уфа,

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, Санкт-Петербург

УДК 544.641; 001.891.573

Проведено математическое моделирование электрохимической обработки вращающимся пластинчатым электродом-инструментом. Электрическое поле считалось потенциальным и соленоидальным. Для численного исследования применялся метод граничных элементов. Рассмотрена задача прорезания пазов. Исследованы особенности формообразования границ паза.

Ключевые слова: электрохимическое формообразование, прорезание пазов, уравнение Лапласа.

Введение

Для операций контурной вырезки деталей сложной формы часто используется электрохимическая обработка (ЭХО). В этом случае обычно используется электрод-инструмент (ЭИ) круглого сечения [1], [2], [3]. При этом во избежание загрязнения электролита его прокачивают вдоль ЭИ. Однако во фронтальной области межэлектродного пространства (МЭП) поверхность круглого ЭИ находится слишком близко от обрабатываемой поверхности (ОП), что замедляет движение электролита и затрудняет его обмен. Для улучшения условий обмена возможно использовать вращающийся пластинчатый ЭИ. В этом случае вращение ЭИ будет создавать условия для постоянного перемешивания электролита и его эвакуации из тыльной части МЭП.

1 Постановка задачи

Рассмотрим нестационарную задачу ЭХО с помощью пластинчатого ЭИ конечной толщины. Форма межэлектродного пространства показана на рис. 1. Центр ЭИ движется внутри заготовки со скоростью V_C вниз вдоль оси ординат. Одновременно ЭИ вращается относительно своего центра с угловой скоростью ω . Начальное отверстие в заготовке имеет некоторую форму (обычно, круглую), разность потенциалов между электродами равна U .

Процесс электрохимического растворения материала анода определяется законами Фарадея и Ома [4]

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

где $V_{есм}$ — скорость электрохимического растворения (сдвига границы); E, j — напряженность и плотность тока на границе анода; κ — электропроводность электролита; η — выход по току; ε — электрохимический эквивалент; ρ — плотность растворяемого материала.

Электрическое поле считается потенциальным и соленоидальным, поэтому потенциал $\Phi(X, Y)$ удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta\Phi = 0$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-07-00356).

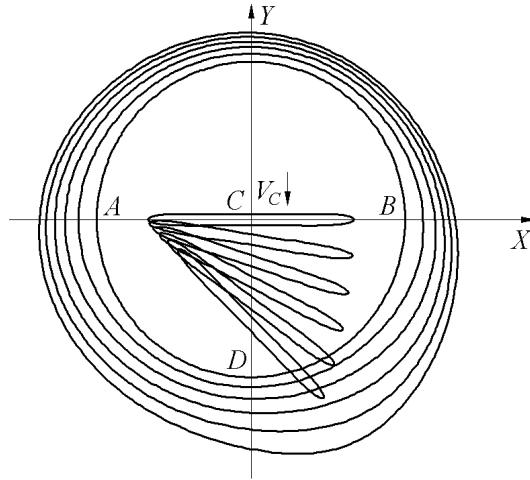


Рис. 1: Схема МЭП: ADB — обрабатываемая поверхность (анод); C — ЭИ (катод)

На границах, соответствующих электродам, значения потенциала на аноде и катоде равны

$$\Phi_a = 0, \quad \Phi_c = -U. \quad (2)$$

Перейдем к безразмерным величинам. Безразмерные величины x , y , τ и φ определяются следующим образом

$$x = \frac{X}{l}, \quad y = \frac{Y}{l}, \quad \tau = \frac{V_C}{l} t = \frac{kU}{l^2} t, \quad \varphi = \frac{\Phi}{U}, \quad (3)$$

где $l = kU/V_C$ — величина стационарного зазора в задаче об обработке плоским горизонтальным ЭИ.

Центр ЭИ движется, как показано на рис. 1 со скоростью V_C . При этом

$$v_C = -\frac{dy_C}{d\tau} = -\frac{1}{V_C} \frac{dY_C}{dt} = 1. \quad (4)$$

Граница детали также подвижна, нормальная скорость ее движения определяется уравнением (1). Представим (1) в безразмерном виде

$$\frac{dx_a}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cos n, \quad \frac{dy_a}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \sin n. \quad (5)$$

Здесь $x_a(\tau)$, $y_a(\tau)$ — координаты точек на ОП; n — единичный вектор внешней нормали к ОП.

Перемещение точек поверхности ЭИ в процессе обработки можно определить следующим образом:

$$x_c(\tau) = \operatorname{Re} \left[(x_c^0 + iy_c^0) e^{i\alpha(\tau)} \right], \quad y_c(\tau) = -\tau + \operatorname{Im} \left[(x_c^0 + iy_c^0) e^{i\alpha(\tau)} \right], \quad (6)$$

где x_c^0 , y_c^0 — координаты точек на исходной поверхности ЭИ (при $\tau = 0$); $\alpha(\tau) = -\omega\tau$ — угол поворота ЭИ вокруг своей оси относительно начального положения (на рис. 1 α изменяется от 0 до $-\pi/2$).

