

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ВАННЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ КАТОДАМИ

Ю. В. Литовка, В. З. Као

*Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; polychem@list.ru*

Ключевые слова: критерий неравномерности; плотность тока; потенциал; равномерность; размещение дополнительных катодов; толщина покрытия; электрическое поле.

Аннотация: Показаны преимущества использования дополнительных катодов при оптимальном управлении гальваническими процессами. Рассмотрено моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами. Поставлена и решена задача оптимизации гальванической ванны: определить размеры дополнительных катодов и их размещение в пространстве гальванической ванны, при которых критерий неравномерности распределения покрытия по поверхности детали-анода минимален. Предложена математическая модель, включающая уравнение Лапласа для расчета электрического поля в гальванической ванне, закон Фарадея и закон Ома в дифференциальной форме. Разработан алгоритм решения задачи оптимизации. Для примера решена задача оптимального размещения дополнительных плоских катодов в пространстве гальванической ванны, что привело к снижению неравномерности покрытия на 47 %. Представлен результат распределения толщины покрытия на поверхности основного катода.

Гальванические покрытия используются для придания поверхности металла определенных специальных свойств, таких как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость и др., и характеризуются следующими показателями: минимальной толщиной покрытия, равномерностью, микротвердостью, блеском, прочностью сцепления электрохимических покрытий с основой, пористостью, коррозионной стойкостью, износостойкостью. Наиболее важным из перечисленных свойств является равномерность. Если нанесенное покрытие на некоторых участках поверхности изделия будет иметь толщину меньше заданной, то это будет являться браком; если больше заданной – могут возникнуть проблемы при сборке узлов.

Для улучшения равномерности распределения покрытия существует ряд способов оптимального управления гальваническими процессами, осуществляемыми с использованием многоанодных гальванических ванн [1]; реверсивного [2], импульсного, асимметрического переменного источника тока; фигурного анода; биполярных электродов и др.

При гальваническом процессе на краях катода плотность тока больше, чем в центральной части и, соответственно, толщина покрытия будет больше, чем в других местах. Для устранения данного эффекта можно использовать гальваническую ванну с дополнительными катодами [3]. Сущность применения допол-

нительных катодов состоит в том, что около краев основного катода располагают дополнительные, с помощью которых распределение плотности тока у краев основного катода, а соответственно и толщина нанесенного покрытия на крайних его точках, будут уменьшаться. Несмотря на то что этот способ известен, традиционно размеры и расположение дополнительных катодов определяют экспериментально. Это сопряжено со значительными материальными и временными затратами и далеко не всегда удается получить оптимальные решения.

Рассмотрим моделирование и оптимизацию гальванической ванны с дополнительными катодами, в частности случай, когда в электрохимической системе расположены плоские анод, основной катод и два дополнительных катода (рис. 1). Примем допущение: дополнительные катоды имеют одинаковые размеры $L_1 \times L_2$ и располагаются по бокам основного катода на одинаковом расстоянии h от него.

Постановка задачи. Для получения наименьшей неравномерности гальванического покрытия найти размеры $L_1 \times L_2$ дополнительных катодов и расстояние h между ними и основным катодом при заданных размерах H_x, H_y, H_z гальванической ванны, размерах $A_1 \times A_2$ анода, $K_1 \times K_2$ основного катода и положениях базовых точек (x_a, y_a, z_a – анода и x_k, y_k, z_k – катода) в ванне.

В качестве базовой точки для всех объектов в гальванической ванне примем пересечение диагоналей.

Пример описания базовых точек катодов рассматривается на рис. 2.

