

Расчет формы электродов для обеспечения равномерного распределения плотности тока и оптимальных конструкционных параметров биполярной установки электрохимической обработки проволоки

С. Н. Сироткин, Т. А. Воронина

ООО «Научно-технический центр «Трубметпром»,
ул. Танкистов, 189-Б, г. Челябинск, Россия, e-mail: Nctrubmetprom@mail.ru

Благодаря решению трехмерной задачи распределения потенциала внутри проволоки получены конфигурации формы электродов, обеспечивающих равномерное распределение плотности тока, и предложена более совершенная методика определения оптимальных параметров электрохимической ванны. Проведенные расчеты и исследования необходимы при конструировании и создании высокопроизводительных технологических комплексов электрохимической обработки с автоматическим управлением процессом.

Ключевые слова: форма электрода, электрохимическая обработка, плотность тока, микро-проволока.

УДК 621.357.8.035

ВВЕДЕНИЕ

В установках электрохимической обработки проволоки и других цилиндрических изделий обычно применяют электроды плоской или цилиндрической формы. При этом на поверхности проволоки возникает значительная неравномерность плотности тока по длине вследствие большого падения потенциала внутри нее за счет высокого омического сопротивления проволоки [1]. Так, на проволоке диаметром 20 мкм наблюдается 10÷20-кратное изменение плотности тока по поверхности при ее перемещении от края ячейки со стороны токоподвода на 20 мм внутрь ячейки.

Одной из основных задач при конструировании установок электрохимической обработки является получение равномерного распределения плотности тока на поверхности обрабатываемого изделия, так как характер данного распределения влияет как на качество обработки, так и на производительность этого процесса. Особенно важно поддерживать режим заданных плотностей тока при электрохимическом полировании металлов и осаждении гальванических покрытий, так как их необходимо проводить в строго определенном и обычно узком интервале плотностей тока. Для электрохимической обработки внутренней поверхности тонкостенных труб применяются биполярные электроды специальной формы, обеспечивающие равномерное распределение плотности тока [2–5].

Ранее [6] была найдена зависимость распределения потенциала по длине проволоки в биполярной ванне при постоянном значении плотности тока на поверхности проволоки. В предположении о преимущественно перпендикулярном направлении силовых линий тока относительно оси проволоки выведена зависимость формы электрода для электрохимической обработки проволоки от удельных сопротивлений металла и электролита, а также технологических параметров (плотности тока, напряжения на ванне и др.). Предложенная в работе [6] методика определения оптимальных параметров ванны с биполярным подводом тока нередко сложна для применения на практике. Это обусловливается зависимостью конструкционных параметров ванны (формы электрода, расстояния от электрода до изделия в центре ячейки, длины рабочей зоны) от технологических (плотности тока, напряжения на ванне).

Экспериментальная часть

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе решена трехмерная задача распределения потенциала в проволоке и предложены зависимость формы электрода и методика выбора оптимальных параметров электрохимической ячейки, не имеющие указанных недостатков.

Распределение потенциала в проволоке удовлетворяет уравнению Лапласа в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

На поверхности проволоки плотность тока имеет постоянное значение D :

$$\frac{1}{\rho_{np}} \frac{\partial E(r, z)}{\partial r} \Big|_{r=\frac{d}{2}} = i, z \in [0, L], \quad (2)$$

где ρ_{np} – удельное сопротивление проволоки; d – диаметр проволоки; L – длина рабочей зоны ячейки.

Предполагается, что в сечениях проволоки, соответствующих перегородкам ячейки, из соображений симметрии – нулевой потенциал:

$$E(r,0) = E(r,L) = 0, \quad r \in \left[0, \frac{d}{2}\right]. \quad (3)$$

Краевая задача (1)–(2) решается методом разделения переменных. Решение имеет вид

$$E(r, z) = \frac{4iL\rho_{np}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi(2n-1)}{L} z}{(2n-1)^2} \cdot \frac{I_0\left(\frac{\pi(2n-1)}{L} r\right)}{\left(I_1\left(\frac{\pi(2n-1)}{L} \cdot \frac{d}{2}\right)\right)}, \quad (4)$$

где $i_0\left(\frac{\pi(2n-1)}{L}\right)$; $i_1\left(\frac{\pi(2n-1)}{L} \cdot \frac{d}{2}\right)$ – модифицированные функции Бесселя мнимого аргумента первого рода соответственно нулевого и первого порядков.

