

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКОВЫХ РЕЖИМОВ В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ

И.В. Милованов

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования», ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: гальванические покрытия; моделирование распределения тока; плотность тока; секционированный анод; управление выпрямителем.

Аннотация: Моделируется гальваническая ванна с секционированным анодом для управления плотностью катодного тока. Сформулирована задача выбора оптимальных токовых режимов процессов нанесения гальванопокрытий. Предлагаются алгоритмы определения последовательностей и продолжительности работы анодных секций.

Обозначения

c – постоянная величина;	t – продолжительность процесса осаждения, с;
D – плотность тока на единице поверхности;	t_a – момент включения анодной площадки «а»;
e – электрохимический эквивалент, мг/кулон;	t_{a+1} – момент выключения анода «а» и включение следующего по порядку;
I – сила тока, А;	η – коэффициент выхода металла по току, %.
q – удельная плотность осаждаемого металла, г/см ² ;	
s – поверхность элементарной ячейки, дм ² ;	

В производственных условиях наибольшее значение для качества наносимого покрытия имеет толщина и равномерность осадка. Толщина покрытия, как правило, не бывает одинаковой по всей поверхности обрабатываемой детали, и все расчетные зависимости позволяют определить только среднее значение толщины. Неодинаковая толщина покрытия является следствием неравномерного распределения тока по покрываемой поверхности. Даже при плоской поверхности катода получаются покрытия с утолщениями на периферии. Получение покрытия с излишней толщиной приводит к потерям электроэнергии, металла. Поэтому получение равномерного покрытия заданной толщины является основной задачей электрохимии.

Процессы нанесения покрытий зависят от многих трудно учитываемых факторов самого разнообразного характера. Наиболее важные из них можно разделить на следующие группы [1]:

а) электрохимические и электрические – электропроводность и состав электролита, величина поляризации и плотности тока, температура, кислотность и вязкость раствора;

б) геометрические факторы – габаритные размеры и формы гальванической ванны электродов, расположение электродов в пространстве ванны;

в) случайные факторы – неоднородность состава и структуры поверхности покрываемого металла, характер ее предварительной обработки и др.

Для управления процессами осаждения покрытий, кроме самого факта влияния названных факторов, необходимо знать непосредственные численные значения переменных состояния технологического процесса, связанных с этими факторами. К переменным состояния процесса, с точки зрения их измерения и выработки управляющих воздействий, относятся: катодная плотность тока d , температура t , уровень электролита h и кислотность раствора pH. Все эти переменные распределены по координатам и времени.

Наиболее важной переменной состояния технологического процесса является катодная плотность тока, которая определяет качество и скорость осадка [2]. При низких плотностях тока покрытие получается крупнокристаллической структуры и возможны участки с непокрытой поверхностью. Высокие катодные плотности тока позволяют получать однородный мелкозернистый осадок. Однако повышение плотности тока возможно только в определенных пределах.

Одним из наиболее распространенных подходов к получению равномерного и качественного покрытия является выбор наилучших параметров и режимов тока гальванической ванны: длительности осаждения покрытия, формы и плотности тока.

Для постановки и решения задачи выбора лучших токовых режимов процесса осаждения покрытий на поверхности деталей рассмотрим основные физико-химические закономерности процесса и запишем основные уравнения, связывающие параметры состояния технологического процесса.

При приложении разности потенциалов к электродам, помещенным в электролит, в последнем будет протекать электрический ток, и на границах электрод – электролит будут протекать электрохимические процессы.

Традиционная схема гальванической ванны показана на рис. 1.

