

Д. С. Соловьев, канд. техн. наук, solovjevdenis@mail.ru, **В. З. Као**, аспирант, hanam17389@gmail.com,
Ю. В. Литовка, д-р техн. наук, проф., polychem@list.ru,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

Оптимальное управление технологическим процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами

Поставлена задача оптимального управления гальваническим процессом в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами по критерию неравномерности распределения толщины покрытия. Для поставленной задачи разработана математическая модель, учитывающая изменение концентрации компонентов электролита. Описан алгоритм решения поставленной задачи, который базируется на модификации прямого метода Рунца. Рассмотрен пример гальванического процесса хромирования детали V-образной формы, для которой найдены функции изменения анодного напряжения в виде полиномов различных степеней.

Ключевые слова: оптимальное управление, объект управления, математическая модель, дополнительные катоды, биполярные электроды, модифицированный метод Рунца, гальванический процесс, неравномерность толщины покрытия, концентрация компонентов электролита

Введение

Одним из эффективных методов защиты деталей от коррозии являются гальванические покрытия, используемые также для придания поверхности деталей специальных свойств: твердости, износостойкости, блеска, прочности сцепления покрытий с основой, пористости, декоративности [1]. За время нанесения гальванического покрытия состав электролита подвергается изменению в результате следующих внешних и внутренних воздействий [2]: унос компонентов электролита вместе с обработанными деталями; расходование компонентов при электрохимических и химических реакциях; испарение растворителя в составе воды; разбавление электролита водой, поступающей с деталями, полученными для обработки. Использование растворимого или нерастворимого анода также оказывает влияние на изменение состава электролита. Выход анодного и катодного тока с учетом текущей концентрации компонентов тоже оказывает влияние на скорость ее изменения при использовании как растворимого анода (например, в процессах цинкования в щелочном электролите или меднения в аммиачных электролитах), так и нерастворимого анода (например, в процессах хромирования в стандартном электролите). В связи с этим требуется периодическое пополнение убыли компонентов путем их непосредственного введения в электролит в необходимых количествах. Данная операция используется во всех технологических процессах на предприятиях.

Для осуществления динамического анализа содержания компонентов электролита в целях их автоматического дозирования существуют специальные устройства [3]. Однако стоимость таких устройств значительна, а применимость возможна только для некоторых видов компонентов. При этом проведение процессов при постоянном напряжении в течение всего периода до корректировки электро-

лита приводит к существенным негативным результатам, таким как ухудшение качественных показателей гальванических покрытий и невыполнение ограничения на минимальную толщину покрытия и, следовательно, к производственному браку. Альтернативой использованию подобных устройств может служить подход, описанный в работе [4] и заключающийся в управлении температурой электролита для повышения плотности тока, а следовательно, и толщины гальванического покрытия. Незначительный диапазон регламентированного изменения температуры электролита делает данный способ малоэффективным. Другой подход заключается в управлении параметрами импульсного тока [5] (частотой и амплитудой), подаваемого на ванну, с целью компенсировать потери в качестве гальванического покрытия с точки зрения достижения заданной толщины покрытия в результате изменения концентрации компонентов электролита. При этом использование источников питания, поддерживающих возможность задания импульсных режимов нанесения покрытия, является достаточно дорогостоящим, что заметно снижает распространенность данного подхода.

В свою очередь, для гальванического процесса в ванне с дополнительными катодами, используемыми для уменьшения толщины покрытия у краев изделия, и биполярными электродами, размещаемыми в сторону требующего усиления толщины покрытия углубления детали, описанного в работе [6], расходование компонентов электролита в процессе электрохимических и химических реакций выполняется не только на поверхностях основных деталей, но и на поверхностях дополнительных катодов и биполярных электродах, смена которых осуществляется при поступлении на покрытие детали новой геометрической формы.

В данной статье рассматриваются постановка и решение задачи оптимального управления техно-

логическим процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами с учетом изменения концентрации компонентов в составе электролита за время нанесения.

Гальванический процесс с дополнительными катодами и биполярными электродами как объект управления

При учете изменения концентрации компонентов в составе электролита за время нанесения покрытия гальванический процесс целесообразно рассматривать как двухпериодический. Малым периодом (T_1) является время, требуемое для нанесения покрытия на деталь, значение которого находится в диапазоне 0,5...6 ч, большим периодом (T_2) — диапазон работы ванны на одном электролите с последующей корректировкой его состава или полной заменой. Большой период зависит от типа покрытия и площади покрываемого изделия, продолжительность большого периода составляет от двух недель до двух месяцев.

