

УДК 621.357:66.011

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ ЭЛЕКТРОДОВ

А. Г. Лютов¹, А. Р. Ишкулова²

¹lutov1@mail.ru, ²Aliya.Ishkulova@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.

Аннотация. Поставлена и решена задача расчета распределения потенциала в ваннах нанесения гальванических покрытий. Разработана математическая модель, учитывающая электрохимические и геометрические факторы, влияющие на равномерность распределения толщины покрытия на поверхности катода. Представлены результаты расчета распределения потенциала и толщины покрытия.

Ключевые слова: гальванические покрытия; уравнение Лапласа; геометрические конфигурации электродов; распределение потенциала и толщины покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных способов защиты металлов от коррозии является нанесение гальванических покрытий. Гальванические покрытия, помимо защиты металлов от коррозии, применяются для повышения твердости, износостойкости, для обеспечения сварки, пайки, электропроводности и свинчиваемости, для придания антифрикционных и декоративных свойств.

Процесс электрохимического осаждения металлических пленок на поверхность деталей требует строгого соблюдения технологических режимов. Для получения качественного покрытия необходимо поддерживать технологические режимы, такие как температура электролита, плотность тока, концентрация компонентов электролита, в некоторых случаях рН электролита, на уровне указанном в технологической документации [1].

Наиболее значимым показателем качества гальванических покрытий является равномерность распределения осаждаемого металла по поверхности обрабатываемого изделия. Особые затруднения с получением равномерного покрытия возникают на деталях сложной геометрической конфигурации. Это в большей степени связано с тем, что разные участки детали удалены от анодов на различное расстояние и от рассеивающих свойств электролитов.

Неравномерность покрытия отрицательно сказывается на антикоррозионных, механических, электрических и других свойствах покрытия, поскольку на отдельных участках изделия толщина может быть меньше минимально допустимого, а на выступающих участках, углах и гранях детали толщина может превышать допустимые значения, что влечет за собой увеличение расхода металла и электроэнергии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее значимыми факторами, влияющими на распределение потенциала и плотности тока по поверхности катода, являются:

1. Электрохимические факторы (изменение катодного потенциала, электропроводности электролита, состав электролита, поляризация и перенапряжение электродов, толщина диффузионного слоя);

2. Геометрические факторы (формы и размеры анодов и катодов, расположение их относительно друг друга и стенок электролизера).

В данной работе предлагается математическая модель процесса нанесения гальванических покрытий, в которой учитываются электрохимические характеристики электродов и геометрические особенности электролизера, анодов и обрабатываемой детали.

Математическая модель разработана с применением пакета прикладных программ Matlab.

УЧЕТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Распределение электрического потенциала в ваннах нанесения гальванических покрытий удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\Delta\varphi(x, y, z) = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; φ – электрический потенциал.

Расчет распределения потенциала в электролизере осаждения металлических покрытий проводится на основе решения уравнения Лапласа (1) с граничными условиями второго рода:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= U - \eta_a \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_a}, \\ \varphi_k &= U + \eta_k \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где U – величина разности потенциалов; η_a , η_k – анодное и катодное перенапряжение; ρ – удельное электросопротивление электролита; n – направление внешней нормали к поверхности электрода; S_a , S_k – поверхности анодов и катодов.

Перенапряжение электродов η – это отклонение электродного потенциала от его равновесного термодинамического значения при поляризации электрода β внешним током [2], расчет которого производится по формуле:

$$\eta = \beta i,$$

где i – рабочая плотность тока, А/дм².

Поляризация β является следствием отставания электродных процессов от перетока электронов на электроде [2]. Поляризация β рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta = \frac{RT}{nFi_d},$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} / \text{с}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{моль}$; T – температура, К; n – число электронов, переносимых в реакции; F – число Фарадея, $F = 96485$

Кл/моль; i_d – предельная диффузионная плотность тока.

Предельная диффузионная плотность тока i_d рассчитывается по формуле:

$$i_d = \frac{nFDC_0}{\delta},$$

где D – коэффициент диффузии; C_0 – концентрация, разряжающихся частиц; δ – толщина диффузионного слоя.

Коэффициент диффузии D и толщина диффузионного слоя δ рассчитываются по формулам, приведенным ниже:

$$\begin{aligned} D &= \frac{V_{\text{ат}} RT}{zF}, \\ \delta &= 5 \sqrt{\frac{D}{\omega}}, \end{aligned}$$

где $V_{\text{ат}}$ – атомный объем; z – заряд ионов; ω – коэффициент вязкости.

Таким образом, граничные условия содержат в себе характеристики электродов, такие как перенапряжение и поляризация, а также учитывается толщина диффузионного слоя.

УЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для учета геометрических факторов в математическую модель вводятся размеры ванны нанесения металлических покрытий, анодов и катода, изображенных на рис. 1.

