

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL MODELING

Научная статья

УДК 66.011:621.357

doi: 10.17223/19988605/71/4

Моделирование процесса поляризации электродов при контроле и управлении процессом нанесения гальванического покрытия**Алия Рифовна Ишкулова¹, Алексей Германович Лютов²**¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия¹ aliya.ishkulova@yandex.ru² lutov1@mail.ru

Аннотация. Рассматривается математическая модель процесса осаждения гальванического покрытия, отличительной особенностью которой является учет концентрационной поляризации. Представлены результаты исследований зависимости между поляризацией электродов, равномерностью распределения покрытия и параметрами процесса, такими как плотность тока, расстояние между электродами, скорость потока и температура электролита. Подтверждена гипотеза взаимосвязи равномерности покрытия от катодной поляризации. Установлено, что наилучшее распределение покрытия обеспечивается при более высоких значениях электродной поляризации.

Ключевые слова: математическое моделирование; гальваническое покрытие; электродная поляризация.

Для цитирования: Ишкулова А.Р., Лютов А.Г. Моделирование процесса поляризации электродов при контроле и управлении процессом нанесения гальванического покрытия // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 71. С. 39–47. doi: 10.17223/19988605/71/4

Original article

doi: 10.17223/19988605/71/4

Modeling of the electrode polarization process in monitoring and controlling the process of applying galvanic coating**Aliya R. Ishkulova¹, Alexey G. Lyutov²**¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation¹ aliya.ishkulova@yandex.ru² lutov1@mail.ru

Abstract. The mathematical model of the process of deposition of galvanic coating is considered, the distinctive feature of which is the consideration of concentration polarization. The results of studies of the relationship between the polarization of the electrodes, the uniformity of the coating distribution and the process parameters, such as the current density, the distance between the electrodes, the flow rate and the temperature of the electrolyte are presented. The hypothesis of the relationship between the uniformity of the coating and the cathode polarization is confirmed. It is established that the best distribution of the coating is ensured at higher values of electrode polarization.

Keywords: mathematical modeling; galvanic coating; electrode polarization.

For citation: Ishkulova, A.R., Lyutov, A.G. (2025) Modeling of the electrode polarization process in monitoring and controlling the process of applying galvanic coating. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 71. pp. 39–47. doi: 10.17223/19988605/71/4

Введение

Гальванические покрытия (ГП) играют важную роль в различных сферах промышленности. Гальванический способ нанесения покрытий, основанный на осаждении чистых металлов или сплавов на поверхность изделий, открывает широкие возможности для улучшения их эксплуатационных характеристик. В частности, ГП значительно повышают твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и декоративные свойства изделий. Однако получение покрытий с требуемыми свойствами и показателями качества представляет собой сложную задачу, зависящую от большого количества факторов. Помимо этого, сложность усугубляется тем, что в процессе электроосаждения невозможно измерить и определить качество покрытия, что делает невозможным своевременную корректировку режима электролиза. Таким образом, разработка метода косвенного определения или методов прогнозирования качества ГП в процессе нанесения покрытий остается актуальной задачей.

Один из основных показателей качества ГП – толщина покрытия, которая, в свою очередь, оказывает влияние и на защитные свойства покрытия, и на такие показатели качества, как твердость, износостойкость. Расчет параметров и длительности процесса осаждения покрытия для получения заданной толщины производится путем выполнения несложных расчетов. Однако распределение толщины покрытия на различных участках деталей может значительно отличаться: так, на более близких к анодам участках толщина будет больше, а на отдаленных участках и внутри отверстий, пазов толщина будет меньше, соответственно, не будет обладать требуемыми свойствами и обеспечивать необходимую защиту от коррозии. Помимо геометрической формы изделий на равномерность распределения толщины покрытий значительное влияние оказывают режим электролиза, состав и свойства электролита, наличие или отсутствие перемешивания электролита, расположение электродов в ванне.

1. Постановка гипотезы

Решению задачи улучшения равномерности ГП посвящен ряд работ, предлагающих различные методы управления параметрами процесса [1–7], а также управления расположением электродов в гальванической ванне [8–11]. Однако ни один из предложенных методов не предлагает измерения распределения толщины покрытия в процессе осаждения или косвенного определения равномерности покрытия, что затрудняет разработку эффективного алгоритма управления параметрами для улучшения качества ГП.