Отличным от рассмотренных во введении вариантом воздействия на распределение толщины покрытия в условиях изменения компонентов электролита является анодное напряжение [7]. Почти все современные источники питания (например, "Пульсар Про", "Flex Kraft") снабжены возможностью программного задания данного управляющего воздействия, что делает его наиболее перспективным способом влияния на качество гальванического покрытия. Таким образом, представляется целесообразным компенсирование изменения концентрации электролита с использованием напряжения, подаваемого на ванну.

Для выбора оптимального, с точки зрения неравномерности толщины получаемого покрытия, режима электролиза в такой гальванической ванне необходимо поставить задачу оптимального управления предлагаемым процессом. В связи с этим представим данный технологический процесс как объект управления, на который оказывают влияние следующие воздействия:

1) входные воздействия — геометрические характеристики деталей (размеры, форма и площади поверхностей), их число и размещение в пространстве-ванне ($S_a, S_k, S_{k_add_ii}, S_{be_jj}$); уровень электролита (L); длительность гальванического процесса (T_1);

2) выходные управляемые воздействия — значения плотности тока на поверхности катода (i_k);

3) внешние возмущения — состояние покрываемой поверхности (K); вынос электролита в процессе промывки ($У$); концентрация посторонних ионов в электролите ($Л$);

4) управляющие воздействия — значение напряжения между анодом и катодом (U_a);

5) внутренние переменные состояния — концентрация основных компонентов электролита (C_j),

катодный выход по току (η), температура электролита (t).

Несмотря на то, что перечисленные возмущающие воздействия имеют стохастическую природу, их влияние нужно учитывать при управлении рассматриваемым гальваническим процессом. Для регулирования концентрации посторонних ионов ($Л$) применяются цифровые ареометры, уноса электролита ($У$) — устройства светозвуковой сигнализации верхнего и нижнего из заданных уровней электролита.

Ввиду того, что покрываемая деталь может иметь сложную геометрическую форму, а в процессе электролиза могут применяться электролиты с низкой рассеивающей способностью, плотность катодного тока i_k зависит от пространственных координат, и поэтому рассматриваемый гальванический процесс представляет собой объект с распределенными координатами. В свою очередь, за время нанесения покрытия происходит изменение внутренних переменных состояний, следовательно, изменяется плотность катодного тока, поэтому имеем нестационарный режим электролиза.

Постановка задачи оптимального управления гальваническим процессом с дополнительными катодами и биполярными электродами

Для оценки неравномерности распределения покрытия на поверхности изделия, полученной за время T_1 , используем отношение среднего значения толщины к минимальному, предложенное Л. И. Каданером:

$$R(T_1) = \frac{\bar{\delta}}{\delta_{\min}}, \quad (1)$$

где δ_{\min} , $\bar{\delta}$ — минимальная и средняя толщина покрытия:

$$\delta_{\min} = \min_{\delta \in S^k} (\delta(x, y, z, T_1)), \quad (2)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{\|S^k\|} \int_{S^k} \delta(x, y, z, T_1) dS^k, \quad (3)$$

где $\|S^k\|$ — площадь поверхности катода.

Тогда математическая постановка задачи оптимального управления рассматриваемым процессом может быть сформулирована следующим образом.

Для каждого малого периода T_1 найти функцию изменения анодного напряжения $U_a(\tau)$ при заданной форме детали-анода S_a для детали-катода S_k с дополнительными катодами $S_{k_add_ii}$ и биполярными электродами S_{be_jj} , завешенными в гальванической ванне, и значениях текущей концентрации компонентов электролита $C_j(\tau)$, доставляющего минимум критерию неравномерности распределения слоя покрытия:

$$R(T_1) = \frac{1}{\|S^k\|} \frac{\int \delta(x, y, z, T_1) dS^k}{\min_{\delta \in S^k} (\delta(x, y, z, T_1))}, \quad (4)$$

с учетом ограничения на минимальную толщину покрытия, которая должна быть обеспечена в любой точке поверхности детали:

$$\delta_{\min} \geq \delta_{\text{зад}}, \quad (5)$$

где $\delta_{\text{зад}}$ — заданная по регламенту технологического процесса и условиям эксплуатации изделия толщина покрытия.

Для связи критерия неравномерности покрытия (4) с управляющими воздействиями требуется составить математическую модель динамики с распределенными координатами для рассматриваемого технологического процесса.

