

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 66.021.2.065.5:681.516.42

DOI: 10.14529/ctcr170111

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ В ВАННАХ С МНОГОСЕКЦИОННЫМИ АНОДАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

А.Г. Лютов, А.Р. Ишкулова

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Рассмотрен вопрос оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами. Произведен анализ современных способов управления гальваническими процессами в ваннах с многосекционными анодами. Исследовано влияние плотности тока, межэлектродного расстояния, интенсивности перемешивания электролита, а так же форм и размеров обрабатываемых деталей на равномерность распределения толщины покрытия. В результате проведенных исследований установлен экстремальный характер зависимости равномерности покрытия от плотности тока и межэлектродного расстояния. Произведен анализ методов поиска экстремума. Разработан алгоритм решения задачи оптимального управления процессом нанесения гальванопокрытия в ванне с многосекционными анодами с использованием генетических алгоритмов.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, многосекционный анод, оптимальное управление, поиск экстремума, генетический алгоритм.

Введение

Одной из основных задач управления процессом нанесения гальванического покрытия (ГП) является достижение равномерности распределения толщины осаждаемого покрытия по всей поверхности обрабатываемой детали. Равномерность ГП зависит от множества одновременно действующих факторов, наиболее значимыми из которых являются геометрические формы анодов, деталей и их взаимное расположение в гальванической ванне, состав, свойства и температура электролита, плотность тока и перемешивание электролита.

Современным направлением в управлении процессом нанесения ГП, с целью улучшения равномерности распределения толщины покрытия, является применение многосекционных анодов, представляющих собой систему анодных секций, состоящих из отдельных металлических пластин одинаковых размеров квадратной формы. Для такого рода устройств предложено несколько способов управления заключающиеся:

- в управлении расположением рядов анодных секций с целью примерного повторений конфигурации катода [1];
- в управлении током на каждой отдельной секции в зависимости от удаленности поверхности катода [2];
- в управлении длительностью подачи тока на каждую отдельную секцию [3];
- в циклическом включении анодных секций по заранее определенной программе [4];
- в управлении режимом реверсирования тока [5].

Основная часть предложенных способов управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами направлены на управление режимом подачи тока на каждую отдельную анодную секцию с учетом состава электролита, его свойств, форм и размеров электродов. Немаловажное влияние на распределение напряжения в ванне, соответственно и на равномерность распределения толщины покрытия, оказывают межэлектродное расстояние и интенсивность пе-

ремешивания электролита, которые необходимо учитывать при выборе значения плотности тока, для получения качественного покрытия.

Таки образом, целью данной работы является исследование влияния плотности тока, межэлектродного расстояния (МЭР), интенсивности перемешивания электролита, форм и размеров обрабатываемых деталей на равномерность ГП, анализ методов и разработка алгоритма решения задачи оптимального управления.

1. Особенности зависимости равномерности ГП от параметров процесса

Исследования зависимости равномерности распределения толщины ГП от интенсивности перемешивания электролита, концентрации ионов осаждаемого металла и форм и размеров обрабатываемых деталей, производились при помощи математической модели [6], рассчитывающей распределение толщины покрытия путем решения системы уравнений (1)–(8):

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

$$\varphi_a = \varphi - \eta_a \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_a} = U; \quad (2)$$

$$\varphi_k = \varphi + \eta_k \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_k} = 0,$$

где: Δ – оператор Лапласа; φ – электрический потенциал; ρ – удельное электросопротивление электролита; n – направление внешней нормали к поверхности катода; U – напряжение в электролизере, которое рассчитывается по формуле (3); η_a , η_k – анодное и катодное перенапряжение, рассчитываемое по формуле (4); S_a , S_k – поверхности анодов и катодов соответственно.

$$U = i\rho; \quad (3)$$

$$\eta(x, y, z) = \beta i(x, y, z), \quad (4)$$

где β – электродная поляризация, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta = \frac{RT}{nFi_d}, \quad (5)$$

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, $F = 96485 \text{ Кл/моль}$; i_d – предельная диффузионная плотность тока, которая рассчитывается по формуле:

$$i_d = \frac{nFDC_0}{\delta}, \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии, который рассчитывается по формуле (7); C_0 – концентрация, разряжающихся частиц; δ – толщина диффузионного слоя, рассчитываемая по формуле (8).

$$D = \frac{M_p RT}{nF^2}; \quad (7)$$

$$\delta = 0,26 \sqrt{\frac{xv}{U_0}} \sqrt{\frac{D}{v}}, \quad (8)$$

где M_p – молярная электрическая проводимость; x – расстояние от края электрода; v – кинематическая вязкости электролита; U_0 – скорость потока.

