

И. Ю. Пчелинцева, аспирант, irina_yu_10@mail.ru,
Ю. В. Литовка, д-р техн. наук, проф., polychem@list.ru,
Тамбовский государственный технический университет

Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токонепроводящим экраном

Обсуждается разработанная авторами автоматизированная система управления процессом нанесения гальванических покрытий, имеющая двухуровневую архитектуру. На нижнем уровне осуществляется управление технологическими параметрами каждой ванны: стабилизация температуры и уровня электролита в ванне; стабилизация или программное управление электрическим током. На верхнем уровне решается задача расчета оптимальной конфигурации токонепроводящего перфорированного экрана (определяются число и ширина отверстий), обеспечивающей минимальное значение неравномерности нанесения цинкового покрытия. Для этого разработана нелинейная математическая модель гальванического процесса в ванне с перфорированным экраном, отличающаяся от известных добавлением краевых условий на токонепроводящем экране. Отмечено, что нелинейности содержат уравнения модели, описывающие граничные условия вблизи анода и катода гальванической ванны. Поэтому разработан численный метод решения уравнений модели, отличающийся реализацией метода Ньютона в математическом пакете Mathcad через перенаправление ввода/вывода. В работе описан алгоритм работы с математическим пакетом, особенностью которого является подготовка команд пакета в текстовом формате и парсинг полученных результатов вычислений также из текстового файла. Применяемый численный метод для решения системы уравнений модели имеет квадратичную скорость сходимости, что указывает на его эффективность на большой сетке, например, из 900 узлов. Многочисленные вычислительные эксперименты показали десятикратный выигрыш во времени по сравнению с традиционным итерационным методом, описанным в известных статьях.

Впервые поставлена и решена задача дискретной оптимизации для разработанной автоматизированной системы управления процессом нанесения гальванического покрытия. Особенностью постановки данной задачи являются ограничения, допускающие только полный перебор возможных значений варьируемых параметров, объем которого не велик. Поэтому использовался последовательный алгоритм решения задачи оптимизации. Приведены комбинации возможных значений варьируемых параметров и значения критерия, а также проанализировано время решения задачи оптимизации.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, процесс нанесения гальванического покрытия, критерий неравномерности, математическая модель, метод Ньютона, оптимизация, метод полного перебора

Введение

Электролитические процессы нанесения гальванических покрытий имеют широкое промышленное применение: защита изделий от коррозии, повышение износостойкости, сообщение отражательной способности и т. д. Для нанесения металлопокрытия изделие сначала подвергают механической обработке, затем осуществляется химическое травление с последующей промывкой. Только после этого на обработанную деталь (катод) в специально приготовленном электролите под постоянным током наносят слой металла определенной толщины. Качество получаемого покрытия на катоде определяется распределением металла по поверхности детали. Поэтому важной задачей здесь является нанесение более равномерного покрытия.

Как известно [1, 2], если нанести покрытие на плоскую деталь в гальванической ванне, мы получим профиль покрытия, напоминающий по форме так называемое "корыто", т. е. на краях детали толщина гальванического покрытия может намного превышать толщину в центре катода. Этот эффект объясняется неравномерностью электрического поля вблизи поверхности катода. Еще более сложная картина распределения гальванического покрытия по поверхности катода наблюдается при не плоской его форме.

Для снижения неравномерности гальванического покрытия в промышленности применяют различные методы, одним из которых является использование тонких токонепроводящих экранов с отверстиями. Экраны устанавливают в поперечном сечении ванны. При этом на распределение покрытия влияет

положение экрана относительно катода; число, расположение и ширина отверстий. Поиск указанных параметров, при которых получается наиболее равномерное покрытие, в результате проведения физических экспериментов показывает [3, 4], что данный процесс связан с очень большими затратами времени, материальных и финансовых ресурсов. Выход из данной негативной ситуации возможен путем использования математических методов моделирования, системного анализа и оптимизации.

Цель работы — создание автоматизированной системы управления процессом нанесения гальванопокрытий, обеспечивающей минимальное значение неравномерности покрытия путем использования перфорированных токонепроводящих экранов с оптимальными параметрами.

Для достижения цели необходимо разработать архитектуру системы управления; поставить и решить задачу оптимизации; построить математическую модель гальванического процесса в ванне с токонепроводящим перфорированным экраном и разработать численный метод решения ее уравнений.

Математическая постановка задачи

Исходные данные для постановки задачи оптимизации следующие.

Рассмотрим гальваническую ванну, имеющую форму параллелепипеда, с размерами дна l_1 , l_2 по координатам x , y , соответственно; с высотой слоя электролита l_3 (координата z) и с плоским бесконечно тонким анодом, который имеет прямоугольную форму. Положим, что анод располагается по центру вдоль стенки ванны, параллельно ей. Зададим x_{al} , x_{ar} — координаты расположения краев анода. Деталь-катод может иметь любую форму; для построения математической модели и решения задачи оптимизации упростим ситуацию, задав форму катода в виде пластины, которая, как и анод, располагается по центру вдоль противоположной аноду стенки ванны, параллельно ей. Зададим x_{cl} , x_{cr} — координаты расположения краев катода; L — ширина катода. Пусть внутри ванны параллельно аноду располагается поперечный бесконечно тонкий плоский токонепроводящий экран, который имеет отверстия прямоугольной формы. Высота экрана и таких отверстий совпадает с высотой слоя электролита l_3 , ширина экрана равна l_1 . Примем, что все

отверстия имеют прямоугольную форму одинаковой ширины PL . Число отверстий N_{pl} . Пример расположения в гальванической ванне анода, катода и токонепроводящего экрана с двумя отверстиями ($N_{pl} = 2$) представлен на рис. 1.

