



УДК 621.35

Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка
Тамбов, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ПОВЫШЕННОЙ РАВНОМЕРНОСТЬЮ

D.S. Solovjev, Yu.V. Litovka
Tambov, Russia

GENERATING GALVANIC COVERING THICKNESS DISTRIBUTION WITH BETTER UNIFORMITY

Рассмотрено получение более равномерного распределения толщины гальванического покрытия на детали с использованием многоанодной электрохимической ванны. Приведена математическая постановка задачи оптимального управления гальваническим процессом в многоанодной электрохимической ванне. Представлен ряд экспериментов, показывающий возможность использования предложенного способа с целью повышения равномерности распределения толщины гальванического покрытия.

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. МНОГОАНОДНАЯ ВАННА. РАВНОМЕРНОСТЬ ПОКРЫТИЯ. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

The paper deals with obtaining a more uniform distribution of galvanic covering thickness on the detail with use of the multianode electrochemical bath. Mathematical formulation of the optimal control problem in the galvanic process of the multianode electrochemical bath is given in the article. Presented a series of experiments, which shows the possibility of using a new method proposed by the authors to improve the uniformity of the thickness distribution galvanic covering.

GALVANIC PROCESSES. MULTIANODE BATH. UNIFORM OF COVERING. OPTIMAL CONTROL. MATHEMATICAL MODEL.

Гальванические покрытия – один из эффективных методов защиты от коррозии. Они также широко применяются для придания поверхности деталей повышенной твердости и износостойкости, улучшенных антифрикционных свойств, поверхностной электропроводности и для улучшения внешнего вида изделий. На сегодняшний день разработаны и продолжают совершенствоваться различные методы повышения качества наносимого покрытия в соответствии с таким критерием, как равномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали-катада, что наиболее актуально для дорогостоящих электролитов [1]. Дальнейший прогресс в этой области связан с оптимизацией и автоматизацией существующих процессов, модернизацией, совершенствованием технологии, использованием перспективного оборудования, одним из которых являются гальванические ванны со многи-

ми анодами [2]. В работе [3] предлагается новый технический подход к использованию ванн со многими анодами, заключающийся в перенесении принципа растровой развертки цифрового изображения из области телевизионного вещания в технологию электрохимической обработки изделий, сущность которого состоит в том, что для управления электрохимическим осаждением металла используется развертка, а градация напряжения на анодных секциях в гальванической ванне осуществляется при движении по строкам в соответствующие промежутки времени.

Цель данной работы – экспериментальное подтверждение возможности получения более равномерного распределения толщины покрытия на поверхности изделия с применением системы независимых анодных секций, функционирующей по принципу растровой развертки, по сравнению с использованием монолитного анода.

Теоретический анализ

Математическая постановка задачи оптимального управления звучит следующим образом: найти напряжения $U_{m,n}$ на каждой секции анода $S_{m,n}$ для заданной формы детали-катода S_K из поступающей на обработку партии, доставляющие минимум целевого критерия:

$$J = \alpha \cdot R + \beta \cdot T \rightarrow \min, \quad (1)$$

где J – целевой критерий; α, β – весовые коэффициенты; R – критерий неравномерности распределения толщины покрытия по поверхности детали-катода; T – критерий продолжительности гальванического процесса, ч; \min – минимальное значение.

Критерий неравномерности распределения толщины покрытия рассчитывается исходя из формулы:

$$R = \frac{1}{\|S_K\|} \int_{S_K} \frac{\delta(x, y, z) - \delta^{\min}}{\delta^{\min}} dS_K + \frac{\delta^{\max} - \delta^{\min}}{\delta^{\min}}, \quad (2)$$

где x, y, z – пространственные координаты точки, принадлежащей поверхности детали-катода; δ – толщина покрытия в точке (x, y, z) , мкм; $S_{m,n}, S_K$ – поверхность m, n -й секции анода и детали-катода; $\| \|$ – площадь поверхности, см².

При этом должно выполняться условие:

$$\delta^{\min} \geq \delta^{\text{zad}}, \quad (3)$$

где zad – заданное значение.

Критерий продолжительности процесса нанесения покрытия:

$$T = v \cdot M \cdot N \cdot \Delta t / 3600, \quad (4)$$

где v – число циклов включения анодов, раз; M, N – число горизонтальных рядов и количество анодных секций в каждом ряду, шт; Δt – погрешность прибора, мкм; Δt – время включения анода, с.

