

УДК 621.9.047:004.02

ПРЕДЕЛЬНО-КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ КОПИРОВАНИЕ КРУГЛОГО ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТА

В. П. ЖИТНИКОВ¹, Н. М. ШЕРЫХАЛИНА², А. А. СОКОЛОВА³

¹zhitik@mail.ru, ²n_sher@mail.ru, ³alexandrakrasich@gmail.com

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

Поступила в редакцию 21.12.2016

Аннотация. Решается задача моделирования нестационарной электрохимической обработки электрод-инструментом круглой формы. Для моделирования процесса анодного растворения используется ступенчатая функция выхода по току в предельном случае. При этом на обрабатываемой поверхности образуются две зоны. В зоне активного растворения плотность тока равна критической. Во второй зоне растворение отсутствует, и поверхность сохраняет первоначальную форму. Для решения задачи применяются конформные отображения. Получены численные результаты, позволяющие определить форму обрабатываемой поверхности в различные моменты времени. Показано, что в предельном режиме точность копирования намного выше, чем при постоянном выходе по току.

Ключевые слова: квазистационарное решение, выход по току, скачкообразная функция.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование электрохимической обработки (ЭХО) основано на законе Фарадея, согласно которому скорость растворения $V_{есл}$ равна [1]

$$V_{есл} = \frac{k}{\kappa} \eta j, \quad k = \kappa \varepsilon / \rho,$$

где ε – электрохимический эквивалент; ρ – плотность растворяемого материала; κ – электропроводность электролита; j – плотность тока на анодной границе; $\eta = \eta(j)$ – выход по току (доля тока, участвующего в реакции растворения металла).

В данной работе зависимость выхода по току от плотности тока моделируется ступенчатой функцией [2]

$$\eta(j) = \begin{cases} \eta_0, & j > j_1, \\ \forall \eta \in [0, \eta_0], & j = j_1, \\ 0, & j < j_1. \end{cases} \quad (1)$$

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

Рассматриваются режим обработки, называемый предельно квазистационарным, при котором в каждой точке обрабатываемой поверхности (анода), где происходит растворение, $j = j_1$, а η может изменяться от η_0 до нуля или какой-то минимальной величины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу электрохимической обработки с помощью электрод-инструмента (ЭИ) круглой формы (рис. 1, а). ЭИ заглабляется в изначально плоскую заготовку со скоростью $V_{ет}$ перпендикулярно к поверхности. Форма межэлектродного пространства (МЭП) показана на рис. 1, б. Здесь FA' и GB' – берега условного разреза, проведенного по линии тока, уходящей на бесконечность (т.е. A, A', B, B' – одна точка, удаленная на бесконечность). Начальный межэлектродный зазор (расстояние CD) равен S_0 , разность потенциалов между электродами равна U .

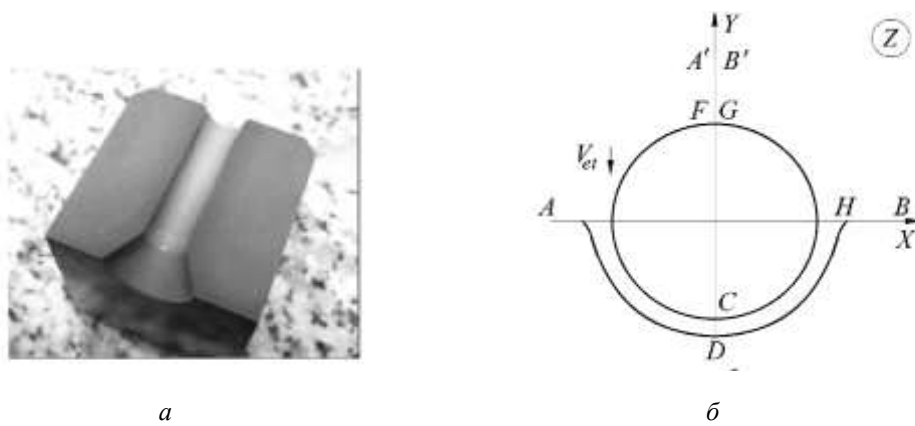


Рис. 1. Копирование круглого ЭИ: *a* – экспериментальный образец; *б* – расчетная схема (физическая плоскость *Z*), *FCG* – ЭИ (катод); *ADB* – обрабатываемая поверхность (анод)