Для оценки равномерности распределения покрытия используется коэффициент равномерности, который определяется по следующей формуле:

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

где h_{\min} – минимальная толщина покрытия; h_i – толщина покрытия в точке (x, y, z) поверхности катода, которая вычисляется по следующей формуле:

$$h(x, y, z) = \frac{i(x, y, z) \cdot \mathcal{E} \cdot \tau \cdot \text{ВТ}}{d},$$

где $i(x, y, z)$ – плотность тока в точке (x, y, z) на поверхности детали; \mathcal{E} – электрохимический эквивалент; τ – продолжительность процесса осаждения; ВТ – выход металла по току; d – плотность металла.

Плотности тока в некоторой точке (x, y, z) поверхности детали рассчитывается по следующей формуле:

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

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

Исследования производились на примере процесса нанесения хромового покрытия на катоды, изображенные на рис. 2 и 3, в гальванической ванне (рис. 1), размерами $20 \times 20 \times 30$ см, с многосекционными анодами, которые представляет собой систему из 25 анодных секций размерностью 5×5 , состоящий из квадратных пластин одинакового размера 3×3 см и расстоянием между секциями 1 см. Исследования зависимости равномерности распределения толщины покрытия, производились при различных значениях плотности тока, межэлектродного расстояния, интенсивности перемешивания электролита, концентрации ионов осаждаемого металла и при нанесении покрытия на катоды различной геометрической конфигурации.

Расчет производился при следующих параметрах:

- состав электролита – CrO_3 (230–270 г/л), H_2SO_4 (23–27 г/л);
- температура электролита – 55°C ;
- удельная электропроводность – $0,0166 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$;
- выход по току – 35 %;
- длительность нанесения покрытия – 20 мин.

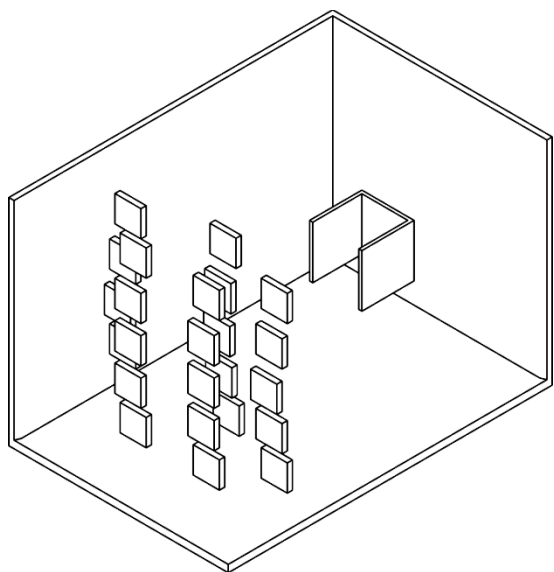


Рис. 1. Схематичное изображение гальванической ванны с многосекционными анодами

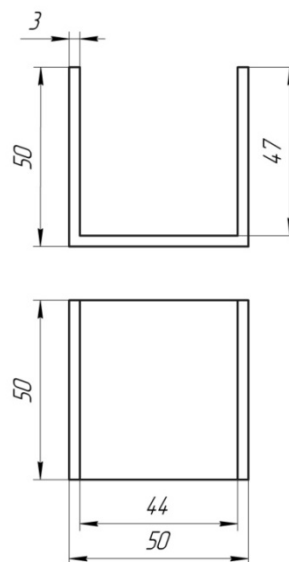


Рис. 2. Конфигурация и размеры катода

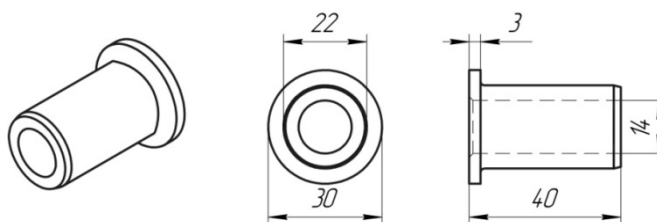


Рис. 3. Конфигурация и размеры катода

Автоматизированные системы управления...

