

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ВАННЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ КАТОДАМИ И БИПОЛЯРНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Ю. В. Литовка, Ван Зыонг Као

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор С. Я. Егоров

Ключевые слова: биполярный электрод; гальванотехника; дополнительные катоды; неравномерность гальванического покрытия; оптимизация.

Аннотация: Рассмотрена задача моделирования и оптимизации гальванической ванны с дополнительными катодами и биполярным электродом. Приведен пример решения задачи поиска оптимальных размеров и размещения дополнительных катодов и биполярного электрода в пространстве гальванической ванны, приводящей к получению наиболее равномерного покрытия на деталях-катадах. Представлен результат распределения толщины покрытия на поверхности основного катода.

Нанесение гальванопокрытий придает поверхности металла определенные специальные свойства: твердость, износостойкость, декоративность и др. Качество гальванических покрытий характеризуется такими показателями, как равномерность, микротвердость, блеск, прочность сцепления электрохимических покрытий с основой, пористость, коррозионная стойкость, износостойкость и др. Одним из самых важных свойств гальванического покрытия является равномерность. В идеальном случае толщина покрытия будет одинакова во всех точках поверхности покрываемого изделия. Из-за неоднородного электрического поля гальваническое покрытие получается неравномерным.

При проведении гальванического процесса толщина покрытия в каждой точке катода непосредственно зависит от распределения электрического тока на профиле катода [1]. На краях или части катода, находящейся близко к аноду, обычно получается большая толщина покрытия, так как

Литовка Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», e-mail: polychem@list.ru; Као Ван Зыонг – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ТамбГТУ, г. Тамбов.

в таких точках плотность тока больше, чем в других местах. В отверстиях и впадинах, напротив, толщина покрытия меньше (а в глухих отверстиях покрытие вообще может не получаться). Для снижения неравномерности существует ряд способов, осуществляемых с использованием фигурного анода; многоанодных гальванических ванн; реверсивного, импульсного, асимметричного переменного источника тока; токонепроводящего перфорированного экрана; дополнительных катодов; биполярного электрода и др. [1 – 3].

Цель работы – улучшение равномерности распределения толщины покрытия по поверхности детали-катода. Предложено использовать гальваническую ванну с комбинацией биполярного электрода и дополнительных катодов.

Между анодом и катодом располагают биполярный электрод, не находящийся в электрическом контакте с токоподводящими штангами ванны. При гальваническом процессе на поверхности биполярного электрода начинается разряд ионов. При этом поверхность биполярного электрода делится на две части, и они выполняют разные функции. Первая часть поверхности, приближенная к аноду, будет выполнять функцию катода, а вторая часть поверхности, приближенная к катоду, – функцию анода. В результате электрическое поле в ванне искажается и, в зависимости от расположения биполярных электродов, можно получить более равномерное покрытие. Биполярные электроды целесообразно размещать напротив углублений детали-катода.

Дополнительные катоды располагаются около краев основного катода и подключаются к токоподводящим катодным штангам ванны. Электрический ток распределяется не только на основной катод, но и на дополнительные катоды, и у краев основного катода плотность тока уменьшается.

Такая комбинация биполярного электрода и дополнительных катодов улучшает равномерность гальванического покрытия. Проблемой являются сложность в технологическом плане и выбор конфигурации биполярного электрода и дополнительных катодов. Традиционно размеры и расположение биполярного электрода и дополнительных катодов определяют экспериментально. Это сопряжено со значительными материальными и временными затратами и далеко не всегда удается получить оптимальные решения. Для решения данной проблемы в статье рассматриваются моделирование и оптимизация гальванической ванны с биполярным электродом и дополнительными катодами. Кроме того, приведено описание эксперимента, в котором осуществляется нанесение цинкового покрытия.