На плоскости комплексного потенциала $W = \phi + i\psi$ эквипотенциальным поверхностям катода *FCG* и анода *ADB* соответствуют вертикальные отрезки $\phi = -U$ и $\phi = 0$ соответственно (рис. 2). Линиям тока *FA'* и *GB'* соответствуют горизонтальные отрезки. Тем самым, образом области МЭП является прямоугольник.

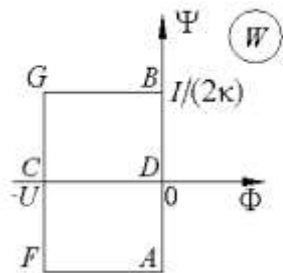


Рис. 2. Образ межэлектродного пространства на плоскости комплексного потенциала

Конформно отобразим область МЭП на полукольцо плоскости ζ (рис. 3).

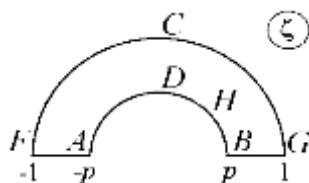


Рис. 3. Образ МЭП на параметрической плоскости ζ

Тогда связь плоскостей ζ и W осуществляется функцией

$$W = \frac{U}{\ln p} \ln \zeta - U - i \frac{U}{\ln p} . \quad (2)$$

Перейдем к безразмерным величинам x, y, τ, w :

$$x = X/l, \quad y = Y/l, \quad \tau = \frac{V_{et}}{l} t = k\eta_0 U t / l^2, \quad w = W/U,$$

где $l = k\eta_0 U / V_{et}$ (величина стационарного зазора в задаче об обработке плоским горизонтальным ЭИ). При этом

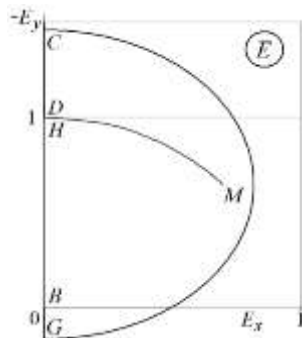
$$v_{et} = -\frac{dy_{A'}}{d\tau} = -\frac{1}{l} \frac{l}{V_{et}} \frac{dY_{A'}}{dt} = \frac{V_{et}}{V_{et}} = 1.$$

В общем случае режим обработки характеризуется числом $\alpha = \frac{E_0}{E_1} = \frac{j_0}{j_1}$, где $E_0 = V_{et} / (k\eta_0)$, $E_1 = j_1 / \kappa$. В обычном режиме $\alpha = \infty$, в предельном $\alpha = 1$. При $\alpha = 1$ достигается наивысшая степень локализации процесса растворения [3].

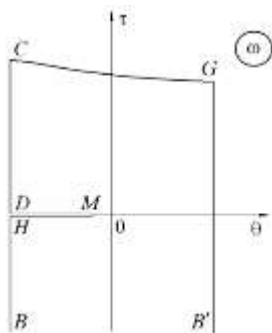
Рассмотрим случай $\alpha = 1$. На рис. 4, *a* показана плоскость годографа безразмерной напряженности $\bar{E} = dw/dz$, где ввиду симметрии изображена только правая половина области, соответствующая правой половине области плоскости z . Области анода соответствует разрез по дуге окружности $|\bar{E}| = 1$ *DMH* и части вертикальной прямой *NB* (рис. 4, *a*).