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

$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{с условиями} \quad \varphi_a = 0, \quad \varphi_c = -1. \quad (7)$$

При этом определяются нормальные производные $\partial \varphi / \partial n$. Далее, согласно (5) и (6), производится шаг по времени (например, по методу Эйлера). Далее процесс повторяется.

2 Метод граничных элементов

Решение краевой задачи для уравнения Лапласа с граничными условиями первого рода (7) на основе интеграла Грина сводится к граничному интегральному уравнению [1]

$$\frac{1}{2}\varphi(\varsigma) = \frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} \frac{1}{r(\varsigma, \xi)} \frac{\partial r}{\partial n} \varphi(\xi) d\Gamma + \frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} \ln \frac{1}{r(\varsigma, \xi)} \frac{\partial \varphi(\xi)}{\partial n} d\Gamma, \quad \forall \varsigma \in \Gamma, \quad (8)$$

где ς — точка наблюдения, ξ — точка расположения источника; $r(\varsigma, \xi)$ — расстояние между точкой наблюдения и источником; Γ — граница области, проходима так, что область находится слева.

Для решения интегрального уравнения (8) будем использовать метод граничных элементов. Для упрощения расчетов, следуя [1], будем использовать постоянные граничные элементы, в которых напряженность электрического поля имеет постоянные значения. При этом граница Γ разбивается на n прямолинейных элементов.

3 Результаты исследований

На рис. 2 и 3 приведены формы границ для различных значений круговой частоты ω вращения ЭИ для $\tau = 0, 2, 4, \dots, 20$. Видно, что для малых частот левая боковая граница паза приобретает существенную волнообразность формы, причем максимальная амплитуда волн наблюдается при $\omega \approx \pi/8$. При $\omega \geq \pi/2$ волнообразность практически исчезает.

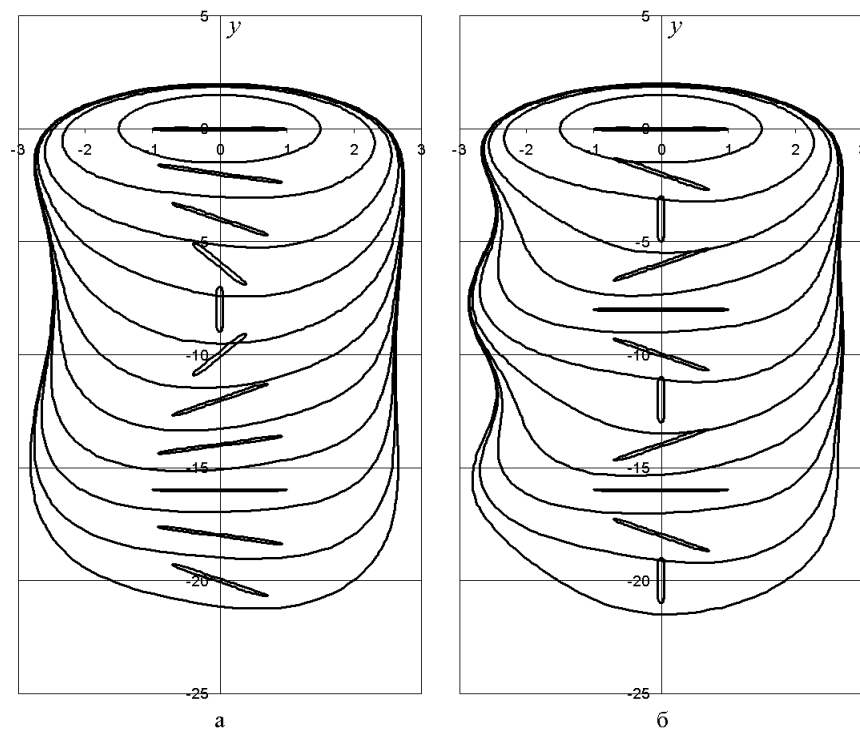


Рис. 2: Формы обрабатываемой поверхности: а — $\omega = \pi/16$; б — $\omega = \pi/8$

Явление образования волнообразной формы боковой части ОП можно объяснить следующим образом. При прохождении левой части зоны обработки кромка ЭИ движется вверх, поскольку ЭИ вращается по часовой стрелке, но центр ЭИ движется вниз. Тем самым, скорость движения кромки ЭИ относительно ОП уменьшается, и количество растворенного материала в левой части ОП увеличивается. При углах наклона ЭИ к оси x , близких к πn ($n = 1, 2, \dots$), можно определить мгновенный центр вращения ЭИ C_t (рис. 4).