Усреднение потенциала (4) по поперечному сечению проволоки дает выражение

$$E_{cp}(z) = \frac{4}{\pi d^2} \int_0^{2\pi/d} \int_0^{d/2} E(r, z) d\theta dr = \frac{2\rho_{np}D}{d} (Lz - z^2). \quad (5)$$

Одномерное усредненное распределение потенциала (5) совпадает с решением, полученным ранее другим методом [6], отличие только в обозначениях. На поверхности проволоки искомое распределение потенциала описывается выражением

$$E_n(z) = E\left(\frac{d}{2}, z\right) = \frac{4iL\rho_{np}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi(2n-1))}{(2n-1)^2} \cdot \frac{i_0(\pi(2n-1) \frac{d}{2L})}{i_1(\pi(2n-1) \frac{d}{2L})}. \quad (6)$$

Тождественными преобразованиями из общего решения (6) можно выделить (5):

$$E_n(z) = \frac{2\rho_{np}D}{d} (Lz - z^2) + \frac{4iL\rho_{np}}{\pi^2} \sum_{L=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\pi(2n-1) \frac{z}{L}\right)}{(2n-1)^2} \cdot \frac{I_2\left(\frac{\pi(2n-1)}{2L} d\right)}{I_1\left(\pi(2n-1) \frac{d}{2L}\right)} \quad (7)$$

Таким образом, максимальная ошибка усреднения

$$\Delta_{\max} = \max_{z \in [0, L]} |E_n(z) - E_{cp}(z)| = \frac{4iL\rho_{np}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)^2} \cdot \frac{I_2\left(\pi(2n-1) \frac{d}{2L}\right)}{I_1\left(\pi(2n-1) \frac{d}{2L}\right)}.$$

Проведем оценку Δ_{\max} . Так как

$$\frac{I_2\left(\pi(2n-1) \frac{d}{2L}\right)}{I_1\left(\pi(2n-1) \frac{d}{2L}\right)} < \frac{I_2\left(\pi \frac{d}{2L}\right)}{I_1\left(\pi \frac{d}{2L}\right)} \quad \text{при } n > 1$$

и

$$\frac{I_2\left(\pi \frac{d}{2L}\right)}{I_1\left(\pi \frac{d}{2L}\right)} \approx \frac{\pi d}{8L} \quad \text{при } \pi \frac{d}{2L} \ll 1,$$

поэтому

$$\Delta_{\max} < G \frac{D\rho_{np}d}{\pi}, \quad (8)$$

где $G = 0,916$ – постоянная Каталана.

Для определения формы электрода, обеспечивающего выведенное распределение потенциала и, следовательно, постоянную плотность тока I , заметим, что падение напряжения по любой из линий тока между сечением проволоки в перегородке [условие (3)] и вспомогательным электродом, являющимся эквипотенциальным, постоянно. Для введения в программу такого параметра конструкции ячейки, как минимальное расстояние от проволоки до электрода m (радиус проходного отверстия электрода), зафиксируем точку $z = L/2$, соответствующую этому сечению электрода. Приравняем падение напряжения по произвольной линии тока к падению напряжения по линии тока, проходящей через $z = L/2$:

$$E_{cp}(z) + E_{нол}(z) + D\rho_{эл} \frac{d}{2} \ln \frac{r(z)}{d} = E_{cp}\left(\frac{L}{2}\right) + E_{нол}\left(\frac{L}{2}\right) + i\rho_{эл} \frac{d}{2} \ln \frac{d+2m}{d}. \quad (9)$$

В силу $i = \text{const}$ скачок потенциала на границе проволока-электролит также постоянен, поэтому из выражения (9) следует формула, задающая радиус внутренней полости электрода для каждой точки продольной оси OZ :