Вид токонепроводящего экрана, соответствующего рис. 1, представлен на рис. 2.

Для упрощения задачи примем допущение, что в любом горизонтальном сечении ванны конфигурация электрического поля не будет изменяться. Тогда все расчеты для любого горизонтального сечения (для любого $0 \leq z \leq l_3$) будут эквивалентны. Соответственно, распределение толщины δ гальванического покрытия в таком сечении будет зависеть только от координаты x : $\delta(x)$.

Математическая постановка задачи оптимизации примет вид: найти ширину PL и число



Рис. 1. Горизонтальное сечение гальванической ванны с сеткой по координатам x и y

Fig. 1. Horizontal section of a galvanic bath with a grid along x and y coordinates

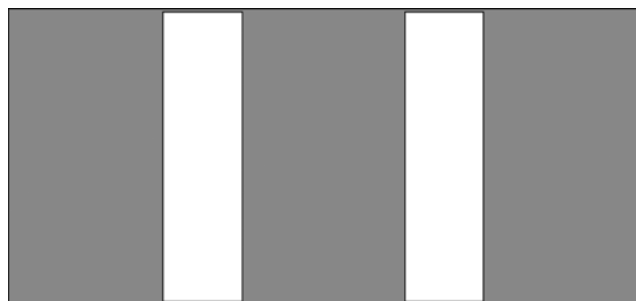


Рис. 2. Вид токонепроводящего экрана

Fig. 2. View of a non-conductive screen

N_{pl} отверстий прямоугольной формы в токонепроводящем экране, при которых критерий неравномерности R принимает минимальное значение:

$$R = \frac{1}{L} \int_{x_{cl}}^{x_{cr}} \frac{\delta(x) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} dx \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\delta_{\min} = \min_{x \in [x_{cl}, x_{cr}]} \delta(x)$, $\delta_{\min}$ — минимальное значение толщины покрытия на поверхности катода.

Математическая модель процесса нанесения гальванического покрытия

Для связи критерия R с варьируемыми параметрами PL и N_{pl} построим математическую модель.

Пусть $\phi(x, y)$ — потенциал электрического поля в точке с координатами (x, y) . Уравнение Лапласа, описывающее распределение потенциала в произвольном горизонтальном сечении в электролите гальванической ванны, имеет вид

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Зададим граничные условия, описывающие потенциалы поля на аноде, катоде, стенках ванны и токонепроводящем экране.

Потенциалы поля на аноде $\phi(x, 0)$, $x \in [x_{al}, x_{ar}]$, и катоде $\phi(x, l)$, $x \in [x_{cl}, x_{cr}]$, связаны с так называемыми функциями $F_a(i_a)$ и $F_c(i_c)$ анодной и катодной поляризации [5] следующими соотношениями:

$$\phi(x, 0) + F_a(i_a(x)) = U, \quad \phi(x, l) - F_c(i_c(x)) = 0, \quad (3)$$

где i_a, i_c — анодная и катодная плотности тока; U — анодное напряжение.

Функции поляризации определяются аппроксимацией экспериментальных данных.

Заметим, что ток течет от большего потенциала к меньшему (от анода к катоду — положительное направление тока вдоль оси Oy). Закон Ома в этом случае в дифференциальной форме вблизи анода и катода имеет вид

$$\begin{aligned} i_a(x) &= -\chi \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,0)}, \quad x \in [x_{al}, x_{ar}]; \\ i_c(x) &= -\chi \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)}, \quad x \in [x_{cl}, x_{cr}], \end{aligned} \quad (4)$$

где χ — удельная проводимость электролита.

Далее опишем граничные условия для стенок ванны (отсутствие тока через стенки — условие изоляции):

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{(0,y)} = 0, \quad y \in [0, l]; \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{(l,y)} = 0, \quad y \in [0, l]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,0)} = 0, \quad x \in [0, x_{al}]; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,0)} = 0, \quad x \in (x_{ar}, l]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)} = 0, \quad x \in [0, x_{cl}]; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)} = 0, \quad x \in (x_{cr}, l]. \quad (7)$$

Для плоской бесконечно тонкой стенки с отверстиями (токонепроводящего экрана) граничные условия запишутся в виде

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,p)} = 0, \quad x \in [x_{pl}^{(m)}, x_{pr}^{(m)}], \quad m = 1, \dots, n, \quad (8)$$

где p — y -координата стенки; $x_{pl}^{(m)}, x_{pr}^{(m)}$ — координаты расположения краев m -й части изоляционного экрана; n — число таких частей. Отметим, что $n = N_{pl} + 1$.