Математическая модель гальванического процесса с дополнительными катодами и биполярными электродами

Перед составлением уравнений математической модели технологического процесса введем некоторые допущения и обозначения:

1) применяется декартова система координат с центром в нижнем углу внутренней области гальванической ванны, представляющей собой параллелепипед с длиной, шириной и высотой X , Y и Z соответственно;

2) существование устройств для крепления анода, катодов и биполярных электродов не учитывается;

3) на поверхности изделия-катода отсутствует шероховатость ($K = 0$).

Толщина покрытия в точке катода с координатами x , y , z определяется согласно закону Фарадея:

$$\delta(x, y, z, T_1) = \frac{\Theta}{\rho} \eta(x, y, z, \tau) i_k(x, y, z, \tau) T_1, \quad (6)$$

где Θ — электрохимический эквивалент металла покрытия; ρ — плотность металла покрытия; η — катодный выход металла по току; i_k — катодная плотность тока.

Катодный выход металла по току зависит от температуры, катодной плотности тока и концентрации компонентов электролита:

$$\eta(x, y, z, \tau) = \eta(t, i_k(x, y, z, \tau), C_1(\tau), \dots, C_j(\tau), \dots, C_n(\tau)), \quad (7)$$

где t — температура электролита; n — число компонентов электролита; τ — произвольный момент времени.

Для определения плотности тока используется закон Ома в дифференциальной форме:

$$i_a(x, y, z, \tau) = \chi \text{grad} \varphi(x, y, z, \tau), \quad (8)$$

$$i_k(x, y, z, \tau) = -\chi \text{grad} \varphi(x, y, z, \tau), \quad (9)$$

где χ — электропроводность электролита; $\varphi(x, y, z, \tau)$ — потенциал электрического поля в пространстве гальванической ванны в точке с пространственными координатами (x, y, z) в момент времени τ .

Отыскание распределения потенциала φ в объеме электролита возможно с использованием уравнения в частных производных параболического типа:

$$\frac{c^2}{4\pi\chi\mu} \left(\frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \tau}, \quad (10)$$

где c — скорость света в вакууме; μ — магнитная проницаемость электролита.

Краевое условие на границе электролит—изоляция (стенка гальванической ванны) описывается уравнением

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial \rho} \Big|_{S_{\text{и}}} = 0, \quad (11)$$

где ρ — нормаль к поверхности изолятора; $S_{\text{и}}$ — поверхность изолятора.

Краевое условие на аноде описывается уравнением

$$\varphi(x, y, z, \tau) + F_a(i_a(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_a} = U_a(\tau), \quad (12)$$

при этом на значение напряжения накладывается следующее условие:

$$U_{\min} \leq U_a(\tau) \leq U_{\max}, \quad (13)$$

где F_a — функции поляризации на аноде; i_a — плотность анодного тока; U_{\min} — значение напряжения, требуемое для обеспечения минимально допустимой плотности тока на катоде; U_{\max} — максимальное значение напряжения, поддерживаемое источником питания.

Краевое условие на основном катоде, дополнительных катодах и биполярных электродах описываются следующими уравнениями:

$$\varphi(x, y, z, \tau) - F_k(i_k(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_k} = 0, \quad (14)$$

$$\varphi(x, y, z, \tau) - F_k(i_k(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_{k_add_ii}} = 0, \quad (15)$$

$$\varphi(x, y, z, \tau) + F_{be}(i(x, y, z, \tau)) \Big|_{S_{be_jj}} = U_{be_jj}, \quad (16)$$

где F_k , F_{be} — функции поляризации на катодах и биполярных электродах; ii, jj, II, JJ — номер и число дополнительных катодов и биполярных электродов соответственно; U_{be_jj} — напряжение на биполярных электродах.

Изменение концентрации j -го компонента электролита за длительность $\tau \in [0, T_2]$ нанесения покрытия описывается уравнением

$$\frac{dC_j(\tau)}{d\tau} = f_j(t, i_{k\text{cp}}(\tau), C_1(\tau), C_2(\tau), \dots, C_n(\tau)) \quad (17)$$

с начальным условием

$$C_j(\tau) = C_{0j} \quad (18)$$

и ограничением

$$C_{j\min} \leq C_j(\tau) \leq C_{j\max}, \quad (19)$$

где C_{0j} — концентрация j -го компонента в свежем приготовленном электролите; $C_{j\min}$, $C_{j\max}$ — допус-

тимые пределы концентрации j -го компонента согласно требованиям к электролиту; i_{kcp} — средняя катодная плотность.