Мощность, потребляемая источником пита-

ния, рассчитывается как

$$P = \max_{m,n} (U_{m,n} \cdot I_{m,n}), \quad (5)$$

где P – мощность, потребляемая источником питания, Вт; $U_{m,n}, I_{m,n}$ – напряжение и сила тока между m, n -й секцией анода и катодом, В и А соответственно; m – строка, в которой находится анод ($1 \leq m \leq M$); n – столбец в строке, в котором находится анод ($1 \leq n \leq N$).

Электроэнергия, затрачиваемая источником питания на гальванический процесс, определяется следующим образом:

$$Q = P \cdot T, \quad (6)$$

где Q – электроэнергия, затрачиваемая источником питания, Вт·ч.

В систему уравнений математической модели многоанодной ванны, детально описанной в [4] и связывающей варьируемые переменные с целевым критерием, входят закон Фарадея, Ома в дифференциальной форме, уравнение Лапласа с нелинейными граничными условиями третьего рода, которое описывает распределение потенциала в объеме ванны. Проверка адекватности математической модели приводится в работе [5].

Относительные погрешности σ эксперимента и численного расчета для монолитного анода и системы независимых анодных секций рассчитываются из следующей формулы:

$$\sigma = \frac{1}{D} \sum_{(x,y,z) \in S_K} \frac{|\delta^{\text{calc}}(x, y, z) - \delta^{\text{exp}}(x, y, z)|}{\delta^{\text{exp}}(x, y, z)}, \quad (7)$$

где D – количество точек на поверхности детали-катода, шт; exp – экспериментальное значение; calc – расчетное значение; σ – относительная погрешность между расчетом и экспериментом, %.

Поиск решения задачи оптимального управления осуществляется методом «оврагов» с помощью разработанного нами программного средства [6].

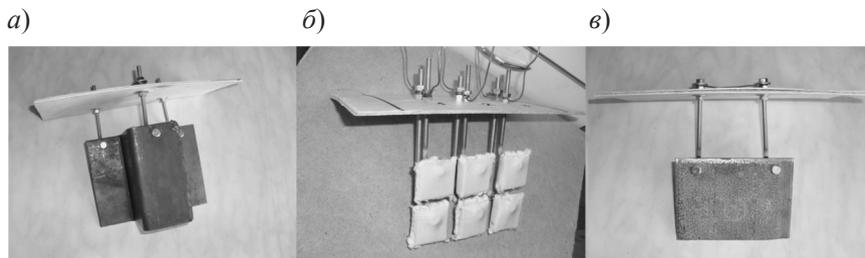


Рис. 1. Конфигурация электродов:
а – деталь-катод; б – система анодных секций; в – монолитный анод

Экспериментальная часть

С целью получения более равномерного распределения толщины гальванопокрытия на детали, нанесенного с использованием системы из независимых анодных секций, по сравнению гальванопокрытием, полученным стандартным в промышленности способом – с использованием монолитного анода, проведен ряд экспериментов.

Конфигурация детали-катода представлена на рис. 1 а, система из 2×3 независимых никелевых анодных секций – на рис. 1 б, монолитный никелевый анод – на рис. 1 в. Площадь монолитного анода совпадает с суммой площадей системы анодных секций.

Состав электролита Уоттса, г/л: NiSO₄ · 7H₂O – 260, NiCl₂ · 6H₂O – 60, H₃BO₃ – 45. Локальным контуром стабилизации температуру поддерживали постоянной и равной 55°С.

В работе [7] описан состав и продемонстрирован внешний вид лабораторной установки, реализующий предлагаемый способ нанесения гальванического покрытия в многоанодной электрохимической ванне.

Поскольку из-за влияния случайных факторов толщина покрытия в одной и той же точке катода в разных опытах будет отличаться, каждый эксперимент повторялся не менее трех раз, с последующим усреднением толщины покрытия в геометрически эквивалентных точках. Для измерения толщины покрытия на поверхности катода строилась сетка с шагом 0,5 см по всем координатам. Измерение толщины покрытия осуществляли магнитоиндукционным прибором неразрушающего контроля МИП-10, погрешность которого на диапазоне 1–100 мкм составляет $\Delta = \pm(10 \%) \delta^{\text{exp}} \pm 1$ мкм. Полученные экспериментальные данные сглаживались методом скользящего среднего по пяти точкам.