Таким образом, мы получили математическую модель (2)–(8), решением уравнений которой является функция $\phi(x, y)$ потенциала в каждой точке с координатами (x, y) гальванической ванны. Отличие построенной математической модели от известных [2, 8–10] заключается в добавлении граничных условий (8).

Толщина получаемого покрытия на детали вычисляется по закону Фарадея

$$\delta(x) = \frac{k_{Me}}{\rho} i_c(x) \Delta t, \quad (9)$$

где $x \in [x_{cl}, x_{cr}]$; k_{Me} — электрохимический эквивалент металла покрытия; ρ — плотность металла покрытия; Δt — время процесса (нанесения покрытия).

Численный метод решения уравнений модели (2)–(9)

Заметим, что задача (2)–(9) является нелинейной, так как содержит нелинейные краевые условия (3). Найти аналитическое решение данной задачи, как правило, не представляется возможным, поэтому будем решать ее численно. Для этого введем сетку по координатам x и y :

$$\begin{aligned} x_i &= (i-1)h_x, \quad y_j = (j-1)h_y, \\ i &= 1, \dots, N_x, \quad j = 1, \dots, N_y, \end{aligned}$$

где h_x и h_y — шаги сетки (т. е. численного интегрирования) по x и y соответственно, нумерация

узлов сетки идет с единицы; N_x и N_y — максимальные номера узлов по x и y соответственно.

В задаче (2)—(9) заменим производные первого и второго порядков их разностными аналогами:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h_x^2};$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \approx \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{h_y^2};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{(0,y)} \approx \frac{\phi_{2,j} - \phi_{1,j}}{h_x};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{(l,y)} \approx \frac{\phi_{N_x,j} - \phi_{N_x-1,j}}{h_x};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{(x,0)} \approx \frac{\phi_{i,2} - \phi_{i,1}}{h_y};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{(x,l)} \approx \frac{\phi_{i,N_y} - \phi_{i,N_y-1}}{h_y};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{(x,p)} \approx \frac{\phi_{i,N_p} - \phi_{i,N_p-1}}{h_y},$$

где N_p — номер слоя сетки по j , где располагается изоляционный экран.

Получим систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{h_y^2} = 0, \\ i = 2, \dots, N_x - 1 \ \& \ j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p, \\ i = p_r^{(k)}, \dots, p_l^{(k+1)} \ \& \ j = N_p, \quad k = 1, \dots, N_{pl}; \\ \frac{\phi_{2,j} - \phi_{1,j}}{h_x} = 0, \quad j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p; \\ \frac{\phi_{N_x,j} - \phi_{N_x-1,j}}{h_x} = 0, \quad j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p; \\ \frac{\phi_{i,2} - \phi_{i,1}}{h_y} = 0, \quad i = 1, \dots, a_l - 1, a_r + 1, \dots, N_x; \\ \frac{\phi_{i,N_y} - \phi_{i,N_y-1}}{h_y} = 0, \quad i = 1, \dots, c_l - 1, c_r + 1, \dots, N_x; \\ \frac{\phi_{i,N_p} - \phi_{i,N_p-1}}{h_y} = 0, \quad i = p_l^{(m)}, \dots, p_r^{(m)}, \quad m = 1, \dots, N_{pl} + 1; \\ \phi_{i,1} + F_a \left(-\chi \frac{\phi_{i,2} - \phi_{i,1}}{h_y} \right) - U = 0, \quad i = a_l, \dots, a_r; \\ \phi_{i,N_y} - F_c \left(-\chi \frac{\phi_{i,N_y} - \phi_{i,N_y-1}}{h_y} \right) = 0, \quad i = c_l, \dots, c_r, \end{array} \right.$$

где $h_x = h_y$, a_l, a_r, c_l, c_r — номера узлов сетки, где находятся левый и правый края анода и катода соответственно; $p_l^{(m)}, p_r^{(m)}$ — номера узлов сетки, соответствующих краям частей изоляционного экрана, $m = 1, \dots, N_{pl} + 1$.

Отметим, что полученная нелинейная система алгебраических уравнений замкнута, и число неизвестных в ней равно $g = N_x N_y$.

Объединим неизвестные величины

$$\begin{aligned} \phi_{1,1}, \phi_{1,2}, \dots, \phi_{1,N_y}, \phi_{2,1}, \phi_{2,2}, \dots, \phi_{2,N_y}, \dots, \\ \dots, \phi_{N_x,1}, \phi_{N_x,2}, \dots, \phi_{N_x,N_y} \end{aligned} \quad (10)$$

в вектор $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_g]^T$.

Перепишем систему как

$$\Lambda(\Psi) = 0, \quad (11)$$

где $\Lambda(\Psi)$ — векторная функция от Ψ , содержащая g компонент.