Поскольку при $|\bar{E}| < 1$ растворения не происходит, а значение $|\bar{E}| = 1$ является максимальным, на всех участках, где растворение происходит, в данном процессе $|\bar{E}| = 1$. Это позволяет получать решения, соответствующие различным моментам времени τ , не решая нестационарной задачи, т. е. квазистационарно, аналогично [4].

При $\alpha = 1$ квазистационарное решение данной задачи до определенного момента времени является точным, а не приближенным к нестационарному.



a



б

Рис. 4. Образы МЭП при квазистационарном решении для $\alpha = 1$:

a – на плоскости годографа напряженности;
 б – на плоскости логарифмического годографа;
 кривая GC – ЭИ (катод);
 $DMNB$ – обрабатываемая поверхность (анод)

Для упрощения решения рассмотрим плоскость изменения функции Жуковского (логарифмический годограф) $\omega = i \ln \frac{dw}{dz}$ (рис. 4, б).

При этом все участки границы анода представляются частями прямых, граница катода – некоторой кривой. Краевые условия для аналитической функции $\omega(\xi)$:

$$\begin{aligned} & - \operatorname{Re} \omega = \theta = -\frac{\pi}{2} \text{ на } CD \text{ и } BH; \\ & - \operatorname{Re} \omega = \theta = \frac{\pi}{2} \text{ на } B'G; \\ & - \operatorname{Im} \omega = \tau = 0 \text{ на } DMH; \\ & - |z - y_0| = r \text{ на } CG, \end{aligned} \quad (3)$$

где y_0, r – ордината центра и радиус окружности в безразмерном виде.

Метод решения задачи

Для решения задачи рассмотрим сначала область плоскости логарифмического годографа, заменив криволинейный участок границы некоторой другой кривой (рис. 5, а), т. е. снимем условие (3).

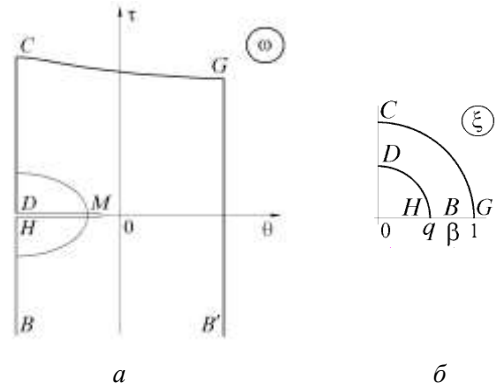


Рис. 5. Образы МЭП для вспомогательного решения:
 а – на плоскости логарифмического годографа напряженности;
 б – на параметрической плоскости ξ

Используем область параметрического переменного ξ в виде четверти кольца с соответствием точек, указанном на рис. 5, б.

Функция

$$\omega_0(\xi) = i \ln(\xi^2 - \beta^2) + iC_0 + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

отображает четверть круга плоскости ξ на вертикальную криволинейную полуполосу ω без разреза. При этом четверть кольца ξ отобразится на вертикальную полуполосу ω с выемкой (рис. 5, а). Для преобразования выемки в разрез используем ряд Лорана, который имеет нулевые значения действительной части на действительном и мнимом радиусе и нулевые значения мнимой части на окружности $\xi = e^{i\sigma}$

$$\omega_1(\xi) = i \sum_{m=1}^{\infty} c_{2m} (\xi^{2m} - \xi^{-2m}). \quad (5)$$

Примечание. При таких условиях функция $\omega_1(\xi)$ в соответствии с принципом симметрии может быть аналитически продолжена на все кольцо, и как аналитическая в кольце функция представлена в виде сходящегося ряда Лорана.