Во время осаждения покрытия можно контролировать и учесть при управлении такие параметры процесса, как температура, удельная проводимость, плотность и вязкость электролита, а также концентрация компонентов. Но изменения этих параметров в ходе нанесения гальванического покрытия происходят медленно, и они не могут в полной мере описать процесс распределения электрического потенциала на поверхности катода, от которого непосредственно зависит распределение толщины покрытия. Кроме того, они не могут в реальном времени отображать процессы, происходящие в электрохимической системе. Однако в процессе нанесения ГП может быть замерен такой параметр, как электродная поляризация, характеризующий процесс электрохимической реакции, протекающий на электродах, при подаче на них электрического тока [12].

Под действием электрического тока в электрохимической системе возникают необратимые процессы, вызывающие скачок потенциала на поверхности электрода. Данное явление называется поляризацией. Скачок потенциала происходит вследствие протекания процессов, которые приводят к переходу электронов и ионов осаждаемого металла через двойной электрический слой (ДЭС) и последующему его электровосстановлению на поверхности катода.

Скачок потенциала на поверхности катода возникает вследствие затруднений, возникающих в электрохимической системе в результате переноса носителей заряда через ДЭС, действия так назы-

ваемой поляризации разряда. Помимо этого, возникают затруднения, связанные с встраиванием в кристаллическую решетку адсорбированных атомов, разорвавшихся после разряда, данное явление получило название кристаллизационной поляризации, а также затруднения, возникающие вследствие замедления подвода из общего объема электролита частиц, разряжающихся на электроде, и низкой скорости реакции, предшествующей разряду иона, которые получили название диффузионной и реакционной поляризации соответственно. Суммарно диффузионная и реакционная поляризации вызывают изменение концентрации частиц вблизи электрода, по этой причине данные виды поляризации объединяют под общим определением концентрационной поляризации [13].

Влияние поляризационных процессов на кристаллическую структуру покрытий, соответственно, и на твердость, износостойкость, антикоррозионные свойства, установлена и доказана [14], но влияние поляризации на равномерность ГП до сих пор остается недостаточно изученным.

2. Математическое моделирование

На процесс электроосаждения покрытия оказывают влияние одновременно все виды поляризации, однако учет их всех является довольно сложной задачей и ввиду влияния множества стохастических факторов вряд ли может быть выражен математически. При этом, имея представление о концентрации электролита, его свойствах, температуре и приложенном на электроды токе, можно решить задачу учета влияния концентрационной поляризации на процесс осаждения ГП.

Концентрационная поляризация $\Delta\varphi$ является сдвигом потенциала катода φ от его равновесного значения $\varphi_{\text{равн}}$ при прохождении тока, который под действием электромагнитного поля приводит к миграции ионов металла из объема электролита к поверхности катода. В результате их концентрация у поверхности катода увеличивается, что приводит к затруднениям разряда ионов, соответственно, к отклонению потенциала электрода φ от равновесного значения $\varphi_{\text{равн}}$:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{равн}} - \varphi.$$

Концентрационная поляризация $\Delta\varphi$ описывается уравнением Нернста [12]. Для расчета $\Delta\varphi$ в математической модели была применена форма уравнения Нернста, которая представляет собой соотношение между плотностью тока i и предельной диффузионной плотностью тока i_d [12]:

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_d} \right),$$

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 через границу электрод–электролит при образовании одного атома металла; F – число Фарадея, $F = 96\,485 \text{ Кл/моль}$.

Концентрация ионов металла C_0 в математической модели учитывается путем расчета предельной диффузионной плотности тока i_d . Этот параметр характеризует максимальную плотность тока, при которой скорость доставки ионов металла из объема электролита к поверхности катода соответствует скорости их разряда. Расчет i_d производится по формуле [12]

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

где D – коэффициент диффузии; δ – толщина диффузионного слоя, мкм.

Коэффициент диффузии D характеризует электрическую подвижность ионов металла и рассчитывается по уравнению Нерста–Эйнштейна [15]:

$$D = \frac{M_p RT}{nF^2},$$

здесь M_p – молярная электрическая проводимость, $\text{См} \cdot \text{м}^2 / \text{моль}$, которая вычисляется как

$$M_p = \frac{1000}{\rho(C_0/A)},$$

где A – атомная масса, осаждаемого металла, г/моль.