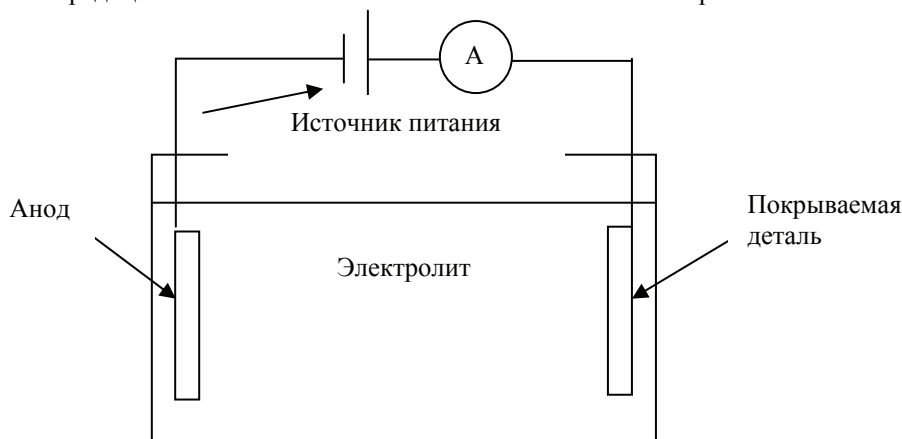


Рис. 1 Схема гальванической ванны

На производстве для оценивания параметров состояния технологических процессов в такой ванне применяют различные конструкции ячеек, позволяющих определить рассеивающую способность электролита, распределение тока и металла. Наиболее популярные конструкции используют элементарную ячейку в виде пластины площадью 1 дм^2 , погружаемую в электролит и подключенную к различного рода измерительным электрическим приборам.

Если использовать в качестве покрываемой детали такую элементарную пластинку, то для нее средняя толщина осадка может быть вычислена по формуле

$$\delta = e\eta it / (qs) = c\eta D(t) . \quad (1)$$

Среднюю толщину покрытия по всей поверхности обрабатываемой детали определим как

$$\delta = \int_0^T c\eta D(s) dt . \quad (2)$$

Управление выходной переменной процесса осаждения покрытия будем производить посредством управления плотностью тока и длительностью процесса.

На управляемую переменную процесса наложим ограничения вида

$$\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max} . \quad (3)$$

При осаждении покрытия ряд входных переменных (объем, электропроводность, концентрация электролита) будем стабилизировать в ходе процесса с помощью локальных систем управления, описание которых дано ниже.

Для реальных деталей, на поверхность которых наносится покрытие в промышленной гальванической ванне, вполне достаточно при варьировании плотностью тока использовать значения, отнесенные к квадратному дециметру. Эта единица измерения плотности тока широко применяется в промышленности.

Перечисленные замечания позволяют сделать вывод о том, что если научиться управлять локальной плотностью тока на одном квадратном дециметре катода, то удастся получать весьма равномерные покрытия на поверхности деталей.

Однако в тех специальных случаях, когда требуются «ювелирные» по равномерности покрытия, следует выбрать размеры единичной ячейки, соизмеримые с требуемыми значениями выходного параметра процесса. Проводимые рассуждения никак не ограничены дм^2 и могут быть использованы для любых размеров единичной ячейки.

Для реализации возможности управления локальной плотностью тока на каждой единичной ячейке будем использовать анод специальной конструкции, представляющий собой набор дециметровых квадратных пластинок, изолированных друг от друга, закрепленных на оправке из токонепроводящего материала. Гальванические ванны с такой конструкцией анода не являются уникальными и находкой автора, используются рядом исследователей и получили название многоанодных.

Нами предлагается более совершенные новые аппаратные средства для коммутации анодов и методика управления локальной плотностью тока на каждом из них.

На рис. 2 показана предлагаемая схема подключения анодов к источнику питания. Как видно из рисунка, аноды расположены в виде квадратной матрицы из пяти строк и пяти столбцов. В каждом узле матрицы размещена элементарная ячейка. Количество пять здесь выбрано только для примера, краткости и наглядности приводимого материала. Цифрами «1» обозначены электронные ключи, коммутирующие строки и столбца, а цифрой «2» - регистры для хранения десятиразрядного управляющего слова и содержащие низкоомные калиброванные резисторы (0,05-0,1 Ом).

Предлагаемая схема подключения анодов позволяет использовать два режима коммутации.

Первый режим основан на том, что в любой момент времени работает только одна элементарная ячейка, т.е. только одна ячейка подключена к положительной клемме источника питания. Такой режим позволяет измерить текущий через выбранную ячейку ток, т.е. локальную плотность тока и установить ее индивидуальное значение. Подключая к источнику питания последовательно все анодные секции, будем получать покрытие с высокой степенью равномерности.