Для нахождения приближенного решения Ψ^* системы (11) будем использовать метод Ньютона. Чтобы его применить, нужно правильно выбрать вектор начального приближения $\Psi^{(0)}$. Заметим, что при движении от анода к катоду потенциал убывает. Максимальный потенциал, который может быть на аноде (т. е. при нулевой поляризации), равен U , а на катоде — 0 В. Тогда начальное приближение на первом слое сетки по j возьмем равным $\psi_{(i-1)N_y+1}^{(0)} \equiv \phi_{i,1}^{(0)} = U$, на последнем слое $\psi_{(i-1)N_y+N_y}^{(0)} \equiv \phi_{i,N_y}^{(0)} = 0$ при $i = 1, \dots, N_x$. В промежуточных слоях сетки по j сделаем линейную интерполяцию:

$$\psi_{(i-1)N_y+j}^{(0)} \equiv \phi_{i,j}^{(0)} = U \frac{N_y - j}{N_y - 1}. \quad (12)$$

Классическая численная схема метода Ньютона имеет вид [6]

$$\Psi^{(r)} = \Psi^{(r-1)} - [\nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})]^{-1} \Lambda(\Psi^{(r-1)}), \quad (13)$$

где $r = 1, 2, 3, \dots$ — номер итерации; $\nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})$ — якобиан функции Λ в точке $\Psi^{(r-1)}$.

Чтобы получить из формулы (13) текущее приближение к решению системы (11), якобиан в формуле (13) при вычислениях не обращают, так как операция обращения матрицы требует большого объема вычислений даже самым быстрым методом; например, при $N_x = N_y = 30$ получается нелинейная система из 900 уравнений. Вместо этого формулу (13) можно

привести к системе линейных уравнений относительно $\Psi^{(r)}$ вида

$$\nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})\Psi^{(r)} = \nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})\Psi^{(r-1)} - \Lambda(\Psi^{(r-1)}). \quad (14)$$

Для решения системы (14) наиболее эффективным методом на сегодняшний день является модификация метода Гаусса: LU-разложение, имплементированное во многих математических пакетах и библиотеках. Мы будем использовать свободный пакет символьных вычислений Maxima [7], где уже реализовано LU-разложение в методе Ньютона.

Приближенное решение системы (11) будем искать с точностью ε . В пакете Maxima точность вычислений контролируется проверкой значения модуля разности векторов $\Psi^{(r)}$ и $\Psi^{(r-1)}$ на соседних итерациях:

когда выполнено условие

$$|\Psi^{(r)} - \Psi^{(r-1)}| < \varepsilon,$$

приближенное решение найдено, т. е.

$$\Psi^* \approx \Psi^{(r)}.$$

Распределение толщины получаемого покрытия на детали вычисляется по формуле (9). Чтобы рассчитать ее в мкм, используем следующее соотношение с учетом одной из формул (4) для плотности катодного тока:

$$\begin{aligned} \delta(x) &= 100 \frac{k_{Me}}{\rho} i_c(x) \Delta t = -100 \frac{k_{Me}\chi}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)} \Delta t \approx \\ &\approx 100 \frac{k_{Me}\chi}{\rho} \frac{\phi_{i,N_y-1} - \phi_{i,N_y}}{h_y} \Delta t, \end{aligned} \quad (15)$$

где $x \in [x_{cl}, x_{cr}]$; $i = c_l, \dots, c_r$.

Для расчета значения критерия неравномерности заменим определенный интеграл, входящий в формулу (1), дискретным аналогом по формуле трапеций:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{L} \left(\frac{\delta(x_{c_l}) + \delta(x_{c_r})}{2\delta_{\min}} - 1 + \sum_{i=c_l+1}^{c_r-1} \left(\frac{\delta(x_i)}{\delta_{\min}} - 1 \right) \right) h_x = \\ &= \frac{1}{c_r - c_l} \left(\frac{\delta(x_{c_l}) + \delta(x_{c_r})}{2\delta_{\min}} + \frac{\sum_{i=c_l+1}^{c_r-1} \delta(x_i)}{\delta_{\min}} + c_l - c_r \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Работа с математическим пакетом Maxima

Перед вызовом пакета Maxima в операционной системе Linux нужно подготовить для него текстовый файл с командами. Во избежание наложения файлов имя этого файла должно содержать идентификаторы значений варьируемых параметров критерия R . Эти параметры будут описаны в следующем пункте данной статьи.

Рассмотрим алгоритм построения командного файла пакета:

1. Определить функции $F_a(i_a)$ и $F_c(i_c)$, указывая в конце знак \$, так как результат не нужно выводить в консоль.

2. Выключить многострочное рисование выражений через **display2d:false\$**, т. е. оставить только текстовый вывод в строку.

3. Загрузить библиотеку с реализацией метода Ньютона **load(mnewton);**.

4. Установить точность вычислений **newtonepsilon:10^-2\$**.

5. Вызвать функцию метода Ньютона командой **mnewton();**, для которой в символьном виде построить следующие аргументы: список выражений, стоящих в левой части каждого из уравнений системы (11), список неизвестных потенциалов (10) и список начальных приближений для них, заранее вычисленных по формуле (12).

Вызов пакета из расчетной программы, написанной на языке C++, осуществляется с помощью стандартной функции **system()** языка C с перенаправлением ввода на сформированный командный файл и вывода в результирующий текстовый файл.

После работы пакета необходимо осуществить несложный парсинг полученного файла в целях получения двумерного массива потенциалов $\phi_{i,j}$ в гальванической ванне. Только после этого можно вычислить распределение толщины получаемого покрытия и значение критерия R .