Расстояние L от C_t до центра ЭИ C_{et} определяется из уравнения

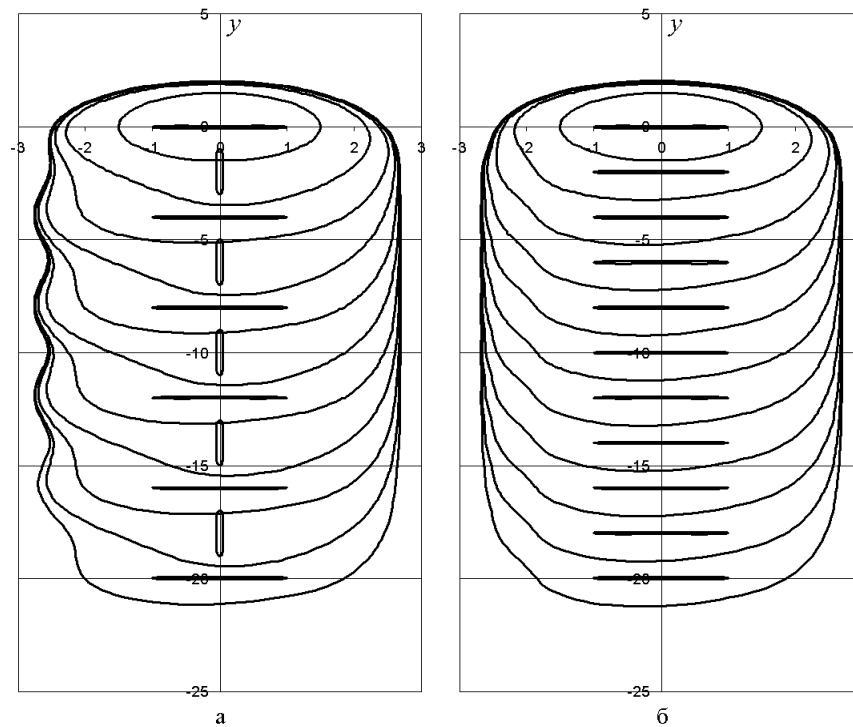
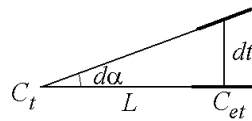
Рис. 3: Формы обрабатываемой поверхности: а — $\omega = \pi/4$; б — $\omega = \pi/2$ 

Рис. 4: К определению положения центра вращения ЭИ

$$-tg(d\alpha) \approx -d\alpha = \frac{dt}{L}.$$

Отсюда при $d\alpha = -\omega dt$ найдем $L = 1/\omega$.

Существует значение ω , при котором центр вращения находится на левой границе ОП. При $\omega = \pi/8$ величина L равна 2.55, что, судя по рис. 3,б, приблизительно соответствует полуширине невозмущенного паза. Это же значение приблизительно соответствует максимальной амплитуде волны, что подтверждается вычислительным экспериментом (рис. 2, 3). При увеличении ω время прохождения центра вращения пропорционально уменьшается, но уменьшается и период волны на ОП, что компенсирует и то, и другое. Поэтому наблюдаемый факт образования волнообразной формы левой границы максимальной амплитуды можно объяснить наиболее сильным “замиранием” кромки ЭИ вблизи левой части ОП при расположении мгновенного центра вращения ЭИ на границе ОП.

Заключение

С помощью вычислительного эксперимента было исследовано формообразование границ паза при различных значениях угловой скорости ω вращения ЭИ. Эксперимент показал, что левая граница прорезаемого паза при малых частотах вращения по часовой стрелке приобретает волнообразную форму. При некотором значении ω амплитуда волн имеет максимальное значение. Это было объяснено совпадением мгновенного центра вращения ЭИ, совершающего вращательное движение с одновременным поступательным движением его

центра, с некоторой точкой на ОП. Это способствует наиболее длительному нахождению кромки ЭИ вблизи ОП и увеличению количества растворяемого материала в локальной зоне вблизи кромки.

Список литературы

- [1] Волгин В. М., До Ван Донг, Давыдов А. Д. Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2013. V. 11. С. 122–136.
- [2] Volgin V. M., Do V. D., Davydov A. D. Modeling of wire electrochemical machining. // Chem. Eng. Trans. 2014. V. 41, pp. 91–96.
- [3] Житников В.П., Муксимова Р.Р., Зарипов А.А. Моделирование прецизионной нестационарной электрохимической обработки круглым и пластинчатым электрод-инструментом // Вестник УГАТУ. 2015. V. 19, iss. 1 (67). С. 92–99.
- [4] Клоков В. В. Электрохимическое формообразование. Казань: Изд-во Казан. ун-та. 1984.

*Владимир Павлович Житников — д.ф.-м.н., проф. Уфимского
государственного авиационного технического университета;
e-mail: zhitnik@mail.ru;*

*Роза Равиловна Муксимова — к.т.н., доцент Санкт-Петербургского
государственного университета гражданской авиации;
e-mail: rose.r.muk@gmail.com;*

*Александра Алексеевна Соколова — аспирант Уфимского
государственного авиационного технического университета;
e-mail: alexandrakrasich@gmail.com.*

Дата поступления — 19 мая 2017 г.