Зависимости коэффициента равномерности от плотности тока и межэлектродного расстояния, при различных значениях интенсивности перемешивания электролита, концентрации ионов осаждаемого металла и при нанесении покрытия на катоды, изображенные на рис. 2 и 3, представлены на рис. 4, 5 и 6 соответственно.

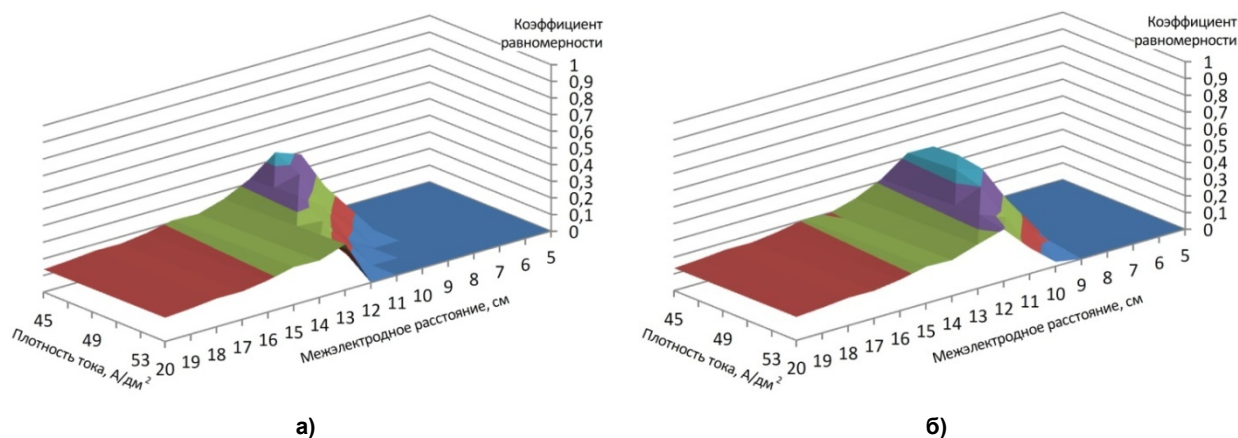


Рис. 4. График зависимости коэффициента равномерности от плотности тока и МЭР при интенсивности перемешивания электролита 50 см/с (а) и 60 см/с (б)

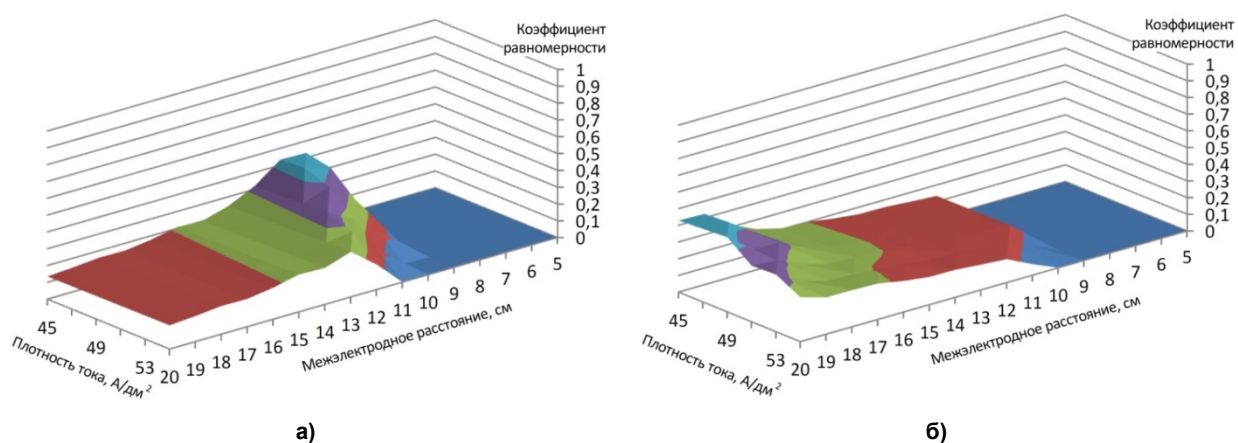


Рис. 5. График зависимости коэффициента равномерности от плотности тока и МЭР при концентрации ионов металла 230 г/л (а) и 250 г/л (б)

