

УДК 621.35

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ

В. П. ЖИТНИКОВ¹, А. А. ЗАРИПОВ², Н. М. ШЕРЫХАЛИНА³

¹zhitnik@ugatu.ac.ru, ²a_zaripov@mail.ru, ³n_sher@mail.ru

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

Поступила в редакцию 29 марта 2014 г.

Аннотация. В квазистационарном приближении решены две задачи электрохимического формообразования: обработки угловым электрод-инструментом с изоляцией и плоским электрод-инструментом без изоляции заготовки, имевшей до обработки угловую форму. Получены точные (в квадратурах) решения этих задач и проведено параметрическое исследование.

Ключевые слова: конформное отображение; выход по току; предельная модель; квазистационарное приближение.

Моделирование электрохимической обработки (ЭХО) основано на законе Фарадея, согласно которому скорость растворения $V_{есм}$ равна $V_{есм} = k\eta j$, $k = \varepsilon/\rho$, где ε – электрохимический эквивалент; ρ – плотность растворяемого материала; j – плотность тока на анодной границе; $\eta = \eta(j)$ – выход по току (доля тока, участвующего в реакции растворения металла).

В [1–3] для решения стационарной задачи предлагалось исследовать процесс со скачкообразной зависимостью выхода по току от плотности тока

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

В данной работе для исследования процессов с предельно высокой локализацией предлагается рассмотреть случай, когда максимальное значение плотности тока на обрабатываемой поверхности E_0 равно критическому $E_1 = \frac{j_1}{\kappa}$ (κ – электропроводность электролита).

Будем считать электрическое поле в межэлектродном пространстве (МЭП) соленоидальным и потенциальным. Будем считать электроды эквипотенциальными ($\varphi = -U$ на катоде $\varphi = 0$ на аноде). Тогда задачу определения напряжен-

ности поля можно решать с помощью аналитических функций комплексного переменного.

С прикладной точки зрения имеют интерес задачи исследования формообразования обрабатываемой поверхности при ЭХО. В данной работе изучается изменение формы обрабатываемой поверхности вблизи угловых точек при электрохимическом фрезеровании непрофилированными электрод-инструментами (ЭИ) различного вида.

1. ПРЕДЕЛЬНО-КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ ЭХО УГЛОВЫМ ЭИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрим плоскую задачу формообразования обрабатываемой поверхности при обработке ЭИ в виде клина $A'CB'$ с углом раствора, равным $\pi/2$, с изолированной вертикальной поверхностью (рис. 1). В разделе 2 рассмотрена также задача обработки пластинчатым ЭИ без изоляции (рис. 9). В обоих случаях ЭИ движутся горизонтально вправо с постоянной скоростью V_{er} .

При эквипотенциальных электродах образом МЭП на плоскости комплексного потенциала для этой задачи является полуполоса шириной U (рис. 2).

Рассмотрим плоскость годографа напряженности $\bar{E} = dW/dZ$. При использовании зависимости выхода по току (1) при $E_0 = E_1$ на обрабатываемой поверхности образуются две зоны с двумя типами краевых условий. Первой зоне

$FMNG$ с постоянным модулем напряженности на плоскости \bar{E} соответствует дуга окружности радиуса E_1 с центром в начале координат.

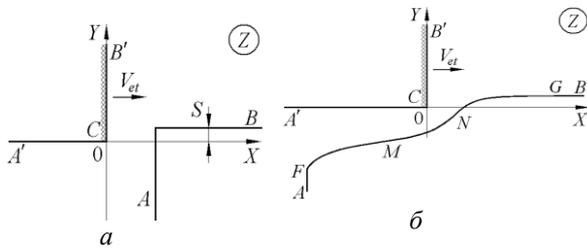


Рис. 1. Формы МЭП на физической плоскости: a – перед началом процесса; b – в процессе обработки. $FMNG$ – зона постоянного (критического) значения напряженности; AF, GB – нерастворяемые (прямолинейные) границы

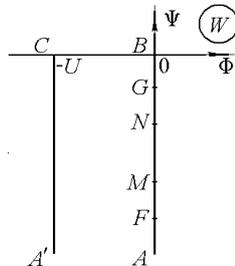


Рис. 2. Форма образа МЭП на плоскости комплексного потенциала

Участкам AF ($\theta=0$) и GB ($\theta=-\pi/2$), где отсутствует растворение, на плоскости \bar{E} соответствуют отрезки соответственно действительной AF и мнимой GB осей.