Толщина диффузионного слоя δ рассчитывается по формуле [16]

$$\delta(x, y, z) = 0,26 \sqrt{\frac{x_K(x, y, z)v}{U_0}} \sqrt[3]{\frac{D}{v}},$$

где $x_K(x, y, z)$ – ближайшее расстояние до края электрода; v – кинематическая вязкости электролита, Па·с; U_0 – скорость потока, см/с.

Распределение плотности тока $i(x, y, z)$ на поверхности детали за интервал времени τ рассчитывается по закону Ома:

$$i(x, y, z, \tau) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial n}, \quad (1)$$

где ρ – удельное электросопротивление электролита, Ом·м; $\varphi(x, y, z, \tau)$ – потенциал электрического поля в точке (x, y, z) поверхности катода, В; n – направление внешней нормали к поверхности катода.

Распределение электрического потенциала в объеме электролита рассчитывается путем решения уравнения Лапласа при заданных величинах потенциалов электродов:

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

где φ – электрический потенциал, В.

Граничными условиями для решения уравнения Лапласа (2) являются потенциалы электродов. В начальный момент времени они имеют следующий вид:

$$\varphi_a^1 = \varphi_a^0 - \Delta \varphi_a^0 \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_a} = U, \quad \varphi_k^1 = \varphi_k^0 + \Delta \varphi_k^0 \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_k} = 0, \quad (3)$$

где φ_a^1, φ_k^1 – анодный и катодный потенциал соответственно в начальный момент времени, В; U – напряжение в электролизере, В; $\Delta \varphi_a^0, \Delta \varphi_k^0$ – анодное и катодное перенапряжение в начальный момент времени, В; S_a, S_k – поверхности анодов и катодов соответственно, см².

Расчет напряжения U в электролизере производится по закону Ома при известных расстоянии между электродами l и удельной проводимости электролита ρ :

$$U = il\rho, \quad (4)$$

где i – рабочая плотность тока, А/дм².

Для каждого момента времени j производится перерасчет граничных условий на основании формул (3), которые принимают следующий вид:

$$\varphi_a^j = \varphi_a^{j-1} - \Delta \varphi_a^{j-1} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_a}, \quad \varphi_k^j = \varphi_k^{j-1} + \Delta \varphi_k^{j-1} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_k}. \quad (5)$$

На основании рассчитанного, с использованием уравнения Лапласа (2) распределения потенциала $\varphi(x, y, z, \tau)$ на поверхности катода при граничных условиях (3) для начального момента времени и (5) для последующих и определенной плотности тока $i(x, y, z, \tau)$ по уравнению (1), по закону Фарадея рассчитывается толщина осажденного покрытия $h_n(x, y, z, \tau)$ в некоторой точке поверхности катода (x, y, z) за интервал времени τ :

$$h(x, y, z, \tau) = \frac{i(x, y, z, \tau) \cdot \Theta \cdot \tau \cdot VT}{d}$$

где Θ – электрохимический эквивалент металла, мг/Кл, VT – выход металла по току, %, d – плотность металла, г/см³.

Оценка равномерности толщины покрытия на поверхности катода производится путем расчета коэффициента K_p , который определяется по формуле

$$K_p(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h_{\min}(t)}{h_i(x, y, z, t)},$$

где $h_{\min}$ – минимальная толщина покрытия; h_i – толщина покрытия в точке (x, y, z) поверхности катода, n – количество точек определения толщины покрытия на поверхности катода.

Проверка адекватности расчета поляризации предложенной в данной работе математической моделью производилась путем сравнения поляризационных кривых, представленных в справочниках [18, 19], с результатами расчета математической модели. Сравнение справочных и расчетных данных производилось для процесса электролиза хромового покрытия в электролите, содержащем 250 г/л CrO_3 и 2,5 г/л H_2SO_4 , при температурах электролита 18 и 60°C. Сравнительные справочные и расчетные поляризационные кривые представлены на рис. 1.