Для нахождения электрического поля гальванической ванны используем математическую модель, состоящую из следующих уравнений:

– расчет критерия неравномерности R

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

где δ_{\min} – минимальная толщина покрытия, мкм; $\delta_i(x, y, z)$ – толщина покрытия в точке катода с координатами x, y, z , мкм; m – число точек, в которых вычисляется толщина покрытия;

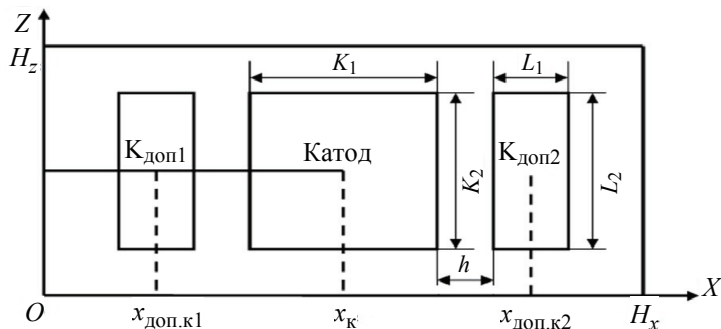


Рис. 2. Одно из сечений ванны по плоскости XOZ:

$K_{\text{доп1}}, K_{\text{доп2}}$ – дополнительные катоды

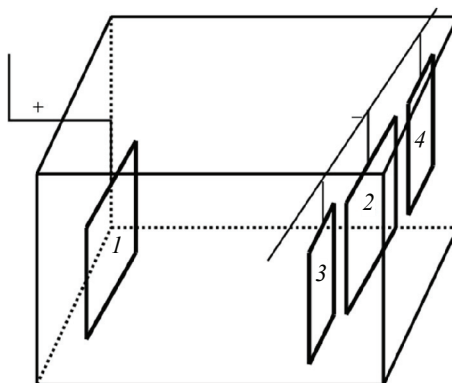


Рис. 1. Схема расположения электродов:

1 – анод; 2 – основной катод;
3, 4 – дополнительные катоды

– закон Фарадея для определения толщины покрытия на катоде

$$\delta(x, y, z) = \frac{\Theta}{\rho} \eta i_{\text{к}}(x, y, z) T, \quad (2)$$

где Θ – электрохимический эквивалент металла покрытия, кг/(А·с); ρ – плотность металла покрытия, кг/м³; η – выход металла по току; $i_{\text{к}}(x, y, z)$ – катодная плотность тока, А; x, y, z – линейные координаты, мм; T – время нанесения покрытия, с;
– закона Ома в дифференциальной форме для определения плотности тока

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

где χ – электропроводность электролита, м/Ом; $\varphi(x, y, z)$ – потенциал электрического поля в любой точке гальванической ванны с координатами x, y, z , В;

– уравнение Лапласа для нахождения распределения потенциала φ в объеме электролита

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

– краевое условие на границе «электролит – изоляторы»

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{S_{\text{и}}} = 0, \quad (5)$$

где n – нормаль к поверхности изолятора; $S_{\text{и}}$ – площадь поверхности изолятора, м²;

– краевые условия на аноде, катоде и дополнительных катодах, соответственно:

$$\varphi(x, y, z) + F_{\text{а}}(i_{\text{а}}(x, y, z))/S_{\text{а}} = U_{\text{а}}; \quad (6)$$

$$\varphi(x, y, z) + F_{\text{к}}(i_{\text{к}}(x, y, z))/S_{\text{к}} = 0; \quad (7)$$

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

где $F_{\text{а}}(i_{\text{а}}(x, y, z))$, $F_{\text{к}}(i_{\text{к}}(x, y, z))$ – функции поляризации на аноде, катоде (дополнительном катоде), соответственно; $S_{\text{а}}$, $S_{\text{к}}$, $S_{\text{доп.к}i}$ – площадь поверхности анода, катода и дополнительного катода, соответственно, м²; i – номер дополнительного катода; $U_{\text{а}}$ – напряжение на аноде, В.

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

Условия непересечения основного катода с дополнительными:

$$x_{\text{к}} - \frac{K_1}{2} - h > x_{\text{доп.к}1} + \frac{L_1}{2}; \quad (9)$$

$$x_{\text{к}} + \frac{K_1}{2} + h < x_{\text{доп.к}2} - \frac{L_1}{2}, \quad (10)$$

где $x_{\text{к}}$, $x_{\text{доп.к}1}$, $x_{\text{доп.к}2}$ – координаты базовых точек основного и дополнительных катодов соответственно, мм; K_1 , L_1 – размеры основного и дополнительных катодов по оси OX соответственно, мм; h – расстояние между основным и дополнительными катодами, мм.