На поверхности ЭИ $A'C$ угол $\theta=-\pi/2$, на $B'C$ $\theta=\pi/2$ (вектор напряженности направлен по нормали от катода и вдоль изолированной его части). Поэтому на плоскости годографа \bar{E} имеем вертикальные лучи, направленные, соответственно, вверх и вниз. Область на плоскости годографа размещается на двулистной поверхности. Более удобно изобразить каждый лист отдельно (рис. 3, a, b).

Применив преобразование

$$\omega = i \ln \frac{\bar{E}}{E_1} = \theta + i\tau, \quad \tau = \ln \frac{|E|}{E_1}, \quad (2)$$

получим фигуру, граница которой содержит только части прямых, т.е. многоугольник с углами A, B, C, F, G, M, N , равными $0; 0; 0, \pi/2; \pi/2; 2\pi, 2\pi$ соответственно (рис. 4, a, b).

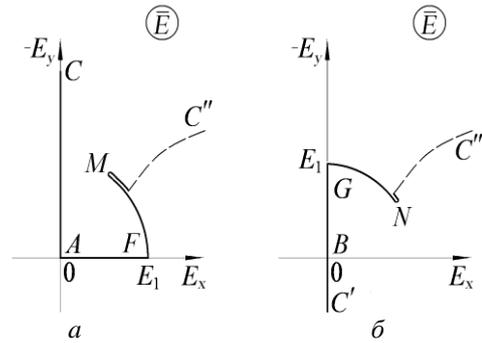


Рис. 3. Форма образа МЭП на плоскости годографа: a – первый лист; b – второй лист

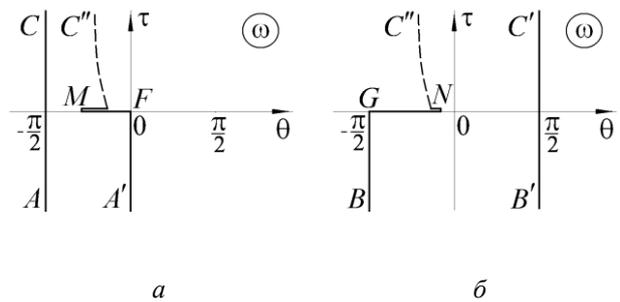


Рис. 4. Формы образа МЭП на плоскостях параметрического переменного: a – первый лист поверхности ω ; b – второй лист ω

Используя преобразование Шварца–Кристоффеля, получим функцию, конформно отображающую верхнюю полуплоскость ζ (рис. 5) на этот многоугольник

$$\omega(\zeta) = C_1 \int \frac{(\zeta + \mu)(\zeta + \nu)d\zeta}{\infty(\zeta - \delta)(\zeta - \beta)(\zeta - 1)\zeta^{1/2}}. \quad (3)$$

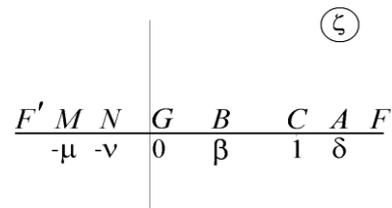


Рис. 5. Формы образа МЭП на плоскостях параметрического переменного: плоскость ζ

Имеем

$$\frac{(\zeta + \mu)(\zeta + \nu)}{(\zeta - \delta)(\zeta - \beta)(\zeta - 1)} = \frac{(\delta + \mu)(\delta + \nu)}{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \frac{1}{\zeta - \delta} + \frac{(\beta + \mu)(\beta + \nu)}{(\beta - \delta)(\beta - 1)} \frac{1}{\zeta - \beta} + \frac{(1 + \mu)(1 + \nu)}{(1 - \delta)(1 - \beta)} \frac{1}{\zeta - 1},$$

$$\int \frac{d\zeta}{(\zeta - \delta)\sqrt{\zeta}} = \frac{1}{\sqrt{\delta}} \ln \frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\delta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta}}.$$