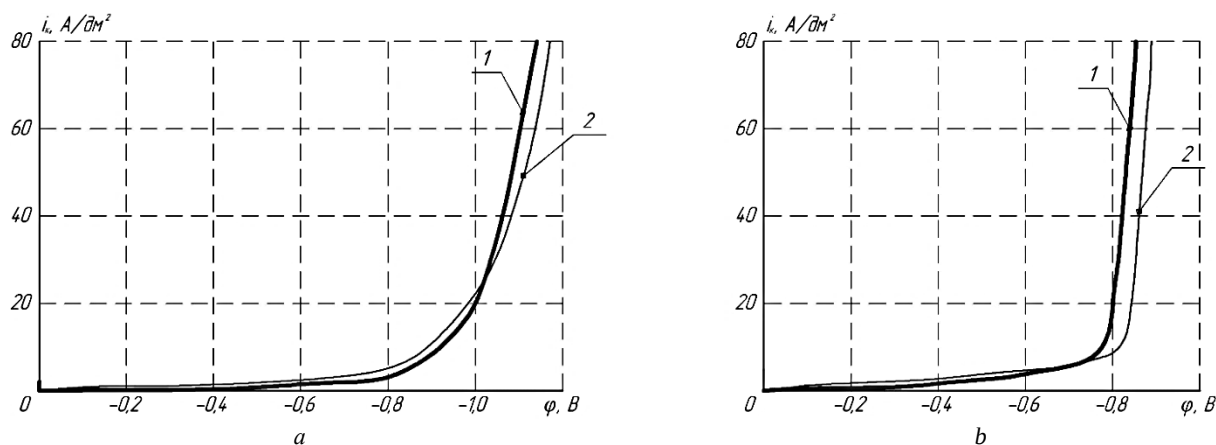


Рис. 1. Сравнительные справочные (1) и расчетные (2) поляризационные кривые электролиза хромового покрытия в электролите, содержащем 250 г/л CrO_3 и 2,5 г/л H_2SO_4 , при температурах электролита 18°C (а) и 60°C (б)
Fig. 1. Comparative reference (1) and calculated (2) polarization curves of electrolysis of a chromium coating in an electrolyte containing 250 g/l CrO_3 and 2.5 g/l H_2SO_4 at electrolyte temperatures of 18°C (a) and 60°C (b)

Адекватность математической модели была оценена путем вычисления при сопоставлении справочных и расчетных данных. Для эксперимента (а) этот показатель составил 10,2%, а для эксперимента (б) – 12,9%. Средняя квадратичная относительная погрешность для обоих экспериментов не превысила 15%. На основании этого можно сделать вывод, что результаты расчета математической модели соответствуют справочным данным.

Таким образом, предложенная в данной работе математическая модель может быть использована для проведения исследований и установления зависимостей равномерности покрытий от поляризации при различных режимах осаждения покрытий.

3. Экспериментальная часть

В данной работе проведено исследование зависимости равномерности ГП от величины катодной поляризации с использованием предложенной математической модели. В ходе исследования были проведены вычислительные эксперименты при различных значениях плотности тока, расстояния между электродами, скорости потока и температуры электролита.

Исследования производились на примере осаждения хромового покрытия в сульфатном электролите CrO_3 (250 г/л), H_2SO_4 (25 г/л) с удельной электропроводностью $0,0166 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и выходом металла по току 35% при следующих диапазонах изменения параметров электролиза:

- плотность тока – 45–55 А/дм^2 ;
- расстояние между электродами – 5–20 см;
- интенсивность перемешивания электролита – 5–50 см/с;
- температура электролита – 20–60°C.

Равномерность ГП определяется путем расчета коэффициента равномерности (13). Катодная поляризация рассчитывается по формуле (2). Оба параметра определялись на основе рассчитанного распределения плотности тока на поверхности катода, которое было получено путем решения уравнения Лапласа (8).

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2–5.

Графики, представленные на рис. 2–5, демонстрируют зависимости равномерности ГП и катодной поляризации от плотности тока, расстояния между электродами, скорости потока и температуры электролита. Кроме того, сопоставление графиков подтверждает взаимосвязь между равномерностью покрытия и катодной поляризацией.