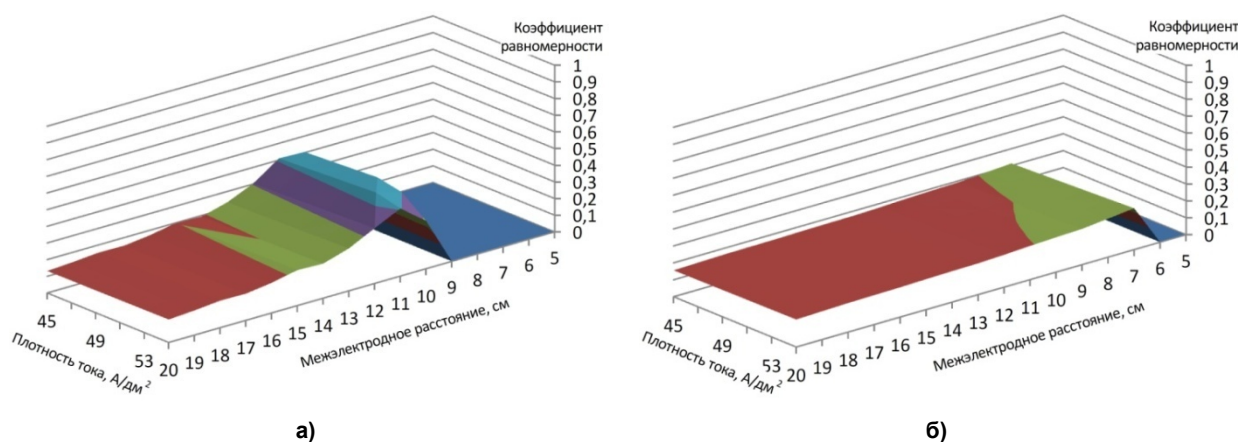


Рис. 6. График зависимости коэффициента равномерности от плотности тока и МЭР при осаждении покрытия на деталь, изображенную на рис. 2 (а), и на деталь, изображенную на рис. 3 (б)

Из графиков видно, что коэффициент равномерности ГП экстремально зависит от плотности тока и МЭР. Кроме того, при изменении концентрации ионов осаждаемого металла и интенсивности перемешивания электролита экстремум коэффициента равномерности достигается при различных значениях плотности тока и МЭР. Вместе с тем, при осаждении покрытия на детали различной геометрической формы, для каждого изделия значения плотности тока и МЭР, при котором достигается максимум коэффициента равномерности, принимает различные значения.

Таким образом, для улучшения равномерного распределения толщины покрытия является целесообразным совместное управление плотностью тока, МЭР и интенсивностью перемешивания электролита, с учетом геометрических форм и размеров электродов, состава, свойств и температуры электролита. Однако обеспечение эффективного управления процессом нанесения ГП предложенным способом невозможно без разработки алгоритма оптимального управления.

2. Анализ методов решения задач оптимального управления

На сегодняшний день известно огромное количество методов решения оптимизационных задач, причем некоторые методы являются эффективными только для конкретной задачи и абсолютно не пригодными для других.

Существенным аспектом данной оптимизационной задачи является вид графиков зависимости коэффициента равномерности от параметров процесса. В результате проведенных исследований было установлено, что коэффициент равномерности ГП экстремально зависит от плотности тока и МЭР.