Для определения коэффициентов c_{2m} разложим логарифм в $\omega_0(\xi)$ (4) в степенной ряд при $\xi = qe^{i\sigma}$

$$\omega_0(qe^{i\sigma}) = iC_0 + 2i \ln \beta - \frac{\pi}{2} - i \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{q^{2m}}{\beta^{2m}} e^{2mi\sigma}. \quad (6)$$

Условием на участке границы $\xi = qe^{i\sigma}$ является равенство нулю мнимой части суммы

$$\begin{aligned} & \operatorname{Im}\left[\omega_0(qe^{i\sigma}) + \omega_1(qe^{i\sigma})\right] = \\ & = C_0 + 2 \ln \beta - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{q^{2m}}{\beta^{2m}} \cos 2m\sigma + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} c_{2m} (q^{2m} - q^{-2m}) \cos 2m\sigma = 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$C_0 = -2 \ln \beta, \quad c_{2m} = \frac{1}{m} \frac{q^{2m}}{\beta^{2m} (q^{2m} - q^{-2m})}.$$

Окончательно

$$\begin{aligned} \omega_0(\xi) + \omega_1(\xi) &= i \ln(\xi^2 - \beta^2) - 2i \ln \beta + \\ &+ \frac{\pi}{2} - i \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{q^{2m}}{\beta^{2m} (q^{2m} - q^{-2m})} (\xi^{2m} - \xi^{-2m}). \end{aligned} \quad (7)$$

Функция (7) решает задачу обработки с помощью ЭИ некоторой криволинейной (незамкнутой в общем случае) формы. Для круглого ЭИ эту функцию необходимо модифицировать путем добавления третьего слагаемого $\omega_2(\xi)$. Функция $\omega_2(\xi)$ должна удовлетворять условиям: $\operatorname{Re} \omega = \theta = 0$ на CD , BH и $B'G'$; $\operatorname{Im} \omega = \tau = 0$ на DMH . При таких условиях функция $\omega_2(\xi)$, согласно принципу симметрии, может быть аналитически продолжена на все кольцо, и представлена в виде сходящегося ряда Лорана

$$\omega_2(\xi) = i \sum_{m=1}^{\infty} d_{2m} \left(\frac{\xi^{2m}}{p^{2m}} - \frac{p^{2m}}{\xi^{2m}} \right). \quad (8)$$

Коэффициенты d_{2m} должны выбираться так, чтобы в результате использования функции

$$\omega(\xi) = \omega_0(\xi) + \omega_1(\xi) + \omega_2(\xi)$$

удовлетворялось условие (3).

Остается найти связь двух параметрических плоскостей ζ (рис. 3) и ξ (рис. 5, б). Для этого отобразим правую четверть кольца ζ на полосу χ [5] (рис. 6, а). Сначала развернем четверть в полукольцо $\zeta_1 = \zeta^2$ ($p_1 = p^2$), затем используем способ, аналогичный (5) – (7)

$$\chi(\zeta_1) = \frac{1}{\pi} \left(\ln \frac{\zeta_1 - 1}{\zeta_1 + 1} - i \frac{\pi}{2} \right) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \times$$

$$\times \frac{p_1^{2m-1}}{p_1^{2m-1} - p_1^{-2m+1}} (\zeta_1^{2m-1} + \zeta_1^{-2m+1}) \quad (9)$$

$$\gamma = \chi(p_1), \quad \frac{d\chi}{d\zeta} = \frac{d\chi}{d\zeta_1} \frac{d\zeta_1}{d\zeta} = \frac{1}{\pi} \frac{2\zeta}{\zeta^2 - 1} +$$

$$+ \frac{4\zeta}{\pi \zeta_1} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{p_1^{2m-1}}{p_1^{2m-1} - p_1^{-(2m-1)}} (\zeta_1^{2m-1} - \zeta_1^{-2m+1}). \quad (10)$$