В качестве примера рассмотрена гальваническая ванна с плоским анодом размерами $A_1 \times A_2$, плоским биполярным электродом размерами $B_1 \times B_2$ и двумя дополнительными плоскими катодами с одинаковыми размерами $D_1 \times D_2$. Основной катод – уголок размером $K_1 \times K_2$. Размещение электродов в ванне показано на рис. 1. Положение электродов будем задавать координатами базовых точек, в качестве которых для всех объектов в гальванической ванне примем пересечение диагоналей.

Для данного примера постановка задачи выглядит следующим образом. Заданы размеры H_x, H_y, H_z гальванической ванны, размеры анода $A_1 \times A_2$, размеры катода $K_1 \times K_2$ и положения базовых точек (x_a, y_a, z_a – анода и x_k, y_k, z_k – катода) в ванне. Для получения наименьшей неравномерности R гальванического покрытия необходимо найти:

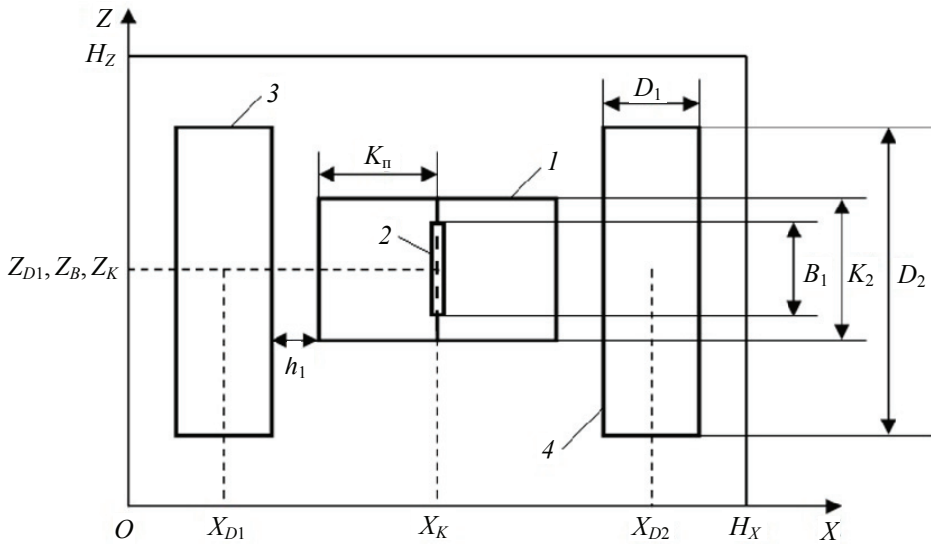


Рис. 1. Схема размещения электродов в ванне на плоскости XOZ (вид спереди):
 1 – основной катод; 2 – биполярный электрод; 3, 4 – дополнительные катоды

- размеры $D_1 \times D_2$ дополнительных катодов и координаты их базовых точек;
- размеры $B_1 \times B_2$ биполярного электрода и координаты его базовой точки.

На рисунке 1 показаны проекции основного и дополнительных катодов и биполярного электрода на плоскости XOZ и рассмотрен пример описания базовых точек катодов. Размер проекции $K_п$ основного катода вычисляется по формуле

$$K_п = K_1 \cos(\alpha/2),$$

где α – угол между плоскостями основного катода;

Для моделирования электрического поля гальванической ванны используется следующая математическая модель:

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i(x, y, z) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}}; \quad (1)$$

$$\delta(x, y, z) = \frac{\partial}{\partial \rho} \eta i_k(x, y, z) T; \quad (2)$$

$$i_k(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi(x, y, z); \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{S_n} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\varphi(x, y, z) + F_a(i_a(x, y, z))}{S_a} = U_a; \quad (6)$$

$$\frac{\varphi(x, y, z) + F_k(i_k(x, y, z))}{S_k} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\varphi(x, y, z) + F_{\kappa} (i_{\kappa}(x, y, z))}{S_{\text{доп.к. } i}} = 0, \quad i = 1, 2; \quad (8)$$

$$\frac{\varphi(x, y, z) + F_{\text{б.э}}(i(x, y, z))}{S_{\text{б.э}}} = U_{\text{б.э}}, \quad (9)$$