Решение задачи оптимизации

Многочисленные вычислительные эксперименты с дискретной моделью (11), (15), (16) показали, что на значение критерия R слабо влияет положение отверстий в экране (изменение на 1...2 %), но сильно влияет число N_{pl} и ширина PL отверстий, когда экран достаточно близок к катоду.

Также, начиная с некоторого значения N_{pl} , на значение R оказывает влияние и положение экрана, но в данной работе мы его считаем константой. В оптимизационной задаче в качестве варьируемых параметров используются величины N_{pl} и PL в предположении, что все отверстия имеют одинаковую ширину и расположены симметрично относительно середины экрана. Так как алгоритм использует сетку, логично выбирать значение PL , равное числу шагов сетки, охватывающих каждое из отверстий. Следовательно, ширина каждого отверстия будет рассчитываться как $PL \cdot h_x$.

Определим границы изменения варьируемых параметров. Целую величину N_{pl} будем изменять от 1 до заданного максимального числа $N_{\max}$ отверстий. Левая граница для целого значения PL равна двум (чтобы поле проходило через отверстия), а правую границу $PL_{\max}(N_{pl})$ определим по значению N_{pl} :

$$PL_{\max}(N_{pl}) = \left\lceil \frac{N_x - 1 - L_{pr_{\min}}(N_{pl} + 1)}{N_{pl}} \right\rceil,$$

где $[a]$ — целая часть числа a ; $L_{pr_{\min}}$ — минимальная ширина изоляционных частей экрана, взятая в шагах сетки. Мы предполагаем, что $L_{pr_{\min}} = 2$.

Однако не все комбинации значений N_{pl} и PL будут допустимы. Как было указано выше, отверстия на сетке должны располагаться симметрично относительно середины экрана. Тогда нужно при выборе пары N_{pl} и PL вычислить ширину $L_{pr}(N_{pl}, PL)$ изоляционных частей экрана в шагах сетки по формуле

$$L_{pr}(N_{pl}, PL) = \frac{N_x - 1 - N_{pl} \cdot PL}{N_{pl} + 1}.$$

Если получим целое значение L_{pr} (т. е. изоляционные части можно уложить на сетке), то пара N_{pl} и PL является допустимой.

Таким образом, мы получаем следующую задачу целочисленной оптимизации:

$$\begin{cases} R(N_{pl}, PL) \rightarrow \min, \\ N_{pl} \in [1, N_{\max}], \\ PL \in [2, PL_{\max}(N_{pl})], \\ L_{pr}(N_{pl}, PL) - \text{целое}, \\ N_{pl}, PL - \text{целые}. \end{cases} \quad (17)$$

Поскольку правая граница для варьируемого параметра PL зависит от выбора значе-

ния параметра N_{pl} , то для решения задачи (17) будем использовать метод полного перебора. Данный метод имеет два преимущества: простота и гарантированное нахождение оптимального решения.

Пример решения задачи оптимизации

Расчеты проведем для реальной гальванической ванны цинкования, на которой проводились эксперименты для проверки адекватности разработанной математической модели.

Будем рассматривать процесс цинкования в щелочном электролите, имеющем следующий состав: ZnO — 10 г/л, NaOH — 150 г/л, блескообразующая добавка "Экомет С 1Б" — 3 г/л.

Функции поляризации описанного щелочного электролита, полученные аппроксимацией экспериментальных данных методом наименьших квадратов, имеют вид [5]

$$F_a(i_a) \equiv 1, 2;$$

$$F_c(i_c) = 0,0016i_c^2 + 0,055i_c + 1,347,$$

где значения F_a и $F_c(i_c)$ измеряются в вольтах, i_c — в А/дм².

Размеры ванны, анода, катода и токонепроводящего экрана следующие: $l_1 = l_2 = 0,986$ дм (далее все размеры приближены к величинам, кратным шагу численного интегрирования уравнений математической модели); $l_3 = 0,14$ дм; $x_{al} = 0,272$ дм; $x_{ar} = 0,714$ дм; $x_{cl} = 0,34$ дм; $x_{cr} = 0,646$ дм; $n = 3$; $p = 0,884$ дм; $x_{pl}^{(1)} = 0$ дм; $x_{pr}^{(1)} = 0,238$ дм; $x_{pl}^{(2)} = 0,374$ дм; $x_{pr}^{(2)} = 0,612$ дм; $x_{pl}^{(3)} = 0,748$ дм; $x_{pr}^{(3)} = 0,986$ дм.

Удельная проводимость электролита цинкования $\chi = 0,35$ (Ом·дм)⁻¹.

Электрохимический эквивалент цинка $k_{Me} = 1,22$ г/(А·ч), плотность цинка $\rho = 7,133$ г/см³, время нанесения покрытия $\Delta t = 0,67$ ч. Как показали многочисленные натурные эксперименты с цинкованием плоских деталей, за это время формируется покрытие средней толщиной 23 мкм, что является наиболее распространенным значением в машиностроительной промышленности.

Положим, что к электродам гальванической ванны подведено постоянное напряжение $U = 3,67$ В.