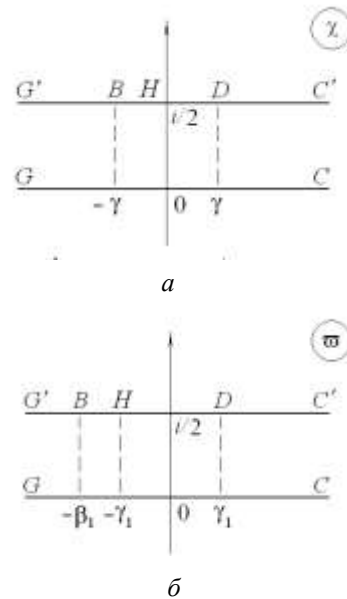


Рис. 6. Формы образов МЭП на параметрических плоскостях χ и ψ

Производная комплексного потенциала, согласно (2), равна

$$\frac{dw}{d\chi} = \frac{1}{\ln p} \frac{1}{\zeta} \left(\frac{d\chi}{d\zeta} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Аналогично отобразим ξ на полосу ψ . Для этого сначала развернем четверть кольца в полукольцо $\xi_1 = \xi^2$ ($q_1 = q^2$), а затем применим преобразование, аналогичное (9)

$$\psi(\xi_1) = \frac{1}{\pi} \left(\ln \frac{\xi_1 - 1}{\xi_1 + 1} - i \frac{\pi}{2} \right) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \times$$

$$\times \frac{q_1^{2m-1}}{q_1^{2m-1} - q_1^{-2m+1}} (\xi_1^{2m-1} + \xi_1^{-2m+1}), \quad (12)$$

$$\gamma_1 = \psi(q_1), \quad -\beta_1 = \psi(\beta^2),$$

$$\frac{d\varpi}{d\xi} = \frac{d\varpi}{d\xi_1} \frac{d\xi_1}{d\xi} = \frac{1}{\pi\xi_1} \frac{2\xi}{\xi_1^2 - 1} + \frac{2\xi}{\pi\xi_1} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_1^{2m-1}}{q_1^{2m-1} - q_1^{-(2m-1)}} (\xi_1^{2m-1} - \xi_1^{-2m+1}). \quad (13)$$

Связь ϖ и χ сводится к сдвигу. Согласно рис. 6, чтобы середина между B и D ($\gamma_1 - \beta_1$)/2 перешла в 0 на плоскости χ , необходим сдвиг

$$\chi = \varpi - \frac{\gamma_1 + \beta_1}{2}. \quad (14)$$

Связь параметров p и q можно установить, отобразив χ и ϖ на верхнюю полуплоскость t_1 (рис. 7).

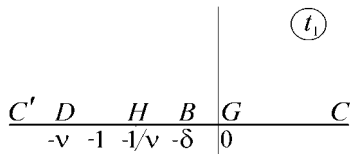


Рис. 7. Параметрическая плоскость t_1

Тогда

$$\varpi = \frac{1}{2\pi} \ln t_1, \quad (15)$$

$$\varpi_D = \frac{i}{2} + \frac{1}{2\pi} \ln v, \quad \varpi_H = \frac{i}{2} - \frac{1}{2\pi} \ln v,$$

$$\varpi_B = \frac{i}{2} + \frac{1}{2\pi} \ln \delta, \quad \gamma_1 = \frac{1}{2\pi} \ln v,$$

$$\chi = \frac{1}{2\pi} \ln t_1 + C, \quad \chi_D = \frac{i}{2} + \frac{1}{2\pi} \ln v + C,$$

$$\chi_B = \frac{i}{2} + \frac{1}{2\pi} \ln \delta + C.$$

Поскольку $\text{Re} \chi_D = -\text{Re} \chi_B$, то

$$C = -\frac{1}{4\pi} (\ln v + \ln \delta),$$

$$\gamma = \text{Re} \chi_D = \frac{1}{4\pi} (\ln v - \ln \delta),$$

$$\chi = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{t_1}{\sqrt{v\delta}}. \quad (16)$$