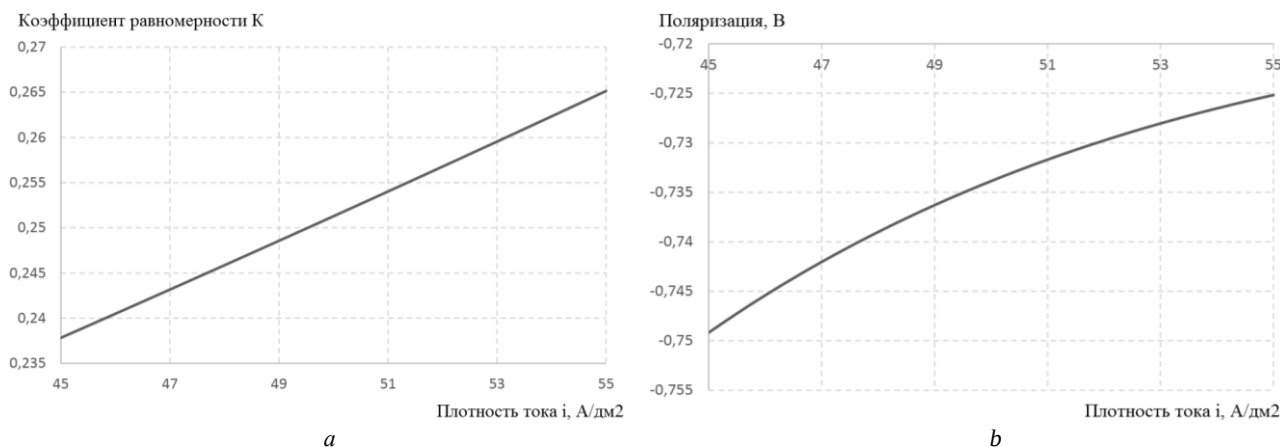


Рис. 2. Зависимости равномерности покрытия (a) и катодной поляризации (b) от плотности тока
Fig. 2. Dependences of coating uniformity (a) and cathode polarization (b) on current density



Рис. 3. Зависимости равномерности покрытия (a) и катодной поляризации (b) от межэлектродного расстояния
Fig. 3. Dependences of coating uniformity (a) and cathodic polarization (b) on the interelectrode distance

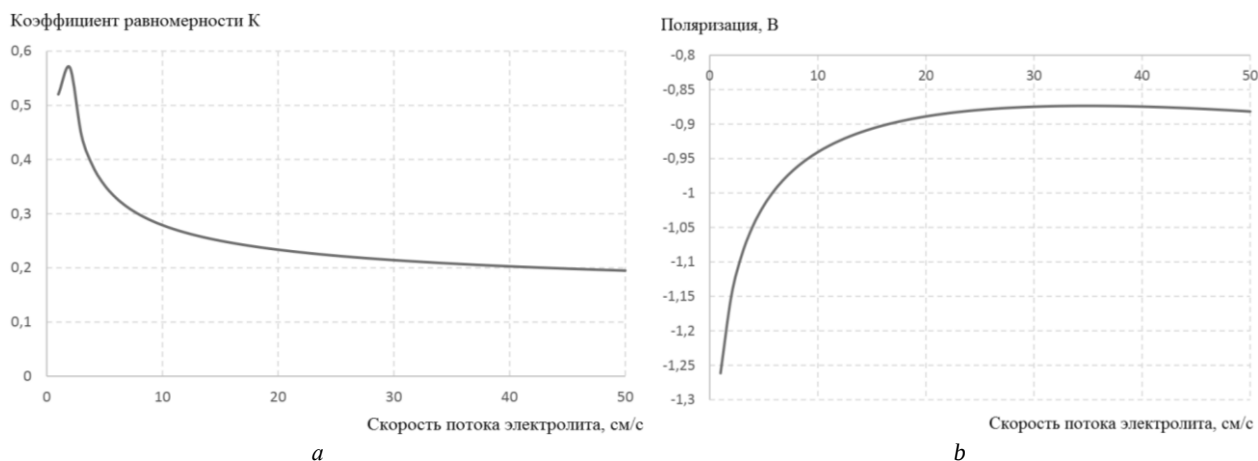


Рис. 4. Зависимости равномерности покрытия (a) и катодной поляризации (b) от скорости потока электролита
Fig. 4. Dependences of coating uniformity (a) and cathodic polarization (b) on the electrolyte flow rate