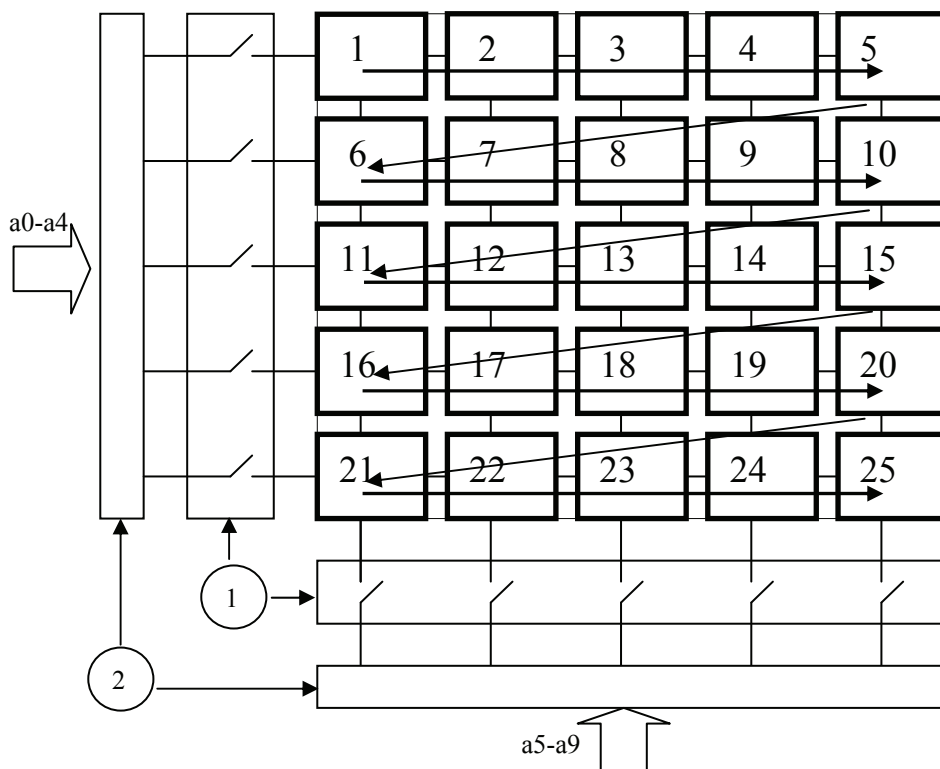


Рис. 2 Концептуальная схема коммутации анодов

При реализации рассматриваемого режима коммутации анодов будем получать на поверхности секционированного анода своеобразное изображение покрываемой детали, представленное плотностью распределения катодного тока.

Качество наносимого покрытия в данном случае в значительной степени зависит от частоты переключения анодных секций. В реальных промышленных условиях анод подключен к источнику питания постоянно при использовании выпрямительных агрегатов на основе селеновых выпрямителей, или каждые $50 \cdot 6 = 300$ мс при использовании современных тиристорных источников питания.

При изучении процессов нанесения покрытий с помощью импульсных источников питания рядом исследователей было убедительно доказано, что для получения качественного покрытия на аноде необходим импульсный ток с периодом 300 мс.

Учитывая изложенное, напрашивается вывод о том, что для получения равномерного осадка при использовании первого режима достаточно поддерживать на каждой анодной секции оптимальную локальную плотность тока каждые 300 мс.

Второй режим использования разработанного коммутатора предполагает одновременное включение всех анодных площадок с максимально допустимой одинаковой для всех плотностью тока.

Для каждой анодной секции предварительно рассчитывается толщина покрытия на соответствующей ей катодной поверхности. На поверхности катода таким расчетом выделяются места с различными значениями толщины покрытия.