Тем самым

$$\begin{aligned}\omega(\zeta) &= C_1 \int_{\infty}^{\zeta} \frac{(\zeta + \mu)(\zeta + \nu)d\zeta}{(\zeta - \delta)(\zeta - \beta)(\zeta - 1)\zeta^{1/2}} = \\ &= \tilde{N}_1 \frac{(\delta + \mu)(\delta + \nu)}{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\delta}} \ln \frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\delta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta}} + \\ &+ C_1 \frac{(\beta + \mu)(\beta + \nu)}{(\beta - \delta)(\beta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\beta}} \ln \frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\beta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\beta}} + \\ &+ C_1 \frac{(1 + \mu)(1 + \nu)}{(1 - \delta)(1 - \beta)} \ln \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{\sqrt{\zeta} + 1}\end{aligned}\quad (4)$$

Отсюда, и в соответствии с рис. 4,

$$\begin{aligned}\operatorname{Re} \omega\left(\frac{1 + \delta}{2}\right) &= \tilde{N}_1 \frac{(\delta + \mu)(\delta + \nu)}{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\delta}} i\pi = -\frac{\pi}{2}, \\ \tilde{N}_1 \frac{(\delta + \mu)(\delta + \nu)}{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\delta}} &= \frac{i}{2},\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\operatorname{Re} \omega\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) &= \tilde{N}_1 \frac{(\delta + \mu)(\delta + \nu)}{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\delta}} i\pi + \\ &+ \tilde{N}_1 \frac{(1 + \mu)(1 + \nu)}{(1 - \delta)(1 - \beta)} i\pi = \frac{\pi}{2}, \\ \tilde{N}_1 \frac{(1 + \mu)(1 + \nu)}{(1 - \delta)(1 - \beta)} &= -i,\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\operatorname{Re} \omega\left(\frac{\beta}{2}\right) &= -\frac{\pi}{2} = \tilde{N}_1 \frac{(\delta + \mu)(\delta + \nu)}{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\delta}} i\pi + \\ &+ \tilde{N}_1 \frac{(1 + \mu)(1 + \nu)}{(1 - \delta)(1 - \beta)} i\pi + \tilde{N}_1 \frac{(\beta + \mu)(\beta + \nu)}{(\beta - \delta)(\beta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\beta}} i\pi, \\ \tilde{N}_1 \frac{(\beta + \mu)(\beta + \nu)}{(\beta - \delta)(\beta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\beta}} &= i\end{aligned}\quad (7)$$

Из (5), (6) и (7) следует, что

$$\tilde{N}_1 = i \frac{\sqrt{\delta} (\delta - \beta)(\delta - 1)}{2 (\delta + \mu)(\delta + \nu)},\quad (8)$$

$$\frac{\sqrt{\delta} (\delta - \beta)(1 + \mu)(1 + \nu)}{2 (\delta + \mu)(\delta + \nu)(1 - \beta)} = 1,\quad (9)$$

$$\frac{\sqrt{\delta} (\delta - 1)(\beta + \mu)(\beta + \nu)}{2 (\delta + \mu)(\delta + \nu)(\beta - 1)} \frac{1}{\sqrt{\beta}} = -1.\quad (10)$$

Если точки перегиба M и N отсутствуют, то параметры μ и ν – комплексно сопряженные, (т.е. $\mu = \mu_1 + i\nu_1$, $\nu = \mu_1 - i\nu_1$). Тогда уравнения (9), (10), примут вид

$$\frac{\sqrt{\delta} (\delta - \beta) \left((1 + \mu_1)^2 + \nu_1^2 \right)}{2 (1 - \beta) \left((\delta + \mu_1)^2 + \nu_1^2 \right)} = 1,\quad (11)$$

$$\frac{\sqrt{\delta} (\delta - 1) \left((\beta + \mu_1)^2 + \nu_1^2 \right)}{2 (\beta - 1) \left((\delta + \mu_1)^2 + \nu_1^2 \right)} \frac{1}{\sqrt{\beta}} = -1.\quad (12)$$