где $\delta_i(x, y, z)$ – толщина покрытия в точке катода с координатами (x, y, z) , мкм; δ_{\min} – минимальная толщина покрытия, мкм; m – число точек, в которых вычисляется толщина покрытия; \mathcal{E} – электрохимический эквивалент металла покрытия, кг/(А·с); ρ – плотность металла покрытия, кг/м³; η – выход металла по току; $i_{\kappa}(x, y, z)$ – катодная плотность тока, А; (x, y, z) – линейные координаты, мм; T – время нанесения покрытия, с; χ – электропроводность электролита, м/Ом; $\varphi(x, y, z)$ – потенциал электрического поля в любой точке гальванической ванны с координатами (x, y, z) , В; n – нормаль к поверхности изолятора; $S_{\text{и}}$ – площадь поверхности изолятора, м²; $F_{\text{а}}(i_{\text{а}}(x, y, z))$, $F_{\kappa}(i_{\kappa}(x, y, z))$, $F_{\text{б.э}}(i(x, y, z))$ – функции поляризации на аноде, катоде (дополнительном катоде) и биполярном электроде соответственно; $S_{\text{а}}$, S_{κ} , $S_{\text{доп.к.}}$, $S_{\text{б.э}}$ – площади поверхности анода, катода, дополнительного катода и биполярного электрода соответственно, м²; i – номер дополнительного катода; $U_{\text{а}}$, $U_{\text{б.э}}$ – напряжения на аноде и на биполярном электроде соответственно, В.

В математическую модель входит выражение (1) для расчета критерия неравномерности R ; закон Фарадея (2) для определения толщины покрытия на катоде; закон Ома в дифференциальной форме (3) для определения плотности тока; уравнение Лапласа (4) для нахождения распределения потенциала φ в объеме электролита; краевого условия (5) на границе электролит–изолятор; краевых условий на аноде (6), катоде (7), дополнительных катодах (8) и биполярном электроде (9).

Полученная математическая модель позволяет вычислить толщину покрытия во всех точках катода с координатами (x, y, z) . Алгоритм для решения математической модели описан в работе [4].

Для решения задачи оптимизации размеров и расположения биполярного электрода и дополнительных катодов необходимо задать ограничения.

Дополнительные катоды располагаются симметрично от основного катода и не пересекаются с ним. Запишем ограничения на размещение дополнительных катодов:

– условия непересечения катода с дополнительными катодами:

$$x_{\kappa} - K_{\text{п}} - h_1 > x_{D1} + D_1/2; \quad (10)$$

$$x_{\kappa} + K_{\text{п}} + h_1 < x_{D2} - D_1/2, \quad (11)$$

где x_{κ} , x_{D1} , x_{D2} – координаты базовых точек основного катода и дополнительных катодов соответственно, мм; $K_{\text{п}}$ – проекция размера основного катода на плоскости XOZ , мм; D_1 – размер дополнительных катодов по оси OX , мм; h_1 – расстояние между дополнительными катодами и крайней точкой основного катода, мм;

– условия нахождения дополнительных катодов внутри ванны:

$$x_{D1} - D_1/2 > 0; \quad (12)$$

$$x_{D2} + D_1/2 < H_X, \quad (13)$$

где H_X – размер гальванической ванны по оси OX , мм;
– ограничение на размеры дополнительных катодов:

$$0 < D_2 < H_Z, \quad (14)$$

где D_2 , H_Z – размеры дополнительных катодов и гальванической ванны по оси OZ соответственно, мм.