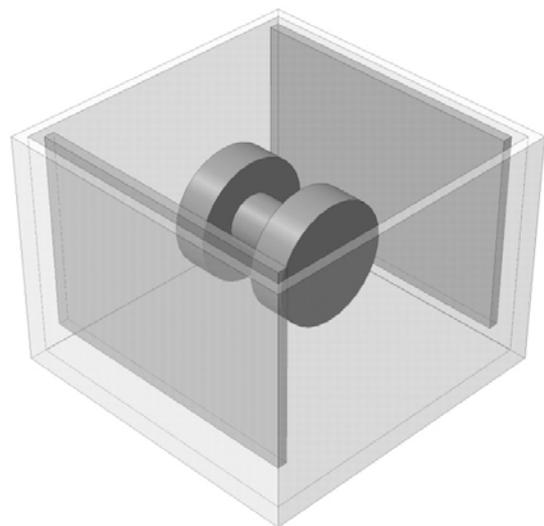


Рис. 1. Моделируемый объект

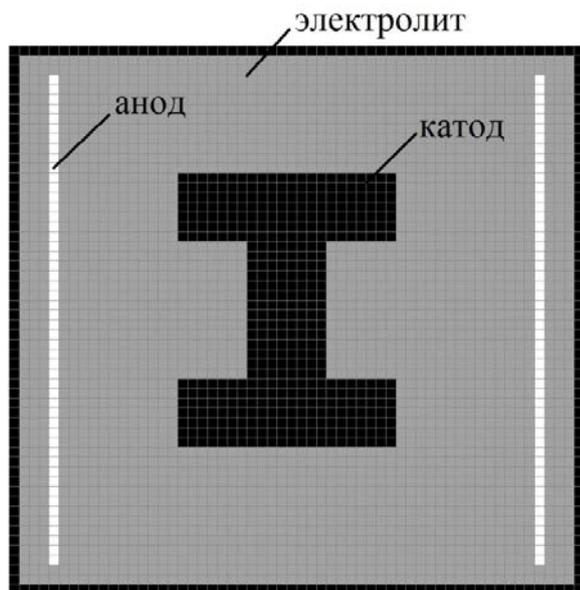


Рис. 2. Сеточная область ванны нанесения покрытий

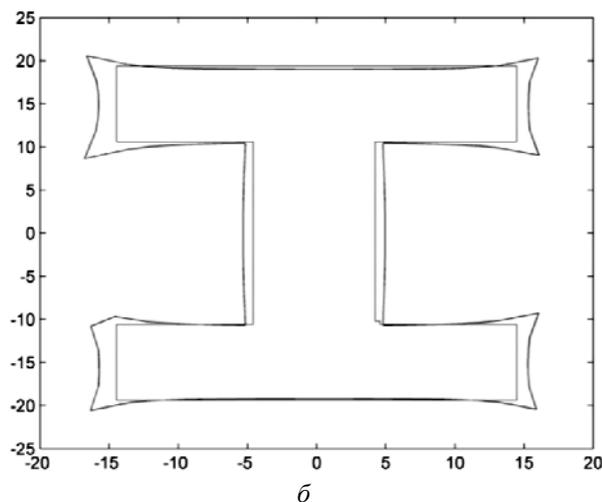
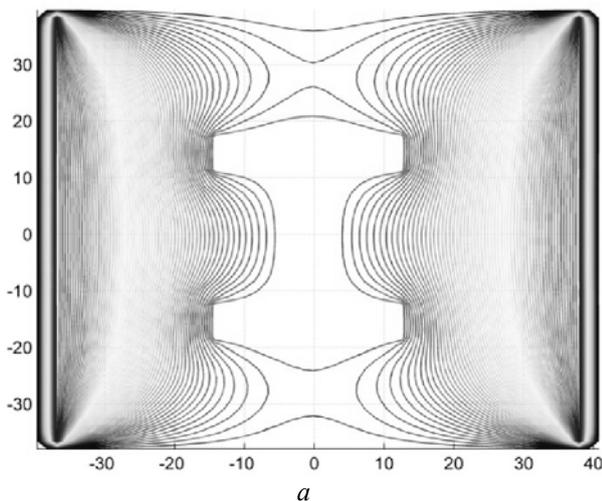


Рис. 3. Результаты расчета распределения потенциала (а) и толщины покрытия (б)

Размеры электролизера в математическую модель вводятся путем непосредственного введения длины, ширины и глубины. После чего пространство ванны нанесения гальванических покрытий разбивается на равномерную сетку с шагом h .

Размеры и расположение анодов в электролизере вводятся так же путем непосредственного введения их размеров и расположения их относительно стенок гальванической ванны. Значения в узлах сетки, соответствующих координатам расположения анодов, заменяются на значения граничных условий Φ_a .

В математической модели формы и координаты границ детали вводятся путем распознавания двумерного изображения сечения детали с помощью пакета Image Processing Toolbox [3]. Распознав изображение детали, получаем координаты границ детали в пиксельной системе координат, по этой причине размеры ванны и анодов также переводятся в пиксельные координаты с шагом h , который принимается равным размерам пикселя изображения детали. В узлы сетки, соответствующие координатам области катода, записываются значения граничных условий Φ_k . Сеточная область ванны нанесения покрытий представлена на рис. 2.