Тем самым с учетом (5)–(7), окончательно

$$\omega(\zeta) = \frac{i}{2} \ln \frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\delta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta}} + i \ln \frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\beta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\beta}} - i \ln \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{\sqrt{\zeta} + 1}.\quad (13)$$

Согласно (2)

$$\bar{E} = \frac{dW}{dZ} = E_1 e^{-i\omega} = E_1 \sqrt{\frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\delta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta}}} \frac{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\beta}}{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\beta}} \frac{\sqrt{\zeta} + 1}{\sqrt{\zeta} - 1}.\quad (14)$$

$$\text{С учетом (13) } dZ = \frac{1}{E_1} e^{i\omega} dW =$$

$$= \frac{1}{E_1} \sqrt{\frac{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta}}{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\delta}}} \frac{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\beta}}{\sqrt{\zeta} - \sqrt{\beta}} \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{\sqrt{\zeta} + 1} dW d\zeta.\quad (15)$$

Теперь с помощью преобразования Шварца–Кристоффеля найдем функцию $W(\zeta)$

$$\begin{aligned}W(\zeta) &= C_2 \int_{\beta}^{\zeta} \frac{d\zeta}{(\zeta - \delta)(\zeta - \beta)^{1/2}(\zeta - 1)^{1/2}} = \\ &= C_2 \frac{1}{\sqrt{(\delta - \beta)(\delta - 1)}} \times \\ &\times \ln \frac{(1 - \beta)(\zeta - \delta)}{\left[\sqrt{(\delta - 1)(\zeta - \beta)} + \sqrt{(\delta - \beta)(\zeta - 1)} \right]^2}.\end{aligned}\quad (16)$$

При обходе точки $\zeta = \delta$ по полуокружности малого радиуса против часовой стрелки W получает приращение действительной части, равное $-U$, логарифм – приращение мнимой части $i\pi$. Отсюда

$$\Delta \operatorname{Re} W = -U = C_2 \frac{1}{\sqrt{(\delta - \beta)(\delta - 1)}} i\pi.$$

Тогда

$$C_2 = i \frac{U}{\pi} \sqrt{(\delta - \beta)(\delta - 1)}.$$

Тем самым, окончательно

$$W(\zeta) = i \frac{U}{\pi} \ln \frac{(1 - \beta)(\zeta - \delta)}{\left[\sqrt{(\delta - 1)(\zeta - \beta)} + \sqrt{(\delta - \beta)(\zeta - 1)} \right]^2}.\quad (17)$$

Производная

$$\frac{dW}{d\zeta} = i \frac{U}{\pi} \frac{\sqrt{(\delta - \beta)(\delta - 1)}}{(\zeta - \delta) \sqrt{(\zeta - \beta)(\zeta - 1)}}.\quad (18)$$

Из (15) и (18)

$$\begin{aligned}dz &= i \frac{U}{\pi E_1} \sqrt{(\delta - \beta)(\delta - 1)} \times \\ &\times \frac{(\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta})(\sqrt{\zeta} + \sqrt{\beta})^2}{(\zeta - \delta)^{3/2} (\zeta - \beta)^{3/2}} \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{(\sqrt{\zeta} + 1)^2} d\zeta.\end{aligned}\quad (19)$$

Интегрируя (19) численно от $\zeta = \gamma$, получим функцию $z(\zeta)$.

Параметры заглупления кромки ЭИ L и S определяются следующим образом:

$$L = -\operatorname{Re} Z(\infty), \quad S = \operatorname{Im} Z(0),\quad (20)$$

$\tau = L \frac{E_1}{U}$ (безразмерное время).

На рис. 6 приведены формы обрабатываемой поверхности в неподвижной относительно материала заготовки и подвижной (связанной с кромкой ЭИ) системах координат, соответст-

вующие $s = SE_1/U = 0$ и $\tau = -1; -0.5; 0; 0.5; 1; 1.5; 2; \dots; 5$.