Базовой точкой биполярного электрода (x_B , y_B , z_B) является пересечение его диагоналей. Ограничения на размещение биполярного электрода запишутся следующим образом:

– условия нахождения биполярного электрода между анодом и основным катодом:

$$y_B + B_2/2 < y_K; \quad (15)$$

$$y_B - B_2/2 > y_A, \quad (16)$$

где y_K , y_A – координаты базовых точек основного катода и анода;
– ограничение на размеры биполярного электрода:

$$0 < B_1 < H_Z. \quad (17)$$

Для решения задачи поиска оптимальной формы и расположения дополнительных катодов и биполярных электродов использовался метод полного перебора. В качестве примера решения задачи оптимизации рассматривался процесс цинкования в гальванической ванне размерами $100 \times 120 \times 150$ мм. В ванне расположены прямоугольный анод размером 40×40 мм; катод в виде уголка размером 30×30 мм; сила тока: 0,4 А (в случае без дополнительных катодов), 0,8 А (в случае присутствия дополнительных катодов); время нанесения покрытия: 30 мин; состав электролита: ZnO (12 г/л), NaOH (115 г/л); измеренная удельная проводимость электролита $23,34 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$, катодный выход по току $\eta = 0,98 = \text{const}$, электрохимический эквивалент $3,38 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(А} \cdot \text{с)}$, плотность цинка 7130 кг/м^3 ; уровень электролита 90 мм.

После решения задачи оптимизации получены следующие результаты. Размеры двух дополнительных катодов 15×60 мм. Они должны быть расположены равномерно от краев основного катода на 5 мм. Размеры биполярного электрода 20×20 мм. Он расположен на расстоянии 10 мм от базовой точки основного катода. Значение критерия неравномерности составляет в отсутствие дополнительных катодов и биполярного электрода $R = 1$; для оптимально расположенных дополнительных катодов и биполярного электрода $R = 0,453$.

Для проверки адекватности математической модели и правильности решения задачи оптимизации проведен эксперимент с такими же параметрами электролитической ячейки, что и использовалось в расчетах. Распределение толщины покрытия на поверхности катода показано на рис. 2. Значение критерия неравномерности составляет в отсутствие дополнительных катодов и биполярного электрода $R = 0,99$; для оптимально расположенных дополнительных катодов и биполярного электрода $R = 0,46$.

Схема расположения электродов после решения задачи оптимизации представлена на рис. 3.

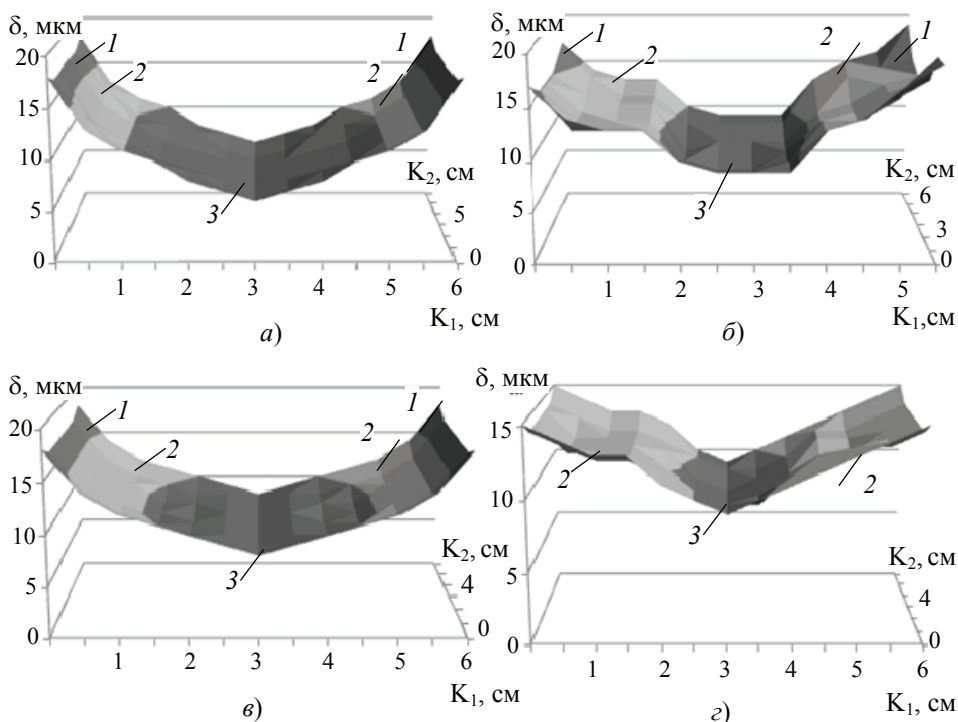


Рис. 2. Результат распределения толщины покрытия на поверхности катода без оптимизации электродов в численном расчете (а) и эксперименте (б); с оптимизацией электродов в численном расчете (в) и эксперименте (г):
 1 – 15 – 20; 2 – 10 – 15; 3 – 5 – 10