Для решения задачи оптимального управления параметрами процесса нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами, с целью достижения экстремума коэффициента равномерности, могут быть применены различные модификации градиентных методов. Использование градиентных методов в решении данной задачи поиска экстремума коэффициента равномерности оправдывает себя, прежде всего в связи с тем, что необходимо вести поиск значений параметров процесса, при которых значение коэффициента равномерности примет максимальное значение, в пространстве трех независимых переменных. Кроме того, данная задача обладает значительным числом ограничений, таких как допустимый диапазон значений плотности тока, форма и размеры ванны и т. д., которые могут быть учтены в процессе многопараметрической оптимизации.

Однако среди особенностей градиентных методов следует отметить, что для успешного нахождения глобального экстремума необходимо хорошее начальное приближение и значение рабочего шага поиска. В связи с этим, применение градиентных методов для поиска экстремума коэффициента равномерности ГП не может гарантировать нахождение глобального максимума коэффициента, что является существенным недостатком для решения поставленной оптимизационной задачи, имеющей многоэкстремальный характер.

Данная задача поиска экстремума может быть эффективно решена с применением генетических алгоритмов (ГА). Генетические алгоритмы относятся к классу эволюционных алгоритмов и представляют собой вероятностные методы оптимизации [7]. Отличительной особенностью ГА является то, что поиск решения начинается с некоторого случайного набора решений – популяции, каждый элемент которой называется хромосомой.

ГА представляет собой комбинацию двух видов операций:

1. Генетические операции: скрещивание и мутация.
2. Эволюционная операция: отбор.

Генетические алгоритмы обладают рядом преимуществ: не требуют априорной информации о поведении функции (например, дифференцируемости и непрерывности); относительно стойки к попаданию в локальные оптимумы; просты в реализации.

Таким образом, при решении оптимизационной задачи управления параметрами процесса нанесения ГП целесообразно применение генетических алгоритмов, которые лишены вышеуказанных недостатков градиентных методов.

3. Алгоритм решения задачи оптимального управления процессом нанесения ГП с использованием генетических алгоритмов

Алгоритм решения задачи оптимального управления процессом нанесения ГП с использованием ГА состоит из следующих этапов:

1. Ввод начальных условий, к которым относятся:

– допустимый диапазон изменения плотности тока $[i_{\min}, i_{\max}]$ и точность регулирования параметра знаков после запятой n_i ;

– допустимый диапазон изменения межэлектродного расстояния $[l_{\min}, l_{\max}]$ и точность регулирования параметра знаков после запятой n_l ;

– допустимый диапазон изменения интенсивности перемешивания электролита $[u_{\min}, u_{\max}]$ и точность регулирования параметра знаков после запятой n_u ;

– температура электролита t ;

– концентрация ионов осаждаемого металла в электролите C_0 ;

– удельная электропроводность электролита ρ ;

– вязкость электролита ν ;

– требуемая толщина покрытия h_3 .

2. Определение длины закодированных в бинарной строке оптимизируемых параметров. Требуемое число битов j для кодирования каждого параметра находится по следующей формуле [7]:

$$2^{j-1} < (x_{\max} - x_{\min}) \cdot 10^{n_x} \leq 2^j - 1.$$

3. Формирование случайным способом исходной популяции P , состоящей из n хромосом v_i , представляющих собой закодированные оптимизируемые параметры в бинарной строке [7].

4. Преобразование закодированных оптимизируемых параметров в действительные значения [7]. Преобразование производится по следующей формуле:

$$x_i = x_{\min} + v_i \cdot \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^j - 1}.$$

5. Для определения наиболее приспособленной особи начальной популяции выполняется:

– расчет распределения толщины ГП по поверхности катода, путем решения системы уравнения (1)–(8) математической модели [6];

– расчет значения коэффициента равномерности K ;

– запись значения коэффициента равномерности K и хромосомы, соответствующей наиболее приспособленной особи v_m .

6. Формирование популяции потомков, состоящей из n хромосом v_m .

7. Выполнение операции мутации хромосом, путем случайного изменения одного гена [7].

8. Определяется приспособленность особей популяции потомков, путем расчета распределения толщины ГП по поверхности катода и коэффициента равномерности, при значениях параметров процесса соответствующих каждой хромосоме популяции потомков.