На рис. 6, а при $\tau \rightarrow \infty$ видно установление предельно-стационарной конфигурации с $|\bar{E}| = E_1$. Вблизи нерастворяемой зоны AF при возрастании τ формируется предельная форма, соответствующая решению задачи об истечении из-под щита [4] (рис. 6, б, кривая ∞).

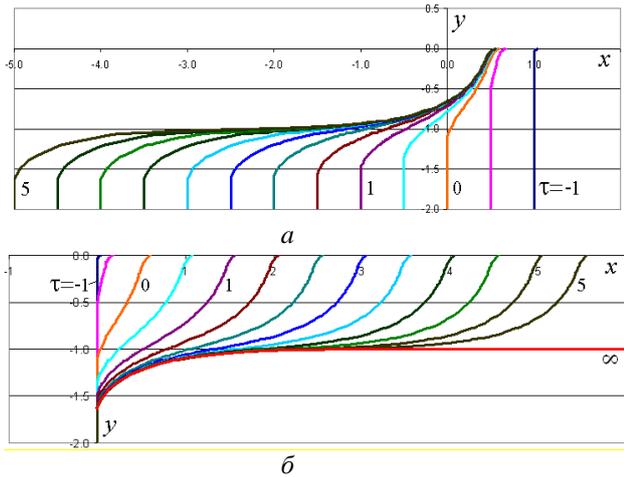


Рис. 6. Формы обрабатываемой поверхности для $s=0$: а – в системе координат, связанной с кромкой ЭИ $C(0,0)$; б – в неподвижной системе координат

На рис. 7 приведены аналогичные формы обрабатываемой поверхности, соответствующие $s = SE_1/U = 0.3$.

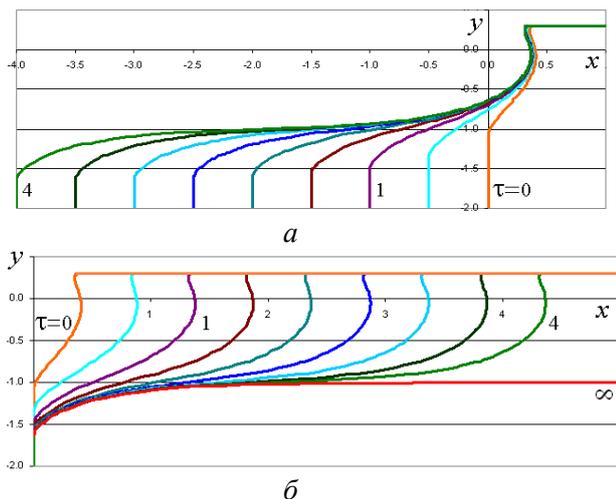


Рис. 7. Формы обрабатываемой поверхности для $s=0.3$: а – в системе координат, связанной с кромкой ЭИ $C(0,0)$; б – в неподвижной системе координат

При увеличении s выступ на обрабатываемой поверхности увеличивается, и при некото-

ром $s=s^*$ происходит его касание изолированной поверхности ЭИ.

Следует отметить, что при $\tau < 0$ образы точек перегиба $-\mu$ и $-\nu$ совпадают и при дальнейшем уменьшении τ становятся комплексно сопряженными (обозначим их $\mu = \mu_1 + i\nu_1$, $\nu = \mu_1 - i\nu_1$, (11), (12)). При этом внутри области на плоскости \bar{E} появляется точка ветвления M , являющаяся образом точки $\zeta = \mu_1$. Линия «склейки» на плоскости \bar{E} начинается с некоторой точки на границе области, проходит через точку ветвления, разворачивается и уходит на бесконечность (рис. 8).

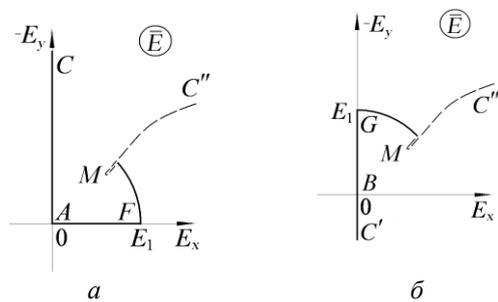


Рис. 8. Формы образа МЭП на плоскости годографа: а – первый лист; б – второй лист

Как видно из рис. 6, б, при $\tau \rightarrow \infty$ длина обработанной части поверхности уменьшается и стремится к нулю.