Условия нахождения дополнительных катодов внутри ванны:

$$x_{\text{доп.к}1} - \frac{L_1}{2} > 0; \quad (11)$$

$$x_{\text{доп.к}2} + \frac{L_1}{2} < H_x; \quad (12)$$

где H_x – размер гальванической ванны по оси OX , мм.

Условие на размеры дополнительных катодов

$$0 < L_2 \leq K_2, \quad (13)$$

где K_2, L_2 – размеры основного и дополнительных катодов по оси OZ соответственно, мм.

Для получения толщины покрытия в точке (x, y, z) необходимо найти потенциал в ней. Центральным уравнением математической модели является дифференциальное уравнение Лапласа второго порядка в частных производных с крайевыми условиями II и III рода. С помощью конечно-разностных методов дифференциальное уравнение аппроксимируется сетками по координатам x, y, z [4]. Полученная система алгебраических уравнений решается методами верхней релаксации и простых итераций. После разбиения ванны сеткой, значение функции потенциала $\varphi(x, y, z)$ заменяется сеточной функцией $\varphi(x_i, y_j, z_k)$ и обозначается как $\varphi_{i,j,k}$, $i = 0, 1, \dots, H_x$, $j = 0, 1, \dots, H_y$, $k = 0, 1, \dots, H_z$. Аппроксимация дифференциального уравнения в частных производных с соответствующими крайевыми условиями осуществляется разностным оператором по семиточечному шаблону. Итак, уравнение Лапласа (4) принимает вид

$$\frac{\varphi_{i-1,j,k} - 2\varphi_{i,j,k} + \varphi_{i+1,j,k}}{h_x^2} + \frac{\varphi_{i,j-1,k} - 2\varphi_{i,j,k} + \varphi_{i,j+1,k}}{h_y^2} + \frac{\varphi_{i,j,k-1} - 2\varphi_{i,j,k} + \varphi_{i,j,k+1}}{h_z^2} = 0, \quad (14)$$

где h_x, h_y, h_z – шаг сетки.

Уравнение (14) преобразуется к виду

$$\varphi_{i,j,k} = \frac{\varphi_{i-1,j,k} + \varphi_{i+1,j,k}}{2h_x^2 \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_y^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)} + \frac{\varphi_{i,j-1,k} + \varphi_{i,j+1,k}}{2h_y^2 \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_y^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)} + \frac{\varphi_{i,j,k-1} + \varphi_{i,j,k+1}}{2h_z^2 \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_y^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)}. \quad (15)$$

Для гальванической ванны изоляторами являются футерованные токонепроводящие стенки и граница «электролит – воздух». Краевое условие (5) преобразуется к следующим выражениям:

$$\frac{\varphi_{1,j,k} - \varphi_{0,j,k}}{h_x} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\varphi_{n_x,j,k} - \varphi_{n_x-1,j,k}}{h_x} = 0; \quad (17)$$

$$\frac{\varphi_{i,1,k} - \varphi_{i,0,k}}{h_y} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\varphi_{i,n_y,k} - \varphi_{i,n_y-1,k}}{h_y} = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\varphi_{i,j,1} - \varphi_{i,j,0}}{h_z} = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\varphi_{i,j,n_z} - \varphi_{i,j,n_z-1}}{h_z} = 0, \quad (21)$$

где n_x, n_y, n_z – число узлов сетки по координатам x, y, z .

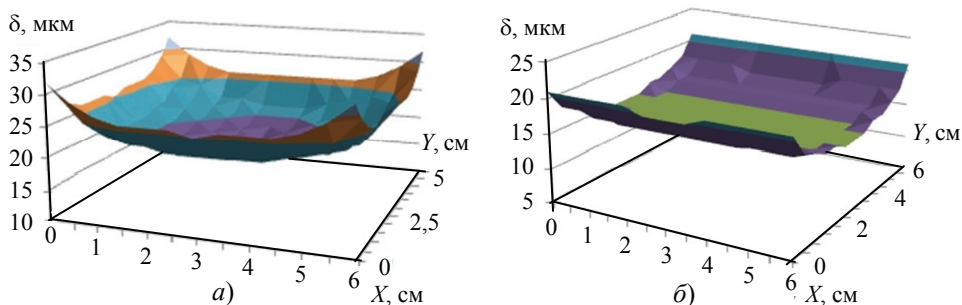


Рис. 3. Распределение толщины покрытия на поверхности катода при численном расчете, мкм:
 ■ – 30...35; ■ – 25...30; ■ – 20...25; ■ – 15...20; ■ – 10...15
 а – без дополнительных катодов; б – с дополнительными катодами