9. Проверка наличия наиболее приспособленных особей из числа популяции потомков. Если в популяции потомков имеются особи, более приспособленные по сравнению с особью предыдущего поколения, то выполняются операции формирования новой популяции потомков, состоящей из наиболее приспособленных хромосом, и мутации, в противном случае начинается отсчет количества популяций, в числе которых отсутствуют особи, приспособленность которых выше по сравнению с предыдущим поколением. При достижении значения счетчика заданного, алгоритм завершается.

Предложенный алгоритм позволит обеспечить наибольшее приближение к точке экстремума коэффициента равномерности за счет одновременного поиска по многим направлениям, когда классические пошаговые методики поиска способны найти глобальный оптимум только в том случае, когда проблема обладает свойством выпуклости. Кроме того, применение ГА позволит повысить производительность расчетов, что имеет особое значение при многопараметрической оптимизации.

Оценка эффективности предложенного алгоритма оптимального управления, производилась на примере осаждения хромового покрытия, описанном выше. Эффективность применения ГА оценивалась в сравнении с градиентными методами, такими как метод случайного поиска, Гаусса – Зейделя, наискорейшего спуска и градиентного спуска. Сравнительный анализ применения ГА и

градиентных методов производилось по максимальному приближению к точке экстремума и длительности времени затраченной на поиск.

Результаты расчетов произведенных с использованием градиентных методов (случайного поиска, Гаусса–Зейделя, наискорейшего и градиентного спуска) и ГА, представлен на рис. 7. Сравнительный анализ длительности поиска экстремума градиентными методами и ГА, представлен на рис. 8

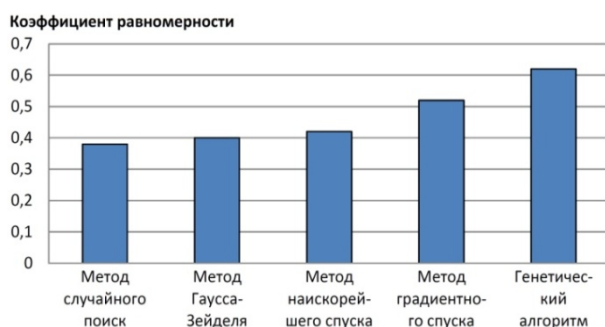


Рис. 7. Сравнение результатов поиска экстремума градиентными методами и ГА



Рис. 8. Сравнение результатов длительности поиска экстремума градиентными методами и ГА

Как видно из приведенных диаграмм, наилучшее приближение к точке экстремума коэффициента равномерности, обеспечивается с использованием ГА и метода градиентного спуска. По сравнению с методом градиентного спуска, результат, полученный ГА позволяет добиться значительно лучшего приближения к точке экстремума, в то же время поиск экстремума коэффициента равномерности занимает меньше времени.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что зависимость коэффициента равномерности ГП от плотности тока и межэлектродного расстояния имеет экстремальный характер. Кроме того, при различных параметрах процесса, составах электролита и при осаждении покрытия на детали различной формы и размеров, экстремум коэффициента равномерности достигается при различных значениях плотности тока и МЭР.

Исходя из вида графиков зависимости коэффициента равномерности от плотности тока и МЭР, для решения поставленной в данной работе задачи оптимального управления были рассмотрены градиентные методы (метод случайного поиска, Гаусса–Зейделя, наискорейшего спуска, градиентного спуска) и генетические алгоритмы.

Проведенные в данной работе исследования показали целесообразность и эффективность применения ГА для решения задачи оптимизации управления процессом нанесения ГП. Предложенная методика управления плотностью тока, МЭР и интенсивностью перемешивания электролита на основе генетических алгоритмов позволяет избежать попадания в локальный оптимум и обеспечивает поддержание экстремального значения коэффициента равномерности в условиях нестабильности факторов, влияющих на процесс нанесения гальванического покрытия.

Литература

1. А.с. 1048005 СССР, МКИ³ С 25 D 21/12. Способ автоматического управления процессами электроосаждения металла покрытия / А.Н. Алексеев и др. (СССР). – № 3423910/22-02; заявл. 14.04.82; опубл. 15.10.83, Бюл. № 38.
2. А.с. 1463810 СССР, МКИ⁴ С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / Н.Д. Кошевой и др. (СССР). – № 4316493/31-02; заявл. 31.08.87; опубл. 30.03.83, Бюл. № 9.
3. Литовка, Ю.В. Метод расчёта потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю.В. Литовка, И.А. Дьяков // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 218–221.
4. Соловьев, Д.С. Оптимальное управление гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями: дис. ... канд. техн. наук / Д.С. Соловьев – Тамбов: ТГТУ, 2014. – 166 с.