Каждая часть катода должна быть покрыта на толщину, определенную условием (3). Выберем продолжительность осаждения покрытия T такой, чтобы на катодной площадке с самой малой расчетной толщиной покрытия была получена минимально допустимая толщина покрытия. При этом на катодных площадках с большей расчетной толщиной покрытия реальная величина осадка будет удовлетворять условию (3) или нет. Для того чтобы на каждой из них толщина покрытия была равной δ_{\min} , вычислим, насколько продолжительность приложения тока к соответствующей анодной секции меньше, чем T .

Найденные значения будем использовать при нанесении покрытия путем прекращения подачи тока к соответствующей анодной секции через время $T \cdot b_a$, где $a = 1, \dots, na$; $na = n1 \cdot n2$: $n1, n2$ – количество строк и столбцов в матрице секционированного анода. Другими словами, каждая из анодных секций будет подключена к источнику питания только на время, необходимое для нанесения минимально допустимой толщины покрытия. После окончания процесса на катодной секции к соответствующему ей аноду приложим напряжение, препятствующее растворению полученного осадка.

С целью упрощения дальнейших рассуждений пронумеруем анодные площадки только одним индексом, как показано на рис. 2. Распределение тока на анодной площадке «а» обозначим через $D_a(s)$, где $a = 1, \dots, na$; s – площадь анодной секции. На соответствующей катодной области за время осаждения покрытия r_a будет получено покрытие $\delta_a(s, r_a)$. За r_a обозначим продолжительность подключения анодной секции с номером «а» к источнику питания. Поскольку анодные секции включены не постоянно, а работают последовательно одна за другой, то

$$r_a = t_{a+1} - t_a. \quad (4)$$

За все время осаждения покрытия t_{na} при выбранном алгоритме включения анодов будет получено распределение толщины покрытия на катодной поверхности [3]

$$\delta(s, r) = \sum_{a=1}^{na} \delta_a(s, r_a) = c \sum_{a=1}^{na} \int_{t_a}^{t_{a+1}} \eta D_a(s) dt. \quad (5)$$

Условием (3) определено изменение толщины покрытия по поверхности, покрываемой детали. Толщина полученного в результате работы всех анодных секций за период времени t_{na} покрытия должна быть не более δ_{\min}

$$p(s) = \delta(s, r) - \delta_{\min} \geq 0. \quad (6)$$

Задачу оптимального управления токовыми режимами в гальванической ванне сформулируем как задачу нахождения интервалов времени r_a , при которых равномерность покрытия поверхности детали будем наилучшей, т.е.

$$P = \int_s p(s) ds = \int_s \left(C \sum_{a=1}^{na} \int_{t_a}^{t_{a+1}} \eta d_a(s) dt - \delta_{\min} \right) ds \rightarrow \min \quad (7)$$

при ограничении (6).

При выборе конструкции секционированного анода размеры секций определены не случайно. Величина в один квадратный дециметр является достаточно малой для точности промышленных процессов нанесения покрытий на поверхности деталей и с целью упрощения дальнейших рассуждений может быть исключена из используемых выражений.

Кроме того, если предположить, что покрываемая деталь имеет несложную форму, то распределение металла покрытия по поверхности детали будет повторять распределение тока у этой поверхности или же распределение потенциальной функции на рассматриваемой поверхности [4].

С учетом сделанных замечаний запишем более простую формулировку задачи оптимального управления токовыми режимами в гальванической ванне.

Для расчета оптимального времени работы каждой из анодных секций и толщины покрытия введем обозначение

$$A_{i,a} = e \eta I / (qs), \quad (8)$$

тогда выражение (5) можно переписать в виде

$$\delta_a = \sum_{i=1}^N A_{i,a} t_i. \quad (9)$$

Поскольку на толщину наносимого покрытия наложены интервальные ограничения (3), то запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_{i,1} t_i &\geq \delta_{\max}; \\ \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^N A_{i,na} t_i &\geq \delta_{\max}; \\ \sum_{i=1}^N A_{i,1} t_i &\leq \delta_{\min}; \\ \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^N A_{i,na} t_i &\leq \delta_{\min}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для решения записанной системы уравнений будем использовать классический симплекс метод, широко запрограммированный для различных поколений ЭВМ, операционных сред и компиляторов.