Исключим t_1 из (15) и (16)

$$t_1 = e^{2\pi\varpi} = \sqrt{v\delta} e^{2\pi\chi},$$

$$\varpi = \chi + \frac{1}{4\pi} \ln v\delta, \quad \chi = \varpi - \frac{1}{4\pi} \ln v\delta. \quad (17)$$

$$\gamma = \text{Re} \chi_D = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{v}{\delta}, \quad \gamma_1 = \frac{1}{2\pi} \ln v, \quad v = e^{2\pi\gamma_1},$$

$$\delta = v e^{-4\pi\gamma} = e^{2\pi(\gamma_1 - 2\gamma)},$$

$$v\delta = e^{2\pi\gamma_1} e^{2\pi(\gamma_1 - 2\gamma)} = e^{4\pi(\gamma_1 - \gamma)}.$$

Связь χ и ϖ

$$\chi = \varpi - \frac{1}{4\pi} \ln v\delta = \varpi - \gamma_1 + \gamma. \quad (18)$$

Тем самым с учетом (14), получим уравнение, связывающее p и q

$$\gamma = \frac{\gamma_1 - \beta_1}{2}. \quad (19)$$

Согласно (18) и (11) производные

$$\frac{d\chi}{d\varpi} = 1, \quad \frac{dw}{d\varpi} = \frac{dw}{d\chi} \frac{d\chi}{d\varpi} = \frac{1}{\ln p} \frac{1}{\zeta} \left(\frac{d\chi}{d\zeta} \right)^{-1},$$

$$\frac{dw}{d\xi} = \frac{dw}{d\varpi} \frac{d\varpi}{d\xi} = \frac{1}{\ln p} \frac{1}{\zeta} \left(\frac{d\chi}{d\zeta} \right)^{-1} \frac{d\varpi}{d\xi}. \quad (20)$$

Тогда дифференциал

$$dz = e^{i\omega(\xi)} \frac{dw}{d\xi} d\xi. \quad (21)$$

Численно задача решалась методом коллокаций. Уравнение формы ЭИ (3) удовлетворялось в отдельных точках $\xi_m = e^{i\sigma_m}$, $\sigma_m = \pi m / (2n)$ ($m = \overline{0, n-1}$), а в сумме (8) сохранялось конечное число n слагаемых. Кроме того, требовалось выполнение уравнения замкнутости (при обходе ЭИ) и уравнения, задающего положение ЭИ относительно исходной поверхности анода. Получаемая при этом система $n+2$ нелинейных уравнений относительно параметров d_m ($m = \overline{1, n}$), q , β решалась методом Ньютона с регулированием шага. На каждом шаге вычисления невязок решалось уравнение (19). Для установления связи значений ξ_m и ζ_m сначала определялись значения $\varpi(\xi_m)$, затем решалось уравнение (18) $\chi(\zeta_m) = \varpi(\xi_m) - \gamma_1 + \gamma$.

Численные результаты

На рис. 8 и 9 приведены формы анодной поверхности в различные моменты времени $\tau = 1, 2, \dots, r+1$ (кривые 1, 2, ...) для $r=5$ и 10, что соответствует сдвигу ординаты центра круглого ЭИ y_0 вниз от начального положения $y_0(\tau) = r+1 - \tau$. На рис. 8, а и 9, а для сравне-

ния показаны формы обрабатываемой поверхности при постоянном выходе по току ($\alpha=\infty$), полученные при решении нестационарной задачи [5]. Рис. 8, б и 9, б ($\alpha=1$) показывают увеличение локализации растворения и приближение формы обрабатываемой поверхности (особенно, в верхней части) к экспериментальной (см. рис. 1, а). Вблизи точки, разграничивающей зону растворения от зоны его отсутствия, образуется решение, аналогичное решению гидродинамической задачи об отрыве свободной поверхности от прямолинейного щита, что впервые было обнаружено в [6]. В этом решении кривизна свободной поверхности в точке отрыва бесконечна. Остальная часть обрабатываемой поверхности при $\alpha=1$ практически эквидистантна поверхности ЭИ.