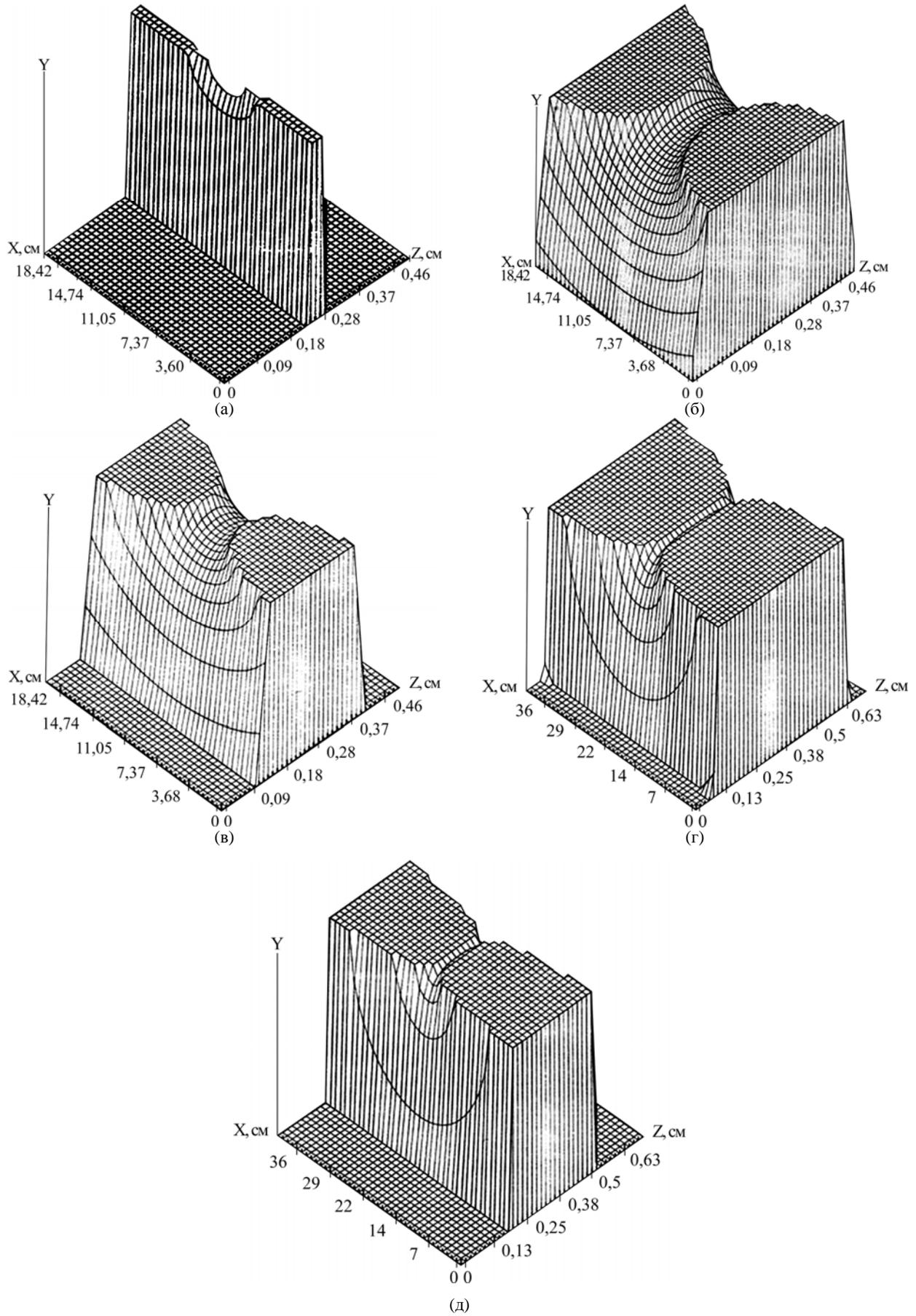
$$r(z) = \left(\frac{d}{2} + m\right) e^{\frac{2(E_{cp}(L/2) - E_{cp}(z))}{\rho_{эл} d}}. \quad (10)$$

Ввиду того, что m на несколько порядков превосходит d , $d/2$ для практических расчетов можно опустить. Подставив (5) в (10), упростим формулу для электрода:

$$r(z) = m \exp\left\{\frac{4\rho_{np}}{\rho_{эл} d^3} \left(z - \frac{L}{2}\right)^2\right\}. \quad (11)$$

Выражение (11) содержит лишь параметры конструкции ячейки и проволоки, а также величину удельного сопротивления электролита.

Для практической реализации задачи определения оптимальных параметров электрохимиче-



Форма поверхности электрода для выравнивания плотности тока при электрохимической обработке микропровода при:
 (а) – $d = 0,0001$ см; $\rho_{np} = 8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см; $\rho_{эл} = 9$ Ом·см; (б) – $d = 0,001$ см; $\rho_{np} = 8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см; $\rho_{эл} = 9$ Ом·см; (в) – $d = 0,001$ см;
 $\rho_{np} = 8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см; $\rho_{эл} = 3,1$ Ом·см; (г) – $d = 0,001$ см; $\rho_{np} = 0,00013$ Ом·см; $\rho_{эл} = 9$ Ом·см; (д) – $d = 0,001$ см;
 $\rho_{np} = 0,00013$ Ом·см; $\rho_{эл} = 3,1$ Ом·см.