Решение этой системы определит значения времен подключения каждой анодной площадки секционированного анода, вычислит толщину наносимого покрытия на каждом участке катода.

В том случае, если покрываемая деталь весьма сложна, то требуется решение задачи оптимального управления токовыми режимами осаждения в постановке (7).

Анализ целевой функции показал, что она носит «враждебный» характер, и поэтому для решения поставленной задачи оптимального управления предлагается использовать метод Пауэлла с модификациями.

Идея метода заключается в поиске минимума функции путем проведения последовательности одномерных поисков вдоль системы сопряженных направлений.

Поиск минимума функции (7) будем проводить за k этапов $k = 1, \dots$, каждый из которых в общем случае может быть представлен в виде последовательности шагов. Поиск начинается в некоторой точке x_0^k и использует n линейно независимых направлений поиска s_i^k $i = 1, \dots, n$. В точке x_0^k начальные направления s_1, \dots, s_n берутся параллельными координатным осям.

Шаг 1. Любым алгоритмом одномерного поиска определяется x_1^k из условий $\Phi(x_0^k + \lambda_1^k s_1^k) = \min$. Полагая $x_1^k = x_0^k + \lambda_1^k s_1^k$, находим λ_2^k такое, чтобы $\Phi(x_1^k + \lambda_2^k s_2^k)$ обращалась в минимум, при этом $x_2^k = x_1^k + \lambda_2^k s_2^k$. Поиск осуществляется последовательно в каждом направлении s_i^k $i = 1, \dots, n$, всегда начиная с самой последней точки, пока не будут определены все $\lambda_i^k, i = 1, \dots, n$.

Шаг 2. После минимизации $\Phi(x)$ в каждом из n направлений выполняется один дополнительный шаг величиной $(x_n^k - x_0^k)$, соответствующий полному перемещению на k -том этапе и приводящий в точку $(2x_n^k - x_0^k)$.

Шаг 3. На данном шаге осуществляется проверка возможности замены одного из «старых» направлений поиска на «новое», что позволит получить более эффективный набор направлений. Проверка выполняется следующим образом.

Для компактности изложения введем несколько обозначений:

а) наибольшее уменьшение $\Phi(x)$ в каком-либо направлении поиска обозначим через

$$d^k = \max \left\{ \Phi(x_{i-1}^k) - \Phi(x_i^k) \right\}; i = 1, \dots, n;$$

б) соответствующее этому максимальному изменению $\Phi(x)$ направление обозначим через s_m^k ;

в) положим $\Phi_1 = \Phi(x_0^k)$, $\Phi_2 = \Phi(x_n^k)$ и $\Phi_3 = \Phi(2x_n^k - x_0^k)$, где $x_0^k = x_n^{k-1}$ и

$$x_n^{k-1} + \lambda_n^k s_n^k = x_0^k + \sum_{i=1}^n \lambda_i^k s_i^k.$$

Тогда, если $\Phi_3 \geq \Phi_1$ или $(\Phi_1 - 2\Phi_2 + \Phi_3) (\Phi_1 - \Phi_2 - d^k)^2 \geq 0,5 d^k (\Phi_1 - \Phi_3)$, то следует использовать на $(k+1)$ -м этапе те же направления $s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k$, что и на k -м этапе, т.е. $s_i^{k+1} = s_i^k$ для $i = 1, \dots, n$, и начать поиск из точки $x_0^{k+1} = x_n^k$ или из точки $x_0^{k+1} = 2x_n^k - x_0^k$ в зависимости от того, в какой точке x функция $\Phi(x)$ принимает наименьшее в направлении s_n^k значение.

В случае, если вышеописанные условия не выполняются, то минимум $\Phi(x)$ ищется в направлении вектора s_n^k , проведенного из x_0^k в x_n^k ; точка этого минимума берется в качестве начальной для следующего $(k+1)$ -го этапа. Система направлений поиска на $(k+1)$ этапе формируется из системы k -го этапа путем исключения направления s_n^k и замены его на s^k . Однако s^k помещается в последний столбец матрицы направлений, а не