2. ПРЕДЕЛЬНО-КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ ЭХО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ПЛАСТИНАТЫМ ЭИ

Рассмотрим задачу формообразования обрабатываемой поверхности при обработке ЭИ в виде пластины $A'CB'$, движущимся горизонтально вправо с постоянной скоростью V_{et} . Сечение МЭП показано на рис. 9.

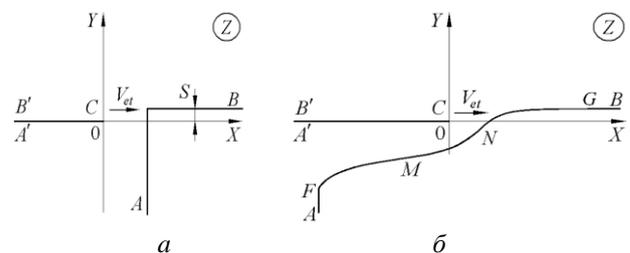


Рис. 9. Формы МЭП на физической плоскости: а – перед началом процесса; б – в процессе обработки. $FMNG$ – зона постоянного (критического) значения напряженности; AF, GB – нерастворяемые (прямолинейные) границы

На поверхности ЭИ $A'C$ угол $\theta = -\pi/2$, на $B'C$ $\theta = \pi/2$ (вектор напряженности направлен по нормали от верхней поверхности катода). Поэтому на плоскости годографа \bar{E} имеем вертикальные лучи, направленные, соответственно, вверх и вниз. Область на плоскости годографа размещается на двулистной поверхности, аналогичной полученной в предыдущей задаче (рис. 3). Это связано с тем, что в задаче с изолированным сбоку клином на $B'C$ вектор напряженности направлен вдоль изолированной границы вверх.

Поэтому зависимость функции $\omega = i \ln \bar{E}/E_1 = \theta + i\tau$ от параметрического переменного ζ , областью изменения которого является верхняя полуплоскость, выражается формулой (13).

Образом МЭП на плоскости комплексного потенциала, в отличие от предыдущей задачи, является полоса шириной U (причем точки A и B удалены на бесконечность вниз и вверх). Функцию $W(\zeta)$ найдем с помощью преобразования Шварца–Кристоффеля

$$\begin{aligned} W(\zeta) &= C_2 \int_1^{\zeta} \frac{d\zeta}{(\zeta - \delta)(\zeta - \beta)} - U = \\ &= C_2 \frac{1}{\delta - \beta} \left(\ln \frac{\zeta - \delta}{\zeta - \beta} - \ln \frac{\delta - 1}{1 - \beta} - i\pi \right) - U. \end{aligned}$$

При обходе точки $\zeta = \delta$ по полуокружности малого радиуса против часовой стрелки W получает приращение действительной части, равное $-U$, логарифм – приращение мнимой части $i\pi$. Отсюда

$$\Delta \operatorname{Re} W = -U = C_2 \frac{1}{\delta - \beta} i\pi.$$

$$\text{Тогда } C_2 = i \frac{U}{\pi} (\delta - \beta).$$

Тем самым, окончательно

$$W(\zeta) = i \frac{U}{\pi} \left(\ln \frac{\zeta - \delta}{\zeta - \beta} - \ln \frac{\delta - 1}{1 - \beta} \right). \quad (21)$$

Производная

$$\frac{dW}{d\zeta} = i \frac{U}{\pi} \frac{\delta - \beta}{(\zeta - \delta)(\zeta - \beta)}. \quad (22)$$

Из (15) и (22)

$$dZ = i \frac{U}{\pi E_1} (\delta - \beta) \frac{\sqrt{\zeta} + \sqrt{\delta}}{(\sqrt{\zeta} - \sqrt{\beta})^2 (\zeta - \delta)^{3/2}} \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{\sqrt{\zeta} + 1} d\zeta. \quad (23)$$

На рис. 10–12 приведены формы обрабатываемой поверхности в неподвижной относительно материала заготовки и подвижной (связанной с кромкой ЭИ) системах координат, со-

ответствующие $\tau = -1; -0.5; 0; 0.5; 1; 1.5; 2; \dots; 5$, для $s = S \frac{E_1}{U} = 0; 1$ и 1.5 .