Результаты и их обсуждение

В результате решения задачи оптимального управления при значениях $\alpha = 1$, $\beta = 5,5$ и $\delta^{\text{rad}} = 10$ мкм получены следующие значения для системы независимых анодных секций: $U_{1,1} = 9,04$ В; $U_{1,2} = 5,01$ В; $U_{1,3} = 9,11$ В; $U_{2,1} = 8,95$ В; $U_{2,2} = 4,87$ В; $U_{2,3} = 9,07$ В; $I_{1,1} = 6,01$ А; $I_{1,2} = 3,56$ А; $I_{1,3} = 6,55$ А;

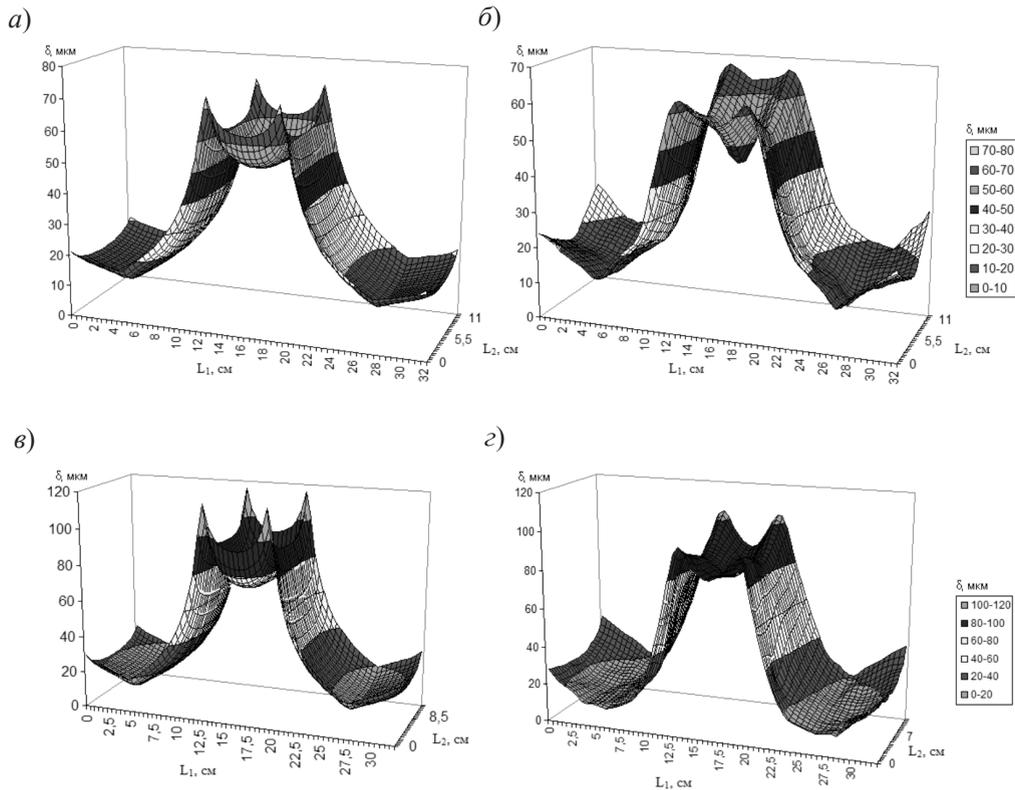


Рис. 2. Распределение толщины покрытия по поверхности детали-катода:
 а, б – численный расчет и экспериментальное измерение с использованием системы анодов;
 в, г – численный расчет и экспериментальное измерение с использованием монолитного анода

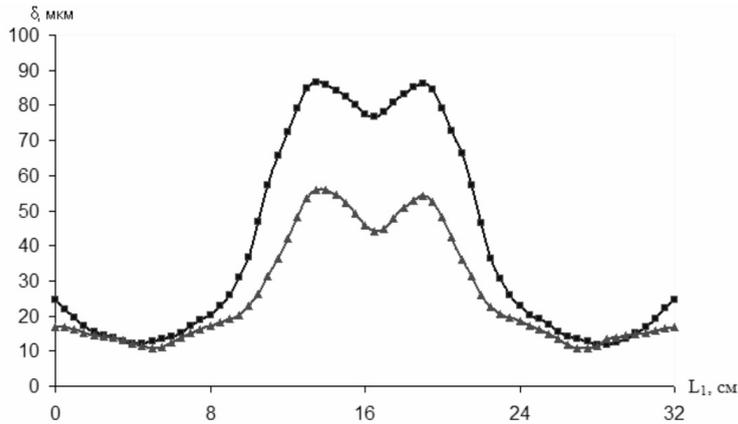


Рис. 3. Экспериментальное распределение толщины покрытия по поверхности детали-катода для одного из сечений плоскостью, параллельной оси L_1
(▲) – использовалась система анодных секций; (■) – использовался монолитный анод