Уравнения (6) – (8) соответственно принимают вид:

$$\varphi_{i,j,k} + F_a(i,j,k)/S_a = U_a; \quad (22)$$

$$\varphi_{i,j,k} + F_k(i,j,k)/S_k = 0; \quad (23)$$

$$\varphi_{i,j,k} + F_k(i,j,k)/S_{\text{доп.к } i} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (24)$$

Для нахождения оптимальных размеров и размещения дополнительных катодов используется следующий алгоритм.

1. Задаются начальные размеры $L_1 \times L_2$ дополнительных катодов и расстояние h между ними и основным катодом.

2. Рассчитывается распределение покрытия на поверхности основного катода с помощью вышеуказанной математической модели без учета дополнительных катодов. При этом запоминается значение минимальной толщины покрытия.

3. Рассчитывается значение критерия неравномерности R_1 .

4. Заново рассчитывается распределение покрытия на поверхности основного катода с помощью вышеуказанной математической модели и с учетом дополнительных катодов.

5. Рассчитывается значение критерия неравномерности R_2 и сравнивается с R_1 . Если $R_2 < R_1$, то сохраняются текущие размеры $L_1 \times L_2$ или расстояние h ; если $R_2 > R_1$, то изменяются размеры $L_1 \times L_2$ или расстояние h с заданным шагом и осуществляется возврат на шаг 4.

6. Цикл заканчивается при достижении дополнительными катодами границы изоляторов.

Программа реализована на языке программирования Borland Delphi 2010. Для контрольного примера решалась задача для гальванической ванны размером $160 \times 160 \times 100$ мм; плоские анод и катод имели одинаковые размеры 60×60 мм.

В ходе выполнения работы рассматривался процесс никелирования в щелочном электролите Уоттса состава, г/л: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 300$; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - 60$; $\text{H}_3\text{BO}_3 - 45$. Температура задавалась постоянной и равной 52°C . Удельная проводимость электролита $17,75 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, катодный выход по току $\eta = 0,98 = \text{const}$, электрохимический эквивалент $3,04 \cdot 10^{-7} \text{ кг}/(\text{А}\cdot\text{с})$, плотность никеля $8900 \text{ кг}/\text{м}^3$.

После решения задачи оптимизации получены следующие результаты. Размеры двух дополнительных катодов 60×25 мм. Они должны быть расположены равномерно от краев основного катода на 10 мм. Значение критерия неравномерности R составляет: в отсутствие дополнительных катодов – 0,2447; для начального приближенного расположения дополнительных катодов – 0,1714; для оптимального расположенного дополнительных катодов – 0,13.

На рисунке 3 показаны результаты расчета и изменение распределения толщины покрытия на поверхности катода.

Таким образом, с помощью дополнительных катодов на поверхности основного катода получается более равномерное покрытие.

Список литературы

1. Литовка, Ю. В. Проверка адекватности математической модели распределения гальванического покрытия на детали в многоанодной ванне / Ю. В. Литовка, Д. С. Соловьёв // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 128 – 135.
2. Литовка, Ю.В. Экспериментальное исследование значений неравномерности и микротвердости никелевого гальванического покрытия при реверсировании тока / Ю. В. Литовка, А. С. Егоров // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 177 – 180.
3. Каданер, Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1960. – 414 с.
4. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 591 с.

Modeling and Optimization of Plating Bath with Supplementary Cathodes

Yu. V. Litovka, V. Z. Cao

*Department “Automated Systems of Decision-Making Support”, TSTU;
polychem@list.ru*

Keywords: coating thickness; criterion of non-uniformity; electric field; location of supplementary cathodes; potential; uniformity.