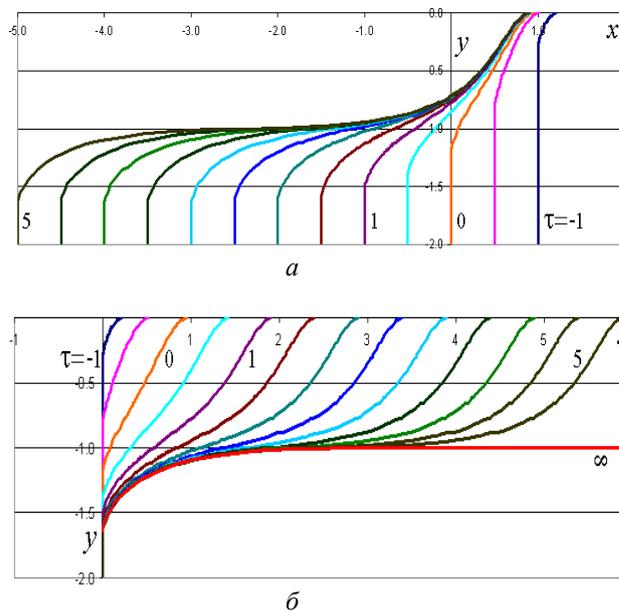


Рис. 10. Формы обрабатываемой поверхности для $s=0$: a – в системе координат, связанной с кромкой ЭИ $C(0,0)$; b – в неподвижной системе координат

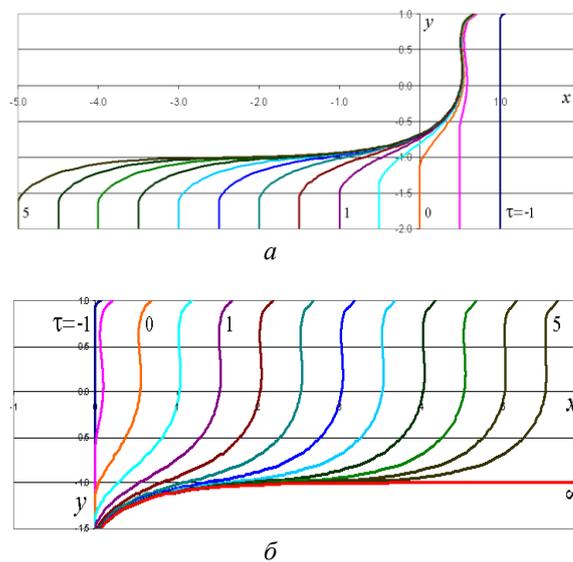


Рис. 11. Формы обрабатываемой поверхности для $s=1$: a – в системе координат, связанной с кромкой ЭИ $C(0,0)$; b – в неподвижной системе координат

Как и в рассмотренной в разделе 1 задаче, вблизи нерастворяемой зоны AF при возрастании τ формируется предельная форма, соответ-

ствующая решению задачи об истечении из-под щита [4] (рис. 10–12, б, кривые ∞).