ской ячейки и формы электродов целесообразно воспользоваться ограничениями по длине зон обработки, связанными с физической сущностью задачи. Максимальный размер длины рабочей зоны ячейки ограничен допустимыми токовыми нагрузками на изделие, зависящими от его электрического сопротивления, а также в некоторой степени от теплопроводности применяемого электролита. Естественно, что при уменьшении диаметра проволоки снижается максимально допустимая длина рабочей зоны из-за резкого уменьшения допустимой токовой нагрузки. Так, например, для электрохимической обработки в 80% H_3PO_4 проволоки из сплава сопротивления Х20Н80 с исходным диаметром 25 мкм предельно допустимая сила тока составляет 600 мА, при диаметре 21 мкм – 400 мА, а при уменьшении диаметра до 11 мкм – всего лишь 175 мА. Для оценки влияния среды можно привести данные по вольфрамовой проволоке: на воздухе для диаметра 12 мкм предельно допустимая сила тока составляет 120 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных теоретических расчетов по выражению (11) были получены оптимальные формы электродов для обеспечения равномерного распределения плотности тока по длине зон при электрохимической обработке прецизионной проволоки различного сортамента в разных электролитах. Некоторые из полученных фигур представлены на рисунке. При их сравнении наглядно видно влияние на конфигурацию внутренней полости электрода природы электролита, природы металла и диаметра обрабатываемой проволоки, причем влияние последнего наиболее существенно, как и следует из формулы (11) [1].

Таким образом, в работе благодаря решению трехмерной задачи распределения потенциала внутри проволоки получены конфигурации формы электродов, обеспечивающих равномерное распределение плотности тока, и предложена более совершенная методика определения оптимальных параметров электрохимической ванны. Проведенные расчеты и исследования необходимы при конструировании и создании высокопроизводительных технологических комплексов электрохимической обработки с автоматическим управлением процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сироткин С.Н., Помосов А.В., Воронина Т.А. О распределении плотности тока на проволоке в ванне электрохимического полирования с биполярным подводом тока. *Журнал прикладной химии*. 1980, (5), 1186–1187.
2. Патент РФ № 103361. *Устройство для электрохимической обработки внутренней поверхности труб*. С.Н. Сироткин, В.Н. Репнягов, Г.А. Саламатов, Т.А. Воронина, Е.В. Скомороха, А.А. Митькин, 2011 г.
3. Патент РФ № 113739. *Устройство для электрохимической обработки внутренней поверхности труб*. Г.А. Саламатов, А.Л. Цветов, В.Н. Репнягов, И.А. Прочухан, С.А. Савельев, Е.В. Скомороха, Н.М. Кузнецов, А.И. Гераськин, 2012 г.
4. Патент РФ № 135649. *Устройство для электрохимической обработки внутренней поверхности труб*. С.Н. Сироткин, И.А. Прочухан, Г.А. Саламатов, Т.А. Воронина, Н.М. Кузнецов, Е.В. Скомороха, 2013 г.
5. Сироткин С.Н., Воронина Т.А., Прочухан И.А. и др. Разработка, создание и внедрение конструкций электродов для обработки внутренней поверхности труб. *Сборник тезисов докладов 10-й международной конференции «Покрyтия и обработка поверхности»*. Москва, Россия, 2013 г., с. 92–93.
6. Сироткин С.Н., Воронина Т.А., Зорин А.И., Помосов А.В. Определение оптимальных параметров биполярной ванны электрохимической обработки проволоки. *Журнал прикладной химии*. 1980, (9), 2125–2127.

Поступила 07.07.14

Summary

In this work, due to the solution of a three-dimensional problem of the potential distribution inside the wire, the configurations of forms of electrodes that provide a uniform distribution of the current density were obtained and the improved method of determination of optimal design parameters of an electrochemical bath was offered. The performed calculations and investigations are necessary for the design and fabrication of highly efficient technological complexes of the automatically controlled electrochemical treatment.

Keywords: form of electrode, electrochemical treatment, current density, microwire.