Конкретный вид правой части уравнения (17) зависит, в том числе, от использования растворимого или нерастворимого анода. При использовании растворимого анода скорость уменьшения концентрации компонентов электролита будет компенсироваться поступлением ионов с анода. Использование нерастворимого анода увеличивает скорость уменьшения компонентов электролита, участвующих в электрохимических реакциях, из-за отсутствия их компенсации за счет растворения анода.

Следует заметить, что дополнительный унос частиц электролита с обработанными деталями также влияет на изменение концентрации и определяется согласно выражению

$$C_{ji} = C_{jd} \frac{1 - y_y S_k \rho_\Omega}{M}, \quad (20)$$

где C_{ji} — концентрация j -го компонента после извлечения обработанных деталей из ванны; C_{jd} — концентрация j -го компонента перед извлечением обработанных деталей из ванны; y_y — удельный унос электролита на поверхности деталей, зависящий от типа загрузки деталей; ρ_Ω — плотность электролита; M — масса электролита.

Ввиду того, что основная деталь-катод и дополнительные катоды соединяются последовательно, средняя катодная плотность i_{kcp} , содержащаяся в правой части уравнения (17), определяется в зависимости от распределения тока по поверхности детали-катада и дополнительных катодов:

$$i_{kcp}(\tau) = \frac{1}{\|S_k\|} \int_{S_k} i_k(x, y, z, \tau) S_k + \sum_{ii=1}^{II} \frac{1}{\|S_{k_add_ii}\|} \int_{S_{k_add_ii}} i_{k_add_ii}(x, y, z, \tau) S_{k_add_ii}. \quad (21)$$

Полученные уравнения (6)—(21) позволяют связать управляющее воздействие, задаваемое посредством краевого условия (12), с критерием (4) в целях реализации оптимального управления предлагаемым технологическим процессом с дополнительными катодами и биполярными электродами с учетом изменения концентрации компонентов в составе электролита. Для поиска оптимальных управляющих воздействий с точки зрения неравномерности распределения толщины покрытия необходимо разработать алгоритм решения поставленной задачи.

Алгоритм решения задачи оптимального управления гальваническим процессом с дополнительными катодами и биполярными электродами

Поставленная задача оптимального управления гальваническим процессом с дополнительными катодами и биполярными электродами относится к вариационной. Для ее решения целесообразно ис-

пользование прямого метод Ритца, который позволяет получить приближенное решение с заданной точностью [8]. Традиционное применение прямого метода Ритца предполагает отсутствие ограничений вида (13) на поиск функции, задающей управляющее воздействие, поэтому необходимо использовать модификацию данного метода.

Согласно идее классического метода Ритца значение функционала рассматривается не на произвольных допустимых кривых данной вариационной задачи, а лишь на всевозможных линейных комбинациях:

$$U_a(\tau) = \sum_{q=0}^Q b_q W_q(\tau), \quad (22)$$

где Q — степень управляющего полинома; b_q — постоянные коэффициенты; $W_q(\tau)$ — известные функции.

В качестве функций $W_q(\tau)$ предлагается использовать степенные функции, т.е. вид управляющего воздействия ищется в классе полиномов вида

$$U_a(\tau) = b_0 + b_1\tau + b_1\tau^2 + \dots + b_q\tau^q + \dots + b_Q\tau^Q. \quad (23)$$

Для определения степени Q управляющего полинома (23) предлагается сравнивать относительные уточнения значений критериев неравномерности вида (4), полученных при переходе к полиному более высокой степени:

$$\Delta R_{q+1} = \frac{|R_q - R_{1+q}|}{R_{q+1}} 100 \%, \quad (24)$$

пока выполняется условие

$$\Delta R_{q+1} \leq \varepsilon, \quad (25)$$

где ε — заранее заданная точность, при которой дальнейшее увеличение степени полинома нецелесообразно, и задача считается решенной.

В связи с этим преобразуем составленную математическую модель к квазистатическому виду, для этого разобьем длительность $[0, T_1]$ на отрезки $[\tau_0 = 0, \tau_1], [\tau_1, \tau_2], \dots, [\tau_r, \tau_{r+1}], [\tau_{r^{zad}-1}, \tau_{r^{zad}} = T_1]$, на каждом из которых напряжение на аноде принимается постоянным и равным значению на левом конце отрезка, т.е. имеем:

$$U_a(\tau) = U_a(\tau_r) = \text{const}, \quad \tau \in [\tau_r, \tau_{r+1}], \quad r = 0, 1, \dots, r^{zad}, \quad (26)$$

где r^{zad} — заданное число отрезков.