Значения номеров описанных выше узлов сетки: $N_x = N_y = 30$; $N_p = 27$; $a_l = 9$; $a_r = 22$; $c_l = 11$; $c_r = 20$; $p_l^{(1)} = 1$; $p_r^{(1)} = 8$; $p_l^{(2)} = 12$; $p_r^{(2)} = 19$; $p_l^{(3)} = 23$; $p_r^{(3)} = 30$.

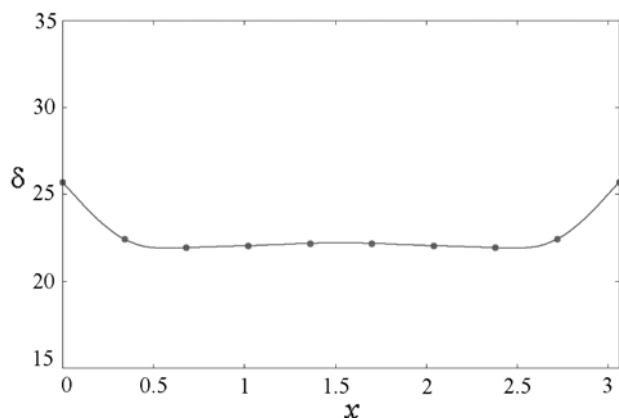


Рис. 3. Распределение покрытия по поверхности детали (размерность по оси x — см, по оси δ — мкм), отсчет по оси x идет от края катода

Fig. 3. Distribution of the coating over the surface of the detail (a dimension along x axis is cm, a dimension along δ axis is μm), the x -axis reads from the edge of the cathode

В результате решения задачи оптимизации разработанной программой все возможные комбинации пар N_{pl} и PL и критерия R в процентах при этих значениях сведены в таблицу. Как видно из нее, решением задачи оптимизации являются значения $N_{pl} = 2$ (т. е. два отверстия в токонепроводящем экране) и $PL = 7$ (т. е. 7 шагов по сетке как ширина каждого отверстия). Значения критерия R при этом равно 2 %, что является минимальным среди всех вариантов. Время, затраченное на полный перебор, на компьютере с процессором Intel Core i5-9400 с тактовой частотой 2,9 ГГц составило 306 мин или 5 ч 6 мин.

Решение задачи (17) методом полного перебора

Номер комбинации	N_{pl}	PL	R , %
1	1	3	13
2	1	5	20
3	1	7	23
4	1	9	24
5	1	11	22
6	1	13	21
7	1	15	20
8	1	17	19
9	1	19	18
10	1	21	18
11	1	23	18
12	1	25	17
13	2	4	4
14	2	7	2
15	2	10	4
16	3	3	12
17	3	7	22

Примечание: серым цветом отмечен минимум критерия R .

На рис. 3 представлено распределение толщины получаемого покрытия на детали при оптимальном значении варьируемых параметров. Для наглядности точки соединены кубическим сплайном.

Таким образом, решена задача поиска оптимальных значений варьируемых переменных — ширины PL и числа N_{pl} отверстий прямоугольной формы в токонепроводящем экране, при которых критерий неравномерности R принимает минимальное значение. Применяемый численный метод для решения системы (11) — дискретного аналога уравнений модели (2)—(9) — имеет квадратичную скорость сходимости, что указывает на его эффективность на сетке из 900 узлов. Многочисленные вычислительные эксперименты показали [2] десятикратный выигрыш во времени по сравнению с итерационным методом, описанным в статьях [8—10]. Авторы использовали реализацию метода Ньютона в математическом пакете Matha через перенаправление ввода/вывода.

Стоит отметить, что добавление еще одной варьируемой переменной — положения экрана относительно катода, а также расчеты для катода произвольной формы потребуют разработки оптимизационного метода, более эффективного, чем полный перебор, например, распараллеливание применяемого алгоритма.

Архитектура автоматизированной системы управления

Наиболее распространенным оборудованием для нанесения электрохимических покрытий в промышленности являются гальванические линии. Как известно, гальваническая линия состоит из набора ванн, в которых проводятся операции подготовки деталей (обезжиривание, травление и т. д.); нанесения покрытия (таких ванн может быть несколько); заключительных операций (промыть, сушка) [11—20]. Для автоматизированного управления технологическими процессами гальванической линии предлагается двухуровневая архитектура системы управления (рис. 4).

В зависимости от процессов, протекающих в ванне, могут измеряться следующие технологические параметры: температура, уровень, ток, напряжение. На нижнем уровне осуществляется управление технологическими параметрами каждой ванны: стабилизация температуры и уровня



Рис. 4. Двухуровневая архитектура системы управления гальванической линией

Fig. 4. Two-level architecture of the electroplating line control system

электролита; стабилизация или программное управление электрическим током. В качестве вычислительного устройства нижнего уровня используются микропроцессорные контроллеры.