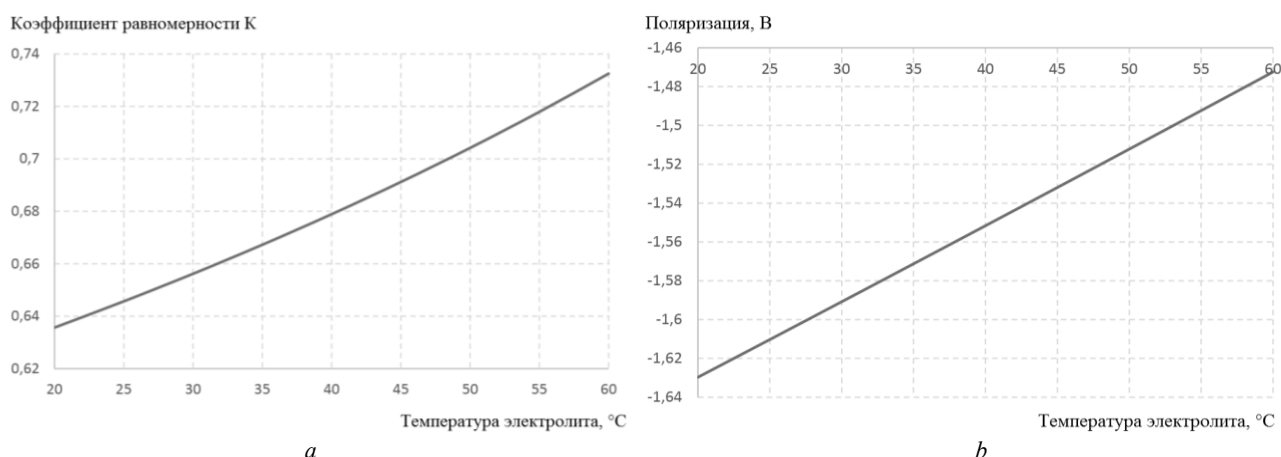


Рис. 5. Зависимости равномерности покрытия (a) и катодной поляризации (b) от температуры электролита
Fig. 5. Dependences of coating uniformity (a) and cathodic polarization (b) on the electrolyte temperature

Из графиков видно, что при более высоких значениях катодной поляризации обеспечивается более равномерное распределение толщины покрытия. Это позволяет предположить, что поддержание более высоких значений катодной поляризации может привести к получению более равномерных покрытий. Однако эти результаты были получены при постоянных значениях скорости потока электролита. При этом зависимости от скорости потока электролита имеют обратную тенденцию по сравнению с зависимостями от других параметров. Это можно объяснить тем, что при низкой интенсивности перемешивания электролита толщина диффузионного слоя больше, особенно на активных участках поверхности катода, где плотность тока выше. В результате межфазовый переход разряжающегося металла затруднен, что приводит к более низким значениям катодной поляризации.

Заключение

В данной работе была выдвинута гипотеза о зависимости равномерности распределения толщины гальванических покрытий на поверхности катода от его поляризации. Для подтверждения данной гипотезы предложена математическая модель, уникальность которой состоит в учете электродной поляризации.

Проведенные исследования с использованием математической модели подтвердили зависимость равномерности покрытия от катодной поляризации.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что контроль и регулирование данного параметра в процессе осаждения гальванических покрытий позволит получить покрытия с более высокими показателями качества.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований процессов осаждения гальванических покрытий и разработки алгоритмов оптимального управления процессом.

Список источников

1. Соловьев Д.С., Потлов А.Ю., Литовка Ю.В. Снижение неравномерности толщины гальванического покрытия, наносимого с циклическим включением анодных секций // Вестник машиностроения. 2016. № 8. С. 78–84.
2. Конкина В.В., Соловьев Д.С., Литовка Ю.В., Мукина И.А. Автоматизированная система управления гальваническими процессами при реверсировании тока с отключаемыми анодными секциями // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 2. С. 67–77.
3. Соловьев Д.С., Мукина И.А., Литовка Ю.В. Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 9. С. 631–636.
4. Литовка Ю.В., Кондрашин Р.С. Моделирование и оптимизация импульсных токовых режимов нанесения гальванических покрытий // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 1999. Т. 5, № 1. С. 26–33.
5. Литовка Ю.В., Романенко А.В., Афанасьев А.В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т. 32, № 3. С. 301–304.

6. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Многопараметрическое оптимальное управление процессом нанесения гальванического покрытия с учетом изменения условий электролиза // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23, № 2 (84). С. 138–144.
7. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами // Мехатроника, автоматизация и управление. 2017. Т. 19, № 3. С. 185–191. doi: 10.17587/mau.18.185-191
8. Pat. 6027631 США. Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer / E.K. Broadbent. Оpubл. 22.02.2000.
9. Пуха А.П., Литовка Ю.В., Конкина В.В. Алгоритм управления процессом нанесения гальванического покрытия с подвижными секциями анода // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 3. С. 18–21.
10. Пчелинцева И.Ю., Литовка Ю.В. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токопроводящим экраном // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 4. С. 188–196. doi: 10.17587/mau.23.188-196
11. Банников А.А., Литовка Ю.В. Оптимальное размещение катодов в автоматизированной системе управления гальванической ванной // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 3 (65). С. 3–9. doi: 10.53015/18159958_2021_3_3
12. Вайнер Я.В., Дасоян М.А. Технология электрохимических покрытий. Л. : Mashgiz, 1962. 468 с.
13. Нечаев А.В. Химия : учеб. пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2016. Ч. II. 112 с.
14. Каданер Л.И. Справочник по гальваностегии. Киев : Техника, 1976. 254 с.
15. Лукомский Ю.Я., Гамбург Ю.Д. Физико-химические основы электрохимии : учебник. Долгопрудный : Изд. Дом «Интеллект», 2008. 424 с.
16. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М. : Физматгиз, 1959. 700 с.
17. Бахчисарайцян Н.Г., Борисоглебский Ю.В., Буркат Г.К. и др. Практикум по прикладной электрохимии : учеб. пособие для вузов / под ред. В.Н. Варыпаева, В.Н. Кудрявцева. 3-е изд. перераб. Л. : Химия, 1990. 304 с.
18. Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1991. 384 с.
19. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. М. : Химия, 1979. 352 с.

References

1. Soloviev, D.S., Potlov, A.Yu. & Litovka, Yu.V. (2016) Snizhenie neravnomernosti tolshchiny gal'vanicheskogo pokrytiya, nanosimogo s tsiklicheskim vklyucheniem anodnykh sektsiy [Reducing the unevenness of the thickness of the galvanic coating applied with cyclic inclusion of anode sections]. *Vestnik mashinostroeniya*. 8. pp. 78–84.
2. Konkina, V.V., Soloviev, D.S., Litovka, Yu.V. & Mukina, I.A. (2016) Avtomatizirovannaya sistema upravleniya gal'vanicheskimi protsessami pri reversirovanii toka s otklyuchaemyimi anodnymi sektsiyami [Automated control system for galvanic processes with current reversal with disconnectable anode sections]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2. pp. 67–77.
3. Soloviev, D.S., Mukina, I.A. & Litovka, Yu.V. (2017) Osobennosti optimal'nogo upravleniya gal'vanicheskimi protsessami v mnogoanodnoy vanne s razlichnymi znacheniyami sily toka [Optimal control of galvanic processes in a multi-anode bath with different current values]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 18(9). pp. 631–636.
4. Litovka, Yu.V. & Kondrashin, R.S. (1999) Modelirovanie i optimizatsiya impul'snykh tokovykh rezhimov naneseniya gal'vanicheskikh pokrytiy [Modeling and optimization of pulsed current modes of applying galvanic coatings]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 5(1). pp. 26–33.
5. Litovka, Yu.V., Romanenko, A.V. & Afanasyev, A.V. (1998) Modelirovanie i optimizatsiya protsessa naneseniya gal'vanicheskikh pokrytiy v usloviyakh reversirovaniya toka [Modeling and optimization of the process of applying galvanic coatings under current reversal conditions]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 32(3). pp. 301–304.
6. Lyutov, A.G. & Ishkulova, A.R. (2019) Mnogoparametricheskoe optimal'noe upravlenie protsessom naneseniya gal'vanicheskogo pokrytiya s uchetoм izmeneniya usloviy elektroliza [Multiparameter optimal control of the process of applying galvanic coating taking into account changing electrolysis conditions]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 23(2(84)). pp. 138–144.
7. Lyutov, A.G. & Ishkulova, A.R. (2017) Avtomatizirovannaya sistema ekstremal'nogo upravleniya protsessom naneseniya gal'vanicheskogo pokrytiya v vanne s mnogosektsionnymi anodami [Automated system for extreme control of the process of applying galvanic coating in a bath with multisection anodes]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie*. 19(3). pp. 185–191. DOI: 10.17587/mau.18.185-191
8. Patent. 6027631 USA. *Electroplating system with shields for varying thickness profile of deposited layer*. E. K. Broadbent Publ. 22.02.2000.
9. Pukha, A.P., Litovka, Yu.V. & Konkina, V.V. (2024) Algoritм upravleniya protsessom naneseniya gal'vanicheskogo pokrytiya s podvizhnymi sektsiyami anoda [Algorithm for controlling the process of applying a galvanic coating with movable anode sections]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*. 3. pp. 18–21.
10. Pchelintseva, I.Yu. & Litovka, Yu.V. (2022). Sistema avtomatizirovannogo upravleniya protsessom naneseniya gal'vanicheskogo pokrytiya v vanne s tokoneprovodyashchim ekranom [Automated control system for the process of applying a galvanic coating in a bath with a non-conductive screen]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 23(4). pp. 188–196. DOI: 10.17587/mau.23.188-196