Тогда последовательность вычислительных операций для решения системы уравнений (6)—(21) математической модели будет следующей.

На отрезке $[\tau_0, \tau_1]$ для анода с заданными коэффициентами $b_0, \dots, b_q, \dots, b_Q$ и степенью управляющего полинома Q формируем $U_a(\tau)$, далее при $\tau = \tau_0$ находим значение $U_a(\tau_0)$, а затем с этим краевым условием (12) решаем уравнение (10). По уравнению (9) находим распределение плотности тока по поверхности катода, а по уравнению (21) — сред-

нее значение катодной плотности тока. При этом интегрируем систему дифференциальных уравнений (17) с найденным значением средней плотности тока. Далее для $\tau = \tau_1$ находим значение $U_a(\tau_1)$ и повторяем описанную выше процедуру до выполнения ограничения (5). В свою очередь, для рассмотренной системы уравнений проводится замена производных конечно-разностным шаблоном и применяется итерационная процедура определения потенциала в пространстве гальванической ванны [9]. Алгоритм определения функции поляризации на биполярных электродах рассмотрен в работе [10] и основывается на использовании значения линейного падения потенциала, установившегося на месте точки с наиболее удаленными от основного катода координатами по длине биполярного электрода.

В поисковом алгоритме решения задачи оптимального управления после каждого шага по коэффициенту b_q проверяется условие (13). Если оно не выполняется, осуществляется возврат к предыдущей точке с присваиванием штрафа управляющему полиному. Как только в момент времени τ перестает выполняться условие (13), дальнейшее управление принимается равным U_{\max} или U_{\min} , в зависимости от того, какое ограничение нарушено.

Пример решения задачи оптимального управления гальваническим процессом с дополнительными катодами и биполярными электродами

Рассмотрим пример решения поставленной задачи для нанесения хромового покрытия на изделие-катод V -образной формы. Размеры гальванической ванны составляют $150 \times 200 \times 120$ мм ($X \times Y \times Z$), уровень электролита $L = 90$ мм. В ванне расположены прямоугольный анод размером 50×50 мм; основная деталь-катод размером 40×40 мм; дополнительные катоды размерами 20×70 мм; биполярный электрод размерами 20×20 мм. Расположение анода, изделия-катада, дополнительных катодов и биполярного электрода представлено на рис. 1. Состав стандартного электролита хромирования, г/л: хромовый ангидрид — 200, серная кислота — 2. Температура электролита $t = 50$ °С.

В работе [11] функция катодного выхода по току (7) имеет следующее аналитическое выражение:

$$\eta(\tau) = \frac{5,43 - 0,036t - 0,0005t^2 - 0,002657 C_1(\tau) + 2,054 \ln(0,001 i_{kcp}(\tau)) + 0,0575 C_2(\tau)}{100 - 4,59 C_2(\tau) + 0,074 C_2^2(\tau)},$$

где C_1, C_2 — концентрация хромового ангидрида и серной кислоты.

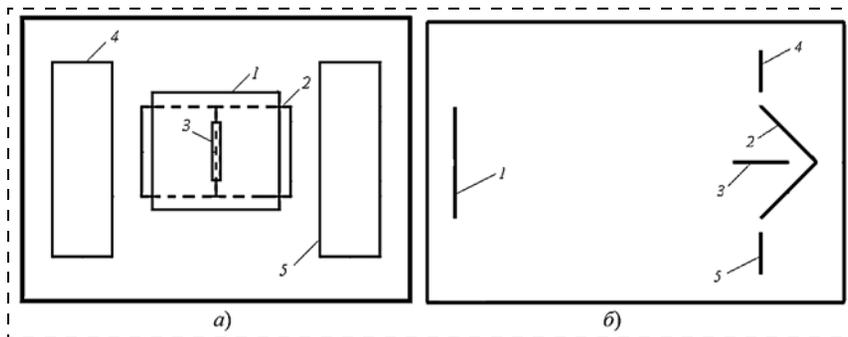


Рис. 1. Схема гальванической ванны с используемыми электродами: а — вид спереди ванны на плоскости XOZ ; б — вид сверху ванны на плоскости XOZ ; 1 — анод; 2 — основной катод; 3 — биполярный электрод; 4, 5 — дополнительные катоды

Уравнение (17) для описания изменения концентрации хромового ангидрида примет следующий вид:

$$\frac{dC_1(\tau)}{d\tau} = - \frac{\Theta \eta(\tau) \rho_{\Theta} i_{kcp}(\tau)}{M \mu},$$

где Θ — электрохимический эквивалент хрома; μ — молекулярная масса хромового ангидрида.