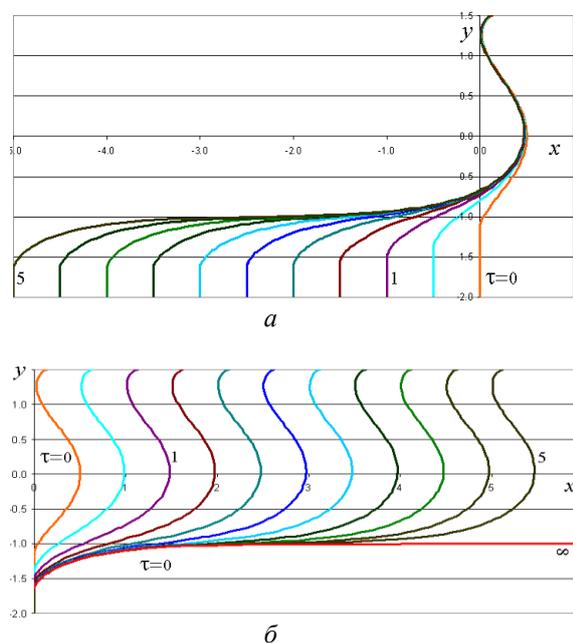


Рис. 12. Формы обрабатываемой поверхности для $s=1.5$: *a* – в системе координат, связанной с краем ЭИ $C(0,0)$; *б* – в неподвижной системе координат

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, квазистационарное приближение позволило получить точные (в квадратурах) решения двух задач ЭХО: обработки угловым ЭИ с изоляцией и плоским ЭИ без изоляции заготовки, имевшей до обработки угловую форму.

Проведено параметрическое исследование этих задач, показавшее, что для определения предельной формы обрабатываемой поверхности возможно использовать известное решение об истечении идеальной жидкости из-под щита.

Как показывают численные исследования [5], в таких задачах квазистационарное приближение весьма точно (до 3-4 значащих цифр) приближает нестационарное решение. При этом квазистационарное решение требует существенно меньших затрат вычислительных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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," in *Russian Mathematics (Iz. VUZ)*: Alerton Press, Inc., vol. 54, no. 10, pp. 67-70, 2010.]

2. Житников В. П., Ошмарина Е. М., Федорова Г. И. Точные решения двух задач предельного квазистационарного электрохимического формообразования // Изв. 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," in *Russian Mathematics (Iz. VUZ)*, vol. 55, no. 12, pp. 16-22, 2011.]

3. 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", in *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 52, no. 6, pp. 1004-1010, 2011.]

4. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука. 1979. 536 с. [M. I. Gurevich, *The theory of ideal fluid flows*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1979.]

5. Житников В. П., Муксимова Р. Р., Ошмарина Е. М. Моделирование процессов нестационарного электрохимического формообразования применительно к прецизионным технологиям // Труды математического центра имени Н. И. Лобачевского. 2010. Т. 42. С. 99–122. [V. P. Zhitnikov, R. R. Muksimova, E. M. Oshmarina, "Simulation of nonstationary processes of electrochemical shaping applying for precise technologies," (in Russian), in *Trudy matematicheskogo centra im. N. I. Lobachevskogo*, vol. 42, pp. 99-122, 2010.]

ОБ АВТОРАХ

ЖИТНИКОВ Владимир Павлович, проф. каф. высокопроизводит. выч. технологий и систем. Дипл. инж.-физик (МФТИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук по механике жидкости, газа и плазмы (Казанск. ун-т, 1993). Засл. деят. науки РБ. Иссл. в обл. волновых течений жидкости, электрохим. формообразования, числ.-аналит. методов.

ЗАРИПОВ Аскар Александрович, асп. каф. высокопроизводит. выч. технологий и систем. М-р в обл. математики и комп. наук (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. электрохим. формообразования, числ.-аналит. методов.

ШЕРЫХАЛИНА Наталия Михайловна, проф. каф. высокопроизводит. выч. технологий и систем. 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.

METADATA

Title: Non-stationary electrochemical shaping investigation with the help of quasi-stationary model.

Authors: V. P. Zhitnikov, A. A. Zaripov, N. M. Sherykhalina.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ zhitnik@ugatu.ac.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 80-86, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Two problems of the electrochemical shaping are solved on the basis of quasi-stationary approximation: the electrochemical machining by a rectangular electrode-tool with isolation and plane electrode-tool without isolation. The machining surface before the process starting had a rectangular form. The exact solutions are obtained and parametric investigation was carried out.

Key words: conformal mapping; current efficiency; limiting model; quasi-stationary approximation.

About authors:

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

ZARIPOV, Ascar Aleksandrovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Common Sci. Master of Mathematics & Informatics (UGATU, 2013).

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