$I_{2,1} = 5,93$ А; $I_{2,2} = 3,39$ А; $I_{2,3} = 6,42$ А. При тех же значениях экспертных коэффициентов и заданной толщины покрытия при использовании монолитного анода получены значения $U = 9,9$ В и $I = 17$ А.

На рис. 2 показано распределение толщины покрытия по поверхности детали-катода, рассчитанное по математической модели и экспериментально полученное с использованием системы независимых анодных секций и монолитного анода.

На рис. 3 представлены срезы экспериментального распределения толщины покрытия по поверхности катода для одного из сечений плоскостью, параллельной L_1 , полученные с использованием системы независимых анодных секций и монолитного анода. L_1 – длина детали-катода, см; L_2 – ширина, см.

В таблице представлены результирующие показатели использования монолитного анода и системы анодных секций.

Проанализировав данные таблицы, можно сделать следующие выводы:

отличие расчетных значений толщины по-

крытия от экспериментальных соизмеримо с погрешностью измерительного прибора, что позволяет говорить об адекватности математической модели;

неравномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали-катода снизилась на 33,63 %;

потребляемая мощность снизилась в 2,81 раза;

затрачиваемая электроэнергия снизилась в 1,22 раза.

Полученные экспериментальные данные показывают принципиальную возможность использования предложенного способа нанесения гальванического покрытия в многоанодной ванне, функционирующей в режиме циклического переключения независимых анодных секций.

Наибольший экономический эффект достигается в случае использования рассмотренного способа при покрытиях драгоценными металлами, т. к. улучшение равномерности распределения толщины покрытия приводит к уменьшению максимальной локальной толщины и, в конечном сче-

Сводная таблица результатов

Характеристика	Монолитный анод	Система анодных секций
J	11,25465	19,39721
R	3,93965	2,73221
T , ч	1,33	3,03
σ , %	16,84	17,51
P , Вт	168,3	59,7
Q , Вт·ч	223,84	182,59



те, к экономии драгметаллов. Применение такой технологии в промышленном масштабе позволит использовать менее мощные источники питания,

что существенно снизит стоимость их приобретения, а также уменьшить электроэнергию, затрачиваемую на гальванический процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Литовка, Ю.В.** Моделирование и оптимальное управление технологическими процессами гальванотехники: Дисс. ... д-ра техн. наук [Текст] / Ю.В. Литовка. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1999. – 305 с.

2. **Дьяков, И.А.** Автоматизация управления технологическими параметрам электрохимических процессов: Дисс. ... канд. техн. наук [Текст] / И.А. Дьяков. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1995. – 150 с.

3. **Соловьев, Д.С.** Автоматизированная система управления гальваническими процессами в многоанодной электрохимической ванне [Текст] / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 7. – С. 15–22.

4. **Соловьев, Д.С.** Математическое моделирование гальванической ванны с циклическим включением анодных секций [Текст] / Д.С. Соловьев // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств: сб. трудов Всерос. науч.-технич.

конф. – Уфа: Изд-во Уфимского гос. нефт. техн. ун-та, 2010. – С. 142–143.

5. **Соловьев, Д.С.** Проверка адекватности математической модели распределения гальванического покрытия на детали в многоанодной ванне [Текст] / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 128–135.

6. **Соловьев, Д.С.** Программа оптимизации токовых режимов гальванической ванны с циклическим включением анодных секций [Текст] / Д.С. Соловьев // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ в ФИПС № 2011617253. Зарег. в реестре программ для ЭВМ 19.09.2011.

7. **Соловьев, Д.С.** Математическое, программное и аппаратное обеспечение системы управления гальваническими процессами в ванне со многими анодами [Текст] / Д.С. Соловьев // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr12/2/text.pdf> (Дата обращения 25.05.2012)