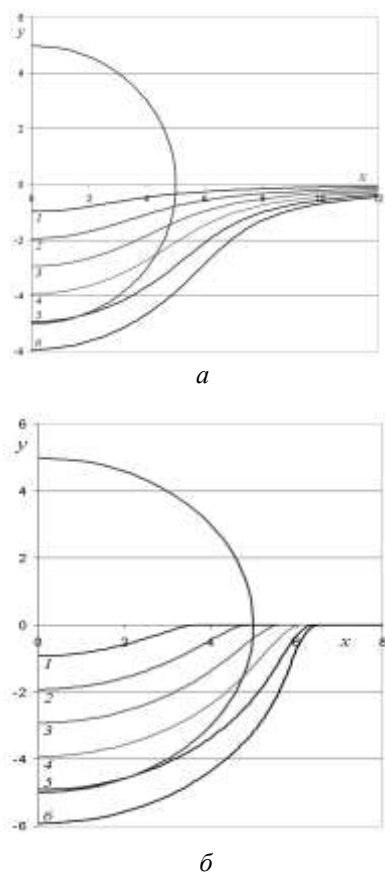


Рис. 8. Формы МЭП для $r=5$:
а – $\alpha=\infty$; б – $\alpha=1$

При дальнейшем увеличении безразмерного времени, когда круглый ЭИ начинает заглубляться в тело заготовки, напряженность в верхней части обрабатываемой поверхности начинает уменьшаться. При этом некоторая часть искривленной поверхности перестает растворяться. Это означает, что процесс перестает быть квазистационарным. Квазистационарное решение в этом случае не будет правильно моделировать нестационарный процесс (рис. 10). Однако расчеты

показывают, что до момента заглубления до середины ЭИ такого уменьшения напряженности не происходит и нестационарный процесс моделируется точно.

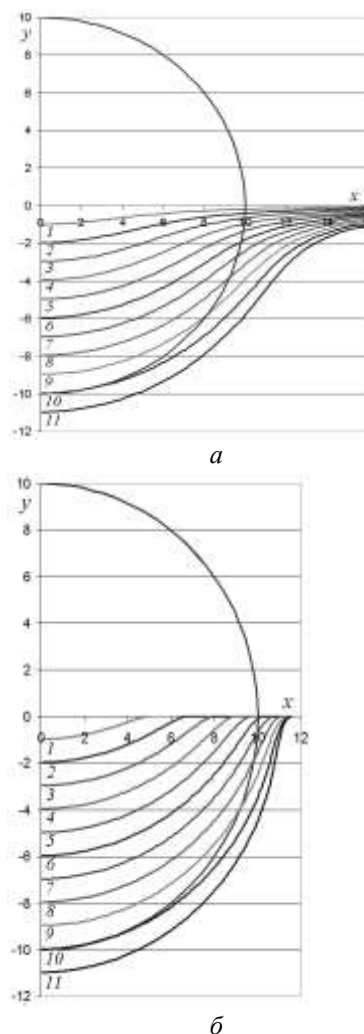


Рис. 9. Формы МЭП для $r=10$:
а – $\alpha=\infty$; б – $\alpha=1$

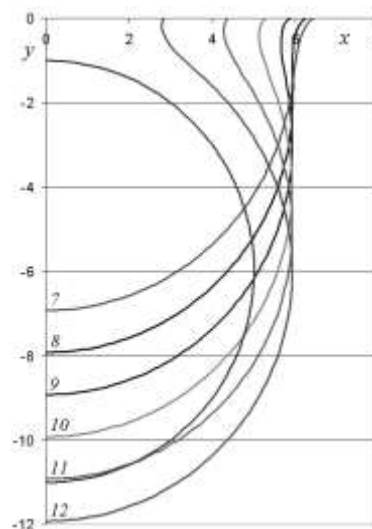


Рис. 10. Формы МЭП
для $r=5$, $\alpha=1$ при $y_0=-1, -2, \dots, -6$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен численно-аналитический метод решения квазистационарной задачи моделирования электрохимического копирования круглого электрод-инструмента, основанный на конформных отображениях и методе коллокаций. Результаты численных расчетов позволили определить форму заготовки в различные моменты времени и диапазон безразмерного времени, в котором квазистационарное решение совпадает с нестационарным. Показано, что применение модели скачкообразной зависимости выхода по току позволяет получить формы, существенно более близкие к экспериментальным.