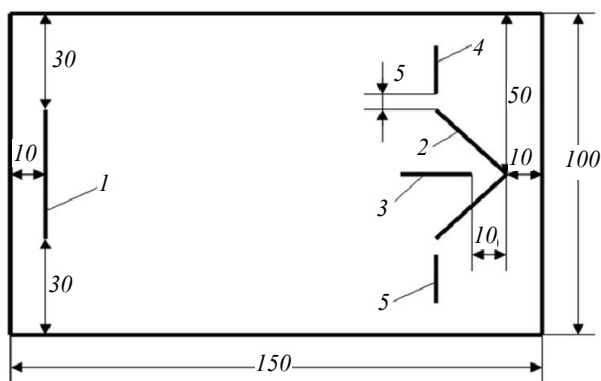


Рис. 3. Схема расположения электродов после решения задачи оптимизации (вид сверху):
 1 – анод; 2 – основной катод; 3 – биполярный электрод;
 4, 5 – дополнительные катоды

Выводы и результаты: улучшение равномерности при решении задачи оптимизации составляет около 53 %. В случае, если катод будет иметь более сложную форму, можно пользоваться предложенной методикой с вышеприведенной математической моделью. Количество, размеры и расположение дополнительных катодов и биполярных электродов определяются при решении задачи оптимизации.

Список литературы

1. Каданер, Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. – Харьков : Изд-во Харьк. ГУ, 1960. – 414 с.
2. Литовка, Ю. В. Оптимальное управление многоанодной гальванической ванной / Ю. В. Литовка // Приборы и системы упр. – 1997. – № 4. – С. 48 – 49.
3. Литовка, Ю. В. Экспериментальное исследование значений неравномерности и микротвердости никелевого гальванического покрытия при реверсировании тока / Ю. В. Литовка, А. С. Егоров // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 177 – 180.
4. Литовка, Ю. В. Численный расчет электрического поля в гальванической ванне с биполярными электродами / Ю. В. Литовка, В. В. Михеев // Теорет. основы хим. технологии. – 2006. – Т. 40, № 3. – С. 328 – 334.

References

1. Kadaner L.I. *Ravnomernost' gal'vanicheskikh pokrytii* [The uniformity of galvanic coatings], Kharkiv: Izd-vo Khar'k. GU, 1960, 414 p. (In Russ.)
2. Litovka Yu.V. [Optimal control abounding galvanic bath], *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and Control Systems], 1997, no. 4, pp 48-49. (In Russ.)
3. Litovka Yu.V., Egorov A.S. [Experimental Study of Irregularity and Microhardness Values of Nickel Electroplated Coating under Reverse Current], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 177-180. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Litovka Yu.V., Mikheev V.V. [Numerical calculation of the electric field in an electroplating bath with bipolar electrodes], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2006, vol. 40, no. 3, pp. 328-334. (In Russ., abstract in Eng.)

Modeling and Optimization of the Plating Bath with Additional Cathode and Bipolar Electrode

Yu. V. Litovka, Van Zyong Cao

Tambov State Technical University, Tambov

Keywords: additional cathodes; bipolar electrode; electroplating; optimization; plating unevenness.

Abstract: The authors consider the problem of modeling and optimization of the plating bath with additional cathode and bipolar electrode. We give an example of solving the problem of finding an optimal size and placement of additional cathodes and bipolar electrode in the space of the plating bath, resulting in the production of more uniform coating on the cathode details. The result of coating thickness distribution on the surface of the main cathode is given.

© Ю. В. Литовка, В. З. Као, 2016