11. Bannikov, A.A. & Litovka, Yu.V. (2021) Optimal'noe razmeshchenie katodov v avtomatizirovannoy sisteme upravleniya gal'vanicheskoy vannoy [Optimal placement of cathodes in an automated control system for a galvanic bath]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya*. 3(65). pp. 3–9. DOI: 10.53015/18159958_2021_3_3
12. Vayner, Ya.V. & Dasoyan, M.A. (1962) *Tekhnologiya elektrokhimicheskikh pokrytiy* [Technology of Electrochemical Coatings]. Leningrad: Mashgiz.
13. Nechaev, A.V. (2016) *Khimiya* [Chemistry]. Yekaterinburg: UrFU.
14. Kadaner, L.I. (1976) *Spravochnik po gal'vanostegii* [Handbook of Electroplating]. Kyiv: Tekhnika.
15. Lukomsky, Yu.Ya. & Gambur, Yu.D. (2008) *Fiziko-khimicheskie osnovy elektrokhimii* [[Physicochemical Foundations of Electrochemistry]. Dolgoprudnyy: Intellect.
16. Levich, V.G. (1959) *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physicochemical Hydrodynamics]. Moscow: Fizmatgiz.
17. Bakhchisaraytsyan, N.G., Borisoglebskiy, Yu.V. & Burkat, G.K. (1990) *Praktikum po prikladnoy elektrokhimii* [Practical Training in Applied Electrochemistry]. Leningrad: Khimiya.
18. Melnikov, P.S. (1991) *Spravochnik po gal'vanopokrytiyam v mashinostroenii* [Handbook of Electroplating in Mechanical Engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye.
19. Kudryavtsev, N.T. (1979) *Elektroliticheskie pokrytiya metallami* [Electrolytic Coatings of Metals]. Moscow: Khimiya.

Информация об авторах:

Ишкурова Алия Рифовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов филиала Уфимского университета науки и технологий в г. Кумертау (Уфа, Россия). E-mail: aliya.ishkulova@yandex.ru

Лютов Алексей Германович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматических систем Института искусственного интеллекта МИРЭА – Российского технологического университета (Москва, Россия). E-mail: lutov1@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ishkulova Aliya R. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft Production Technology of the Branch of the Ufa University of Science and Technology in Kumertau, Ufa, Russian Federation). E-mail: aliya.ishkulova@yandex.ru

Lyutov Aleksey G. (Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automatic Systems of the Institute of Artificial Intelligence MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation). E-mail: lutov1@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 25.02.2025; принята к публикации 02.06.2025

Received 25.02.2025; accepted for publication 02.06.2025