Предложенный метод может быть применен для моделирования процесса копирования электрод-инструментов различных форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клоков В. В.** Электрохимическое формообразование. Казань: КГУ, 1984. 80 с. [[V. V. Klokov "Electrochemical shaping" (in Russian), Kazan: KGU, 1984.]]
2. **Житников В. П., Ошмарина Е. М., Федорова Г. И.** Использование разрывных функций для моделирования растворения при стационарном электрохимическом формообразовании // Изв. Вузов. Математика. 2010. № 10. С. 77–81. [[V.P. Zhitnikov, E.M. Oshmarina, G.I. Fedorova "The use of discontinuous functions for modeling the dissolution process of steady-state electrochemical shaping, Russian Mathematics: Alerton Press, Inc., 2010. Vol. 54, No.10, pp. 67-70.]]
3. **Житников В. П., Зайцев А. Н.** Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2007. 407 с. [[V. P. Zhitnikov, A. N. Zaytsev, "Pulse electrochemical machining" (in Russian), Moscow: Mashinostroenie, 2008.]]
4. **Житников В. П., Ошмарина Е. М., Федорова Г. И.** Точные решения двух задач предельного квазистационарного электрохимического формообразования // Известия вузов. Математика. 2011. №12. С. 21–29. [[V.P. Zhitnikov, E.M. Oshmarina, G.I. Fedorova "Exact Solutions of two limiting quasistationary electrochemical shaping problems", Russian Mathematics (Iz. VUZ), 2011, Vol. 55, No. 12, pp. 16–22.]]
5. **Житников В. П., Муксимова Р. Р., Зарипов А. А.** Моделирование прецизионной нестационарной электрохимической обработки круглым и пластинчатым электрод-инструментом // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, №1 (67). С. 92–99. [[A. R. Mannarov, V. P. Zhitnikov, S. S. Porechny, "Modeling of precision non-stationary machining with round and plane electrode-tool" (in Russian), Vestnik UGATU, vol. 19, no. 1 (67), pp. 92–99, 2015.]]
6. **Житников В. П., Ошмарина Е. М., Зиннатуллина О. Р.** Моделирование прецизионной электрохимической обработки секционированным катодом // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 6. С. 185–192. [[V. P. Zhitnikov, E. M. Oshmarina, O. R. Zinnatullina "Simulation of precision electrochemical machining of metals by a segmented cathode", Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 52, No. 6, pp. 1004–1010, 2011.]]

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.

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

METADATA

Title: Limiting quasi-stationary copying round up electrode-tool.

Authors: V.P. Zhitnikov¹, N. M. Sherykhalina², A.A. Sokolova

Affiliation:

¹⁻³Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ³alexandrakrasich@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 4 (74), pp. 177-188, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The methods of the theory of functions of a complex variable are applied for investigation of the electrochemical machining process. The steady-state and non-steady-state processes of workpiece cutting using a wire electrode-tool are considered. For modelling of the precision process of electrochemical machining the stepwise function of current efficiency is used. The function determines the movement velocity of the anode boundary. The machining surface at steady-state process is divided into three parts: an active dissolution area, an area where there is no dissolution (for low current density) and a transition area in which the current density is equal to a critical value. At non-steady-state process a jump-like dissolution turn on and turn off and dynamical ascertainment of workpiece shape takes place in the transition area. The numerical investigation of solutions of non-steady-state problems shows quick formation of the solution coinciding with the steady-state solution obtained independently up to accuracy 0.001.

Key words: quasi-stationary solution, current efficiency, step function.

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).

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