Заключение

В данной статье рассмотрена разработанная авторами автоматизированная система управления процессом нанесения гальванопокровов, имеющая двухуровневую архитектуру. Вычислительное устройство верхнего уровня решает задачу расчета оптимальной конфигурации токопроводящего перфорированного экрана. Исходными данными для расчета являются форма и размеры детали, поступившей на обработку. Двухуровневая система по сравнению с одноуровневой отличается большей надежностью, гибкостью; позволяет осуществлять поочередное внедрение подсистем управления, а распределение функций между вычислительными устройствами нижнего и верхнего уровня позволяет использовать более простую и, следовательно, более дешевую вычислительную технику.

Разработанная автоматизированная система управления гальваническими процессами принята к использованию на гальваническом участке ООО "Завод Тамбовполимермаш".

Список литературы

1. Каданер Л. И. Равномерность гальванических покрытий. Харьков: Изд-во Харьк. ГУ, 1960. 414 с.

2. Pchelintseva I. Yu., Pchelintsev A. N., Litovka Yu. V. Modeling of metal distribution when coating flat metal plates in electroplating baths // International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2021. Vol. 34, Iss. 2. e2830. 10 p.
3. Шульгин В. Г. Распределение тока и повышение равномерности осаждения металлов в гальванотехнике и гальванопластике. Л.: ЛДНТП, 1983. 31 с.
4. Пчелинцева И. Ю. О проверке адекватности модели электрического поля в гальванической ванне с плоским токопроводящим экраном // Тезисы докладов XXX Международной научно-технической конференции "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации". 2021. С. 75–76.
5. Кудрявцев Н. Т. Электролитические покрытия металлами. М.: Химия, 1979. 352 с.
6. Demidovich B. P., Maron I. A. Computational mathematics. M.: Mir Publishers, 1981. 688 p.
7. Система компьютерной алгебры Maxima. URL: <http://maxima.sourceforge.net/ru/> (дата обращения: 09.11.2021).
8. Dutov A. V., Sypalo K. I., Solovjev D. S., Litovka Y. V., Solovjeva I. A., Nesterov V. A. Search for the optimal control over current regimes in electroplating processes with multi anodes at a diversified assortment of treated articles // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, N. 1. P. 75–85.
9. Litovka Yu. V., Mikhnev V. V. Numerical calculation of the electric field in an electroplating bath with bipolar electrodes // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2006. Vol. 40, N. 3. P. 305–310.
10. Litovka Yu. V., Elizarov A. M. A method for calculating the thickness of a coating on a complex-shaped electrode // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2003. Vol. 37. P. 88–91.
11. Оборудование цехов электрохимических покрытий. Справочник / Под ред. П. М. Вячеславова. Л.: Машиностроение, 1987. 310 с.
12. Marenkova E. A., Shamshurin A. I., Kuznetsov S. A. Electrodeposition of tantalum coatings for corrosion protection of nitinol articles // Applied Electrochemistry and Corrosion Protection of Metals. 2015. Vol. 88. P. 398–406.
13. Vinokurov E. G., Meshalkin V. P., Vasilenko E. A., Nemyatullina Kh. A., Burukhina T. F., Bondar V. V. System analysis of the efficiency and competitiveness of chroming technologies // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. P. 730–738.
14. Frenzel I., Holdik H., Barmashenko V., Stamatialis D. F., Wessling M. Electrochemical reduction of dilute chromate solutions on carbon felt electrodes // Journal of Applied Electrochemistry. 2006. Vol. 36. P. 323–332.
15. Виноградов О. С., Виноградова Н. А., Завалин В. В., Ульянов А. А. Способы повышения техноферной безопасности электрохимических производств // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 3 (55). С. 154–158.
16. Дасоян М. А., Пальмская И. Я. Оборудование цехов электрохимических покрытий. Л.: Машиностроение, 1979. 287 с.
17. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии. Справочное издание / Под ред. Б. В. Строкана, А. М. Сухотина. Л.: Химия, 1987. 280 с.
18. Виноградов С. С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчет производства, нормирование. М.: Глобус, 2005. 240 с.
19. Грилихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.
20. Румянцев Е. М., Давыдов А. Д. Технология электрохимической обработки металлов. М.: Высшая школа, 1984. 159 с.

Automated Control System for the Process of Electroplating in a Bath with a Non-Conductive of Electric Current Screen

I. Yu. Pchelintseva, irina_yu_10@mail.ru, Yu. V. Litovka, Professor, polychem@list.ru, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation

Corresponding author: Litovka Yury V., Dr. Sci., Professor, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation, e-mail: polychem@list.ru

Accepted on 03 December, 2021

Abstract

The article has developed an automated control system for the electroplating process, which has a two-level architecture. At the lower level, the technological parameters of each bath are controlled: temperature stabilization and electrolyte level in the bath; stabilization or software control of electric current. At the upper level, the problem of calculating the optimal configuration of a non-conductive of electric current perforated screen is solved, providing a minimum value of the unevenness of the coating. For this, a nonlinear mathematical model of the galvanic process in a bath with a perforated screen is developed which differs from the known ones by adding boundary conditions on a non-conductive screen. It is noted that the nonlinearities contain the equations of the model describing the boundary conditions near the anode and cathode of the galvanic bath. Therefore, a numerical method for solving the model equations is developed, which is distinguished by the implementation of Newton's method in Maxima (the mathematical package) through input/output redirection. The article describes an algorithm for working with a mathematical package, a feature of which is the preparation of package commands in a text format and parsing the results of calculations also from a text file. The applied numerical method for solving the system of model equations has a quadratic convergence rate which indicates its effectiveness on a large grid, for example, of 900 nodes. Numerous computational experiments is shown a tenfold gain in time compared to the traditional iterative method described in well-known articles.