Значение анодной поляризации не учитывается, так как в гальваническом процессе хромирования используется нерастворимый свинцовый анод. Функция катодной поляризации на основном изделии-катоде и на дополнительных катодах определяется следующим образом:

$$F_k(i_k(x, y, z, \tau)) = \begin{cases} -0,357 i_k(x, y, z, \tau) - 0,958 & \text{при } F_k \in (-\infty, -1); \\ 0,866 i_k(x, y, z, \tau) - 1,0347 & \text{при } F_k \in (-1, -0,67); \\ -0,325 i_k(x, y, z, \tau) - 0,5337 & \text{при } F_k \in (-0,67, \infty). \end{cases}$$

В результате решения поставленной задачи оптимального управления гальваническим процессом хромирования детали V -образной формы при заданных условиях и ограничениях на заданную толщину гальванического покрытия $\delta_{зад} = 10$ мкм и на минимальное и максимальное значения напряжения $U_{\min} = 1$ В и $U_{\max} = 12$ В были получены функции изменения напряжения на аноде при различных степенях полиномов и значения критерия неравномерности при заданной точности решения задачи $\varepsilon = 0,1$ % и числе отрезков $r^{зад} = 6$, приведенные в таблице.

Результат решения задачи оптимального управления

Степень полинома, Q	Вид управляющих напряжений, $U_a, В, \tau, ч$	Значение критерия неравномерности, R	Относительное уточнение критерия, $\Delta R, \%$
0	$U_{a0}(\tau) = 4,33$	1,55679	
1	$U_{a1}(\tau) = 4,33 + 0,092\tau$	1,55567	0,2021
2	$U_{a2}(\tau) = 4,33 + 0,051\tau + 0,028\tau^2$	1,55561	0,0072

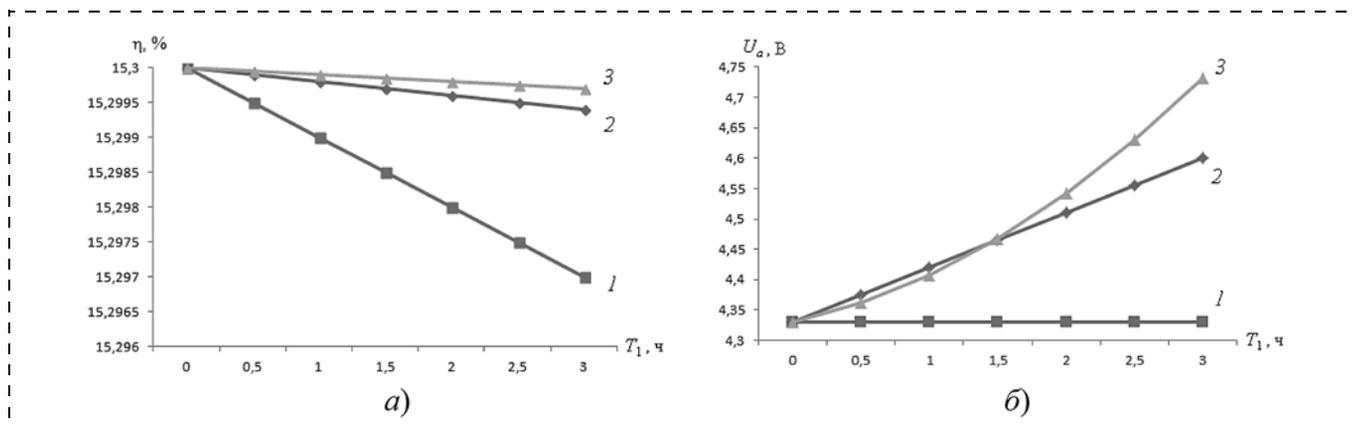


Рис. 2. Изменение катодного выхода по току (а) и напряжения на аноде (б) при различных степенях полиномов: 1 — полином нулевой степени; 2 — полином первой степени; 3 — полином второй степени

На рис. 2, а демонстрируется изменение катодного выхода по току за счет убыли концентрации хромового ангидрида и компенсирующего воздействия в виде анодного напряжения в форме полиномов различных степеней (рис. 2, б).