5. Конкина, В.В. Математическое моделирование и оптимальное управление реверсным режимом нанесения гальванических покрытий в многоанодной ванне / В.В. Конкина, Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // *Вестн. АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика.* – 2015. – № 2. – С. 7–15.

6. Лютов, А. Г. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов / А.Г. Лютов, А.Р. Ишкулова // *Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та.* – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 45–48.

7. Ротштейн, А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.

Лютов Алексей Германович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; lutov1@mail.ru.

Ишкулова Алия Рифовна, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; Aliya.Ishkulova@yandex.ru.

Поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

DOI: 10.14529/ctcr170111

OPTIMIZATION OF CONTROL OF PLATING PROCESS IN BATH WITH MULTISECTION ANODES WITH USE OF GENETIC ALGORITHMS

A.G. Lutov, lutov1@mail.ru,

A.R. Ishkulova, Aliya.Ishkulova@yandex.ru

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

In this work the question of optimum control of process of electroplated coating in a bath with multisection anodes is considered. The analyses of processes of modern management methods in the plating bath with multisection anodes. The research effect of current density, distance between electrodes, the intensity of mixing the electrolyte and shapes and sizes of workpieces on the uniformity of the coating thickness. As a result of the conducted researches it is established the extremal character of dependence of uniformity of a covering on density of current and interelectrode distance is established. The analysis of methods of search of an extremum. An algorithm for solving optimal control application process tasks electroplating bath with multisection anodes using genetic algorithms.

Keywords: electroplating, multisection anode, optimum control, searching of an extremum, genetic algorithm.

References

1. Alekseev A.N. et al. *Sposob avtomaticheskogo upravlenija processami jelektroosazhdenija metalla pokrytija* [Automatic Process Control Method of Electrodeposition Coating of Metal]. Patent USSR, no. 3423910, 1983.

2. Koshevoy N.D. et al. *Ustrojstvo dlja nanesenija gal'vanicheskij pokrytij* [An Apparatus for Plating] Patent USSR, no. 4316493, 1983.

3. Litovka Y.V., Diakov I.A. [The Method of Calculating the Potential of the Anodes in the Plating Bath Abounding]. *Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1997, vol. 31, no. 2. pp. 218–221. (in Russ.)

4. Soloviev D.S. *Optimal'noe upravlenie gal'vanicheskimi processami s ciklicheski vkljuchaemyimi anodnymi sekcijami. Dis. kand. tekhn. nauk* [Optimal Control of Electroplating Processes to Cycle on the Anode Sections. Cand. sci. diss.]. Tambov, TSTU, 2014. 166 p.

5. Konkina V.V., Soloviev D.S., Litovka Y.V. [Mathematical Modeling and Optimal Control of Reverse Plating Regime in Bath with Multi-Section Anodes]. *Vestnik ASTU. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 2, pp. 7–15. (in Russ.)

6. Liutov A.G., Ishkulova A.R. [Modeling Plating Process Based on Geometric Configurations of Electrodes]. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 20, no. 4, pp. 45–48. (in Russ.)

7. Rotshtejn A.P. *Intellektual'nye tehnologii identifikacii: nechetkaja logika, geneticheskie algoritmy, nejronnye seti* [Intellectual Technologies of Identification: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, Neural Networks]. Vinnytsia, UNIVERSUM-Vinnytsia, 1999. 320 p.

Received 24 October 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лютов, А.Г. Оптимизация управления процессом нанесения гальванического покрытия в ваннах с многосекционными анодами с использованием генетических алгоритмов / А.Г. Лютов, А.Р. Ишкулова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 103–111. DOI: 10.14529/ctcr170111

FOR CITATION

Lutov A.G., Ishkulova A.R. Optimization of Control of Plating Process in Bath with Multisection Anodes with Use of Genetic Algorithms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 103–111. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170111