For the first time, the problem of discrete optimization was posed and solved for the developed automated control system for the electroplating process. A feature of the formulation of this problem are restrictions that allow only a complete enumeration of possible values of the varied parameters, the volume of which is not large. Therefore, a sequential algorithm for solving the optimization problem is used. The combinations of possible values of the varied parameters and criterion values are given, and the time for solving the optimization problem is analyzed.

Keywords: automated control system, electroplating process, criterion of uneven, mathematical model, Newton's method, optimization, exhaustive search method

For citation:

Pchelintseva I. Yu., Litovka Yu. V. Automated Control System for the Process of Electroplating in a Bath with a Non-Conductive of Electric Current Screen, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 188–196.

DOI: 10.17587/mau.23.188-196

References

1. Kadaner L. I. The uniformity of electroplated coatings, Kharkov, Kharkov State University Publishing House, 1960, 414 p. (in Russian).
2. Pchelintseva I. Yu., Pchelintsev A. N., Litovka Yu. V. Modeling of Metal Distribution when Coating Flat Metal Plates in Electroplating Baths, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2021, vol. 34, no. 2, e2830, 10 p.
3. Shulgin V. G. Current distribution and increased uniformity of metal deposition in electroplating and electroplating, Leningrad, LHSTP, 1983. 31 p. (in Russian).
4. Pchelintseva I. Yu. On checking the adequacy of the electric field model in an electroplating bath with a flat non-conductive screen, *XXX International Scientific and Technical Conference "Modern Technologies in Problems of Control, Automation and Information Processing"*. Alushta, 2021, pp. 75–76 (in Russian).
5. Kudryavtsev N. T. Electrolytic coatings with metals, Moscow, Khimiya Publ., 1979, 352 p. (in Russian).
6. Demidovich B. P., Maron I. A. Computational mathematics, Moscow, Mir Publishers, 1981, 688 p.
7. Maxima computer algebra system, available at: <http://maxima.sourceforge.net/> (date of access: November 9, 2021).
8. Dutov A. V., Sypalo K. I., Solovjev D. S., Litovka Y. V., Solovjeva I. A., Nesterov V. A. Search for the Optimal Control over Current Regimes in Electroplating Processes with Multi Anodes at a Diversified Assortment of Treated Articles, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 1, pp. 75–85.
9. Litovka Yu. V., Mikheev V. V. Numerical Calculation of the Electric Field in an Electroplating Bath with Bipolar Electrodes, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, vol. 40, no. 3, pp. 305–310.
10. Litovka Yu. V., Elizarov A. M. A Method for Calculating the Thickness of a Coating on a Complex-Shaped Electrode, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2003, vol. 37, pp. 88–91.
11. Vyacheslavov P. M. ed. An equipment for workshops of electrochemical coatings. Handbook, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1987, 310 p. (in Russian).
12. Marenkova E. A., Shamshurin A. I., Kuznetsov S. A. Electrodeposition of Tantalum Coatings for Corrosion Protection of Nitinol Articles, *Applied Electrochemistry and Corrosion Protection of Metals*, 2015, vol. 88, pp. 398–406.
13. Vinokurov E. G., Meshalkin V. P., Vasilenko E. A., Nevmyatullina Kh. A., Burukhina T. F., Bondar V. V. System Analysis of the Efficiency and Competitiveness of Chroming Technologies, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, pp. 730–738.
14. Frenzel I., Holdik H., Barmashenko V., Stamatialis D. F., Wessling M. Electrochemical Reduction of Dilute Chromate Solutions on Carbon Felt Electrodes, *Journal of Applied Electrochemistry*, 2006, vol. 36, pp. 323–332.
15. Vinogradov O. S., Vinogradova N. A., Zavalin V. V., Ulyanov A. A. The Methods of Increasing the Technosphere Safety of Electrochemical Production, *XXI century: results of the past and problems of the present plus*, 2021, vol. 10, no 3 (55), pp. 154–158 (in Russian).
16. Dasoyan M. A., Palmskaya I. Ya. Equipment for shops of electrochemical coatings, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1979, 287 p. (in Russian).
17. Strokan B. V., Sukhotin A. M. ed. A corrosion resistance of chemical production equipment: Methods for protecting equipment from corrosion. Reference edition, Leningrad, Khimiya Publ., 1987 p. (in Russian).
18. Vinogradov S. S. Organization of galvanic production. Equipment, production calculation, rationing, Moscow, Globus Publ., 2005, 240 pp. (in Russian).
19. Grilikhes S. Ya. Degreasing, etching and polishing of metals, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1983, 101 pp. (in Russian).
20. Rummyantsev E. M., Davydov A. D. Technology of electrochemical treatment of metals, Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1984, 159 pp. (in Russian).