Из таблицы видно, что при заданной точности решения задачи оптимального управления $\varepsilon = 0,1\%$ переход от полинома нулевой степени к полиному первой степени целесообразен, так как дальнейшее увеличение степени полинома дает прирост точности $0,0072\%$, что меньше ε . В связи с этим при решении задачи оптимального управления процессом гальванического покрытия в гальванической ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами с учетом изменения концентрации компонентов электролита, в данном случае, зависимость изменения анодного напряжения от времени целесообразно отыскивать среди полиномов первой степени, так как повышение степени ($Q > 1$) не дает существенного прироста критерия неравномерности покрытия, однако влечет за собой значительное увеличение длительности оптимизационного поиска.

Заключение

При нанесении гальванических покрытий в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами необходимо учитывать изменение компонентов состава электролита. Для этой цели поставлена задача поиска функции анодного напряжения в целях учета изменения состава электролита для оптимального управления гальваническим процессом по критерию неравномерности толщины покрытия. Доказано, что изменение анодного напряжения описывается полиномами первой степени, при этом полученные функции изменения напряжения на аноде для рассматриваемого примера не сильно зависят от времени, так как концентрация хромового ангидрида уменьшается незначи-

тельно за время малого периода T_1 протекания гальванического процесса. В рассматриваемом примере критерий неравномерности после решения поставленной задачи оптимального управления улучшился на $0,202\%$ по сравнению со стационарной задачей. Однако при анализе большого периода T_2 ведение процесса при постоянном напряжении может привести к существенным потерям в ожидаемом распределении толщины покрытия.

Список литературы

1. Герасименко А. А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник: В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А. А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. 688 с.
2. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. М.: Высшая школа, 1975. 560 с.
3. А. с. № 717158 СССР, МКИ С 25 D 21/12. Способ автоматического регулирования состава электролита и устройство для осуществления этого способа / Н. В. Засько, В. И. Захаров. 1980. Бюл. № 7.
4. Tuaweri T. J., Adigio E. M., Jombo P. P. A Study of process parameters for zinc electrodeposition from a sulphate bath // International Journal of Engineering Science Invention. 2013. Vol. 2 (8). P. 17–24.
5. Khorasani S., Motieifar A., Rashidian B. Optimal pulse shapes for periodic reverse electroplating // Iranian Journal of Science & Transaction B. 2003. Vol. 27, No. B4. P. 701–711.
6. Литовка Ю. В., Као В. З. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22. № 1. С. 68–74.
7. Maksimović M. D., Mišković-Stanković V. B., Krstajić N. V. The effect of applied voltage on the cathodic electrodeposition process // Surface and Coatings Technology. 1986. Vol. 27, Iss. 1. P. 89–94.
8. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М.: Химия, 1975. 576 с.
9. Гнусин Н. П., Поддубный Н. П., Маслий А. И. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах. Новосибирск: Наука, 1972. 276 с.
10. Braun T. M., Schwartz D. T. Localized electrodeposition and patterning using bipolar electrochemistry // J. Electrochem. Soc. 2015. Vol. 162, Iss. 4. P. 180–185.
11. Литовка Ю. В. Математическое описание изменения концентрации электролита в гальванической ванне // Журнал прикладной химии. 1997. Т. 70, Вып. 10. С. 1631–1637.

Optimal Control for the Electroplating Process Based on the Supplementary Cathode and Bipolar Electrode

D. S. Solovjev, solovjevdenis@mail.ru✉, V. Z. Cao, hanam17389@gmail.com,
Yu. V. Litovka, polychem@list.ru,
Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation

Corresponding author: Solovjev Denis S., Ph. D, Assistant,
Department of Information Systems and Information Security,
Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation,
e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Received on December 29, 2015