Abstract: The paper describes the advantages of using supplementary cathodes in the optimal control electroplating processes. The authors consider modeling and optimization of the plating bath with supplementary cathodes. We found the size of the supplementary cathodes and their arrangement in space of the plating bath, in which the criterion of the uneven distribution of the coating on the surface of the part-cathode is minimal. We propose a mathematical model based on the Laplace equation to calculate the electric field in the plating bath, Faraday's law and Ohm's law in differential form. We developed an algorithm for solving the optimization problem. We illustrated the model using the case of optimal allocation of supplementary cathodes in a flat space of the plating bath, which resulted in the reduction in reduction coating unevenness by 47 %. The authors described the results of coating thickness distribution on the main surface of the cathode.

References

1. Litovka Yu.V., Solovjev D.S. [Checking the Adequacy of Mathematical Model for the Distribution of the Galvanic Coating on the Parts in the Multi-Anode Bath], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 128-135. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Litovka Yu.V., Egorov A.S. [Experimental Study of Irregularity and Microhardness Values of Nickel Electroplated Coating under Reverse Current], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 177-180. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kadaner L.I. *Ravnomernost' gal'vanicheskikh pokrytii* [The uniformity of galvanic coatings], Khar'kov: Izdatel'stvo Khar'kovskogo universiteta, 1960, 414 p. (In Russ.)

4. Samarskii A.A., Njikolaiev E.S. *Metody resheniya setochnykh uravnenii* [Methods for solving grid equations], Moscow: Nauka, 1978, 591 p. (In Russ.)

Modellierung und Optimierung der galvanischen Wanner mit den zusätzlichen Kathoden

Zusammenfassung: Es sind die Vorteile der Nutzung der zusätzlichen Kathoden bei der optimalen Steuerung von den galvanischen Prozessen gezeigt. Es sind die Modellierung und die Optimierung der galvanischen Wanne mit den zusätzlichen Kathoden betrachtet. Es ist die Aufgabe der Optimierung der galvanischen Wanne gestellt und gelöst: die Größen der zusätzlichen Kathoden und ihre Unterbringung im Raum der galvanischen Wanne zu finden, bei denen das Kriterium der Ungleichmäßigkeit der Verteilung der Deckung nach der Oberfläche des Details-Kathode minimal ist. Es ist das mathematische Modell, das die Gleichung von Laplace für die Berechnung des elektrischen Feldes in der galvanischen Wanne, das Gesetz von Faraday and das Gesetz von Ohm in der Differentialform aufnimmt, angeboten. Es ist der Lösungsalgorithmus der Aufgabe der Optimierung entwickelt. Es ist die Aufgabe der optimalen Unterbringung der zusätzlichen flachen Kathoden im Raum der galvanischen Wanne als Beispiel gelöst, was zur Senkung der Ungleichmäßigkeit der Deckung auf 47 % gebracht hat. Es ist das Ergebnis der Verteilung der Dicke der Deckung auf der Oberfläche der Hauptkathode dargelegt.

Modélage et optimisation du bain galvanique par des cathodes supplémentaires

Résumé: Sont présentés les avantages de l'utilisation des cathodes supplémentaires lors de la commande optimale des processus galvaniques. Sont examinées la simulation et l'optimisation du bain galvanique par les cathodes supplémentaires. Est résolu le problème de l'optimisation du bain galvanique: trouver les dimensions des cathodes supplémentaires et leur placement dans l'espace du bain quand le critère de la répartition inégale de la couverture sur la surface de la pièce-cathode est minimale. Est proposé un modèle mathématique comprenant l'équation de Laplace pour le calcul du champ électrique dans le bain galvanique, la loi de Faraday et la loi d'Ohm dans la forme différentielle. Est conçu l'algorithme de résolution du problème d'optimisation. Comme exemple, est résolu le problème du placement optimal des cathodes plates supplémentaires dans l'espace du bain, ce qui mène à la réduction de l'inégalité de la couverture à 47 %. Est présenté le résultat de la répartition de l'épaisseur du revêtement sur la surface de la cathode essentielle.

Авторы: *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Као Ван Зыонг* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