Преимущество применения пиксельной системы координат заключается в том, что при вводе координат детали в сеточную область ванны они будут совпадать с узлами сетки электролизера нанесения металлических покрытий, что исключает необходимость исправления граничных значений, в случае несовпадения сеточной области электролизера с контуром области катода.

После введения в математическую модель размеров ванны нанесения гальванических покрытий, а также форм и расположения электродов, определение распределения потенциала производится путем численного расчета уравнения Лапласа (1), при заданных граничных условиях (2) с помощью метода конечных разностей [4]. Результаты расчета распределения потенциала и толщины покрытия приведены на рис. 3.

Решение задачи о распределении потенциала дает автоматически и решение наиболее важной для электрохимии задачи о распределении плотности тока по поверхности электродов [5], так как

$$i = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n}.$$

Определив локальные значения плотности тока по поверхности детали, можно рассчитать распределение толщины металлического покрытия h по формуле:

$$h = \frac{iK\tau VT}{d}$$

где K – электрохимический эквивалент; τ – продолжительность процесса осаждения; VT – выход металла по току; d – плотность металла.

Для оценки степени неравномерности покрытия применяется критерий Каданера [6]:

$$K_{\text{кад}} = \frac{h_{\text{min}}}{h_{\text{cp}}}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена математическая модель, определяющая распределения электрического потенциала и плотности тока в ваннах нанесения гальванических покрытий. Модель учитывает электрохимические (поляризация и перенапряжение электродов, толщина диффузионного слоя) и геометрические (формы и размеры анодов и катодов, расположение их относительно друг друга и стенок электролизера) факторы, оказывающие наибольшее влияние на равномерность распределения толщины покрытия по поверхности электрода.

Отличительной особенностью разработанной математической модели является способ учета геометрической формы деталей, который позволяет, имея модель детали, ввести его геометрические конфигурации в предложенную математическую модель. Кроме того, данный способ исключает необходимость исправления граничных значений при численном расчете распределения потенциала методом конечных разностей.

Предложенная модель позволяет прогнозировать распределение толщины покрытия по поверхности катода, что может быть использовано для исследования процессов нанесения электролитических покрытий и разработки методов улучшения их равномерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прикладная электрохимия:** учебник для химико-технологических спец. вузов / Р. И. Агладзе, Т. А. Ваграмян, Н. Т. Гофман и др.; под ред. А. П. Томилова. М.: Химия, 1984. 520 с. [[R. I. Agladze, T. A. Vagramyan, N. T. Hoffman, *Applied Electrochemistry: a textbook for chemical-engineering*, (in Russian). Moscow: Chemistry, 1984.]]
2. **Антропов Л. И.** Теоретическая электрохимия. М.: Высшая школа, 1984. 509 с. [[L. I. Antropov, *Theoretical Electrochemistry*, (in Russian). Moscow: Vysshaya Shkola, 1984.]]

3. **Журавель И. М.** Краткий курс теории обработки изображений [Электронный ресурс] // Центр компетенции MathWorks. 2001–2014. URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php> (Дата обрац. 18.09.2014). [[I. M. Zhuravel. (2014, Sep. 18) *Brief course in the theory of image processing* [Online], (in Russian). Available: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>]]

4. **Панов Д. Ю.** Справочник по численному дифференциальным уравнениям в частных производных. М.-Л.: Гостехиздат, 1951. 179 с. [[D. Y. Panov, *Handbook of numerical differential equations*, (in Russian). Moscow–Leningrad: Gostekhizdat, 1951.]]

5. **Гамбург Ю. Д.** Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М.: Янус-К, 1997. 384 с. [[Y. D. Hamburg, *Electrochemical crystallization of metals and alloys*, (in Russian). Moscow: Janus-K, 1997.]]

6. **Каданер Л. И.** Справочник по гальванике. Киев: Техника, 1976. 254 с. [[L. I. Kadaner, *Reference electroplating*, (in Russian). Kiev: Appliances, 1976.]]

ОБ АВТОРАХ

ЛЮТОВ Алексей Германович, проф., зав. каф. автоматиз. технол. процессов. Дипл. инж. электронной техн. (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. упр. сложн. техн. объектами.

ИШКУЛОВА Алия Рифовна, асп. каф. автоматиз. технол. процессов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2012). Готовит дис. об автоматизации технол. процессов нанесения гальванических покрытий.

METADATA

Title: Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes.

Authors: A. G. Lutov, A. R. Ishkulova.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: Aliya.Ishkulova@yandex.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 4 (70), pp. 45-48, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article stated and solved the problem of calculating the potential distribution in the plating baths. Developed a mathematical model that takes into account the electrochemical and geometric factors affecting the uniformity of the coating thickness on the surface of the cathode. The results of the calculation of the potential distribution and thickness of the coating.

Key words: Electroplating, Laplace equation, the geometric configuration of the electrodes, the potential distribution and thickness of the coating.

About authors:

LUTOV, Alexey Germanovich, Prof., Head, Dept. of Automated Technological Processes. Dipl. engineer of electronic technics (UAI, 1985), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).

ISHKULOVA Aliya Rifovna, Postgrad. student. Dipl. engineer (USATU 2012).