Accepted on April 11, 2016

The article describes the main approaches (including technical parameters and equipment) to taking into account the changes and correction of the electrolyte components of the bath with the supplementary cathodes and bipolar electrodes in the electroplating processing of products. A voltage change on the anode is proposed as a manipulated variable for the galvanic process as a control object for the electroplating bath. The task of optimal control of the electroplating process by the criterion of distribution of uniformity on the surface of the coating thickness of the product is set. A mathematical model is formulated of the dynamics of the distributed coordinates for the contact criterion of the uniformity coverage with the control action in the form of changes of the anode voltage, taking into account the structural and technological assumptions. This is based on the Faraday's law, Ohm's law of the differential form and a partial differential equation of a parabolic type describing the distribution built in the amount of the electroplating bath. An algorithm was invented for solving the equations of the mathematical model of the electroplating process, which considers the task as a quasi-static one and based on the modifications of the direct Ritz method for the search function of the anode voltage in the class of the polynomials of various degrees. A comparison is proposed of the relative values of the refinement criteria of the unevenness produced during the transition to a higher polynomial degree in order to obtain the required accuracy solutions for determination of the degree of the polynomial control. An example is described of solving the problem of chrome electroplating of V-shape parts in the electroplating bath with two side cathodes and one bipolar electrode. This example describes the function of the anode voltage in the form of the polynomials of the zero, first and second degrees. A rational solution describing the anode voltage changes as the polynomials of the first degree is shown. The further increase in the degree doesn't give a significant gain in the unevenness of the coverage criterion, however, it ensures a significant increase of the duration of the search optimization. Thus, the obtained feature of the voltage change on the anode does not depend strongly on time, so, the change of the concentration of the electrolyte components is reduced slightly during a short period of coating. However, when analyzing a longer period, the process under a constant stress might lead to significant losses in the expected distribution of the coating thickness.

Keywords: optimal control, control object, mathematical model, supplementary cathodes, bipolar electrodes, modified Ritz method, electroplating process, anode voltage, unevenness of the coating thickness, concentration of the electrolyte components

For citation:

Solovjev D. S., Cao V. Z., Litovka Yu. V. Optimal Control for the Electroplating Process Based on the Supplementary Cathode and Bipolar Electrode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 8, pp. 547—553.

DOI: 10.17587/mau.17.547-553

References

1. Gerasimenko A. A. *Zashhita ot korrozii, starenija i biopovrezhdenij mashin, oborudovanija i sooruzhenij* (Protection from corrosion, aging and biodegradation of machinery, equipment and structures), vol. 1, Moscow, Mashinostroenie, 1987, 688 p. (in Russian).
2. Antropov L. I. *Teoreticheskaja elektrohimiya* (Theoretical electrochemistry), Moscow, Vysshaja shkola, 1975, 560 p. (in Russian).
3. Zas'ko N. V., Zaharov V. I. A.s. № 717158 SSSR, MKI2 S 25 D 21/12. *Sposob avtomaticheskogo regulirovanija sostava jelektrolita i ustrojstvo dlja osushhestvlenija jetogo sposoba* (Method of automatic control of the electrolyte composition and a device for carrying out the method), 1980, Bjul. № 7 (in Russian).
4. Tuaweri T. J., Adigio E. M., Jombo P. P. A Study of process parameters for zinc electrodeposition from a sulphate bath, *International Journal of Engineering Science Invention*, 2013, vol. 2 (8), pp. 17—24.

5. Khorasani S., Motieifar A., Rashidian B. Optimal pulse shapes for periodic reverse electroplating, *Iranian Journal of Science & Transaction B*, 2003, vol. 27, no. B4, pp. 701—711.

6. Litovka Ju. V., Kao V. Z. *Modelirovanie i optimizacija gal'vanicheskoj vanny s dopolnitel'nymi katodami* (Modelling and optimization of the electroplating bath with supplementary cathodes), *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2016, vol. 22, no 1, pp. 68—74 (in Russian).

7. Maksimović M. D., Mišković-Stanković V. B., Krstajić N. V. The effect of applied voltage on the cathodic electrodeposition process, *Surface and Coatings Technology*, 1986, vol. 27, iss. 1, pp. 89—94.

8. Bojarinov A. I., Kafarov V. V. *Metody optimizacii v himicheskoj tehnologii* (Methods for optimization of chemical technology), Moscow, Himija, 1975, 576 p. (in Russian).

9. Gнусин N. P., Poddubnyj N. P., Maslij A. I. *Osnovy teorii raschjota i modelirovanija jelektricheskikh polej v jelektrolitah* (Fundamentals of the theory of calculation and simulation of electric field in electrolytes), Novosibirsk, Nauka, 1972, 276 p. (in Russian).

10. Braun T. M., Schwartz D. T. Localized electrodeposition and patterning using bipolar electrochemistry, *J. Electrochem. Soc.*, 2015, vol. 162, iss. 4, pp. 180—185.

11. Litovka Ju. V. *Matematicheskoe opisanie izmenenija koncentracii jelektrolita v gal'vanicheskoj vanne* (The mathematical description of the change in electrolyte concentration in the electroplating bath), *Zhurnal prikladnoj himii*, 1997, vol. 70, no. 10, pp. 1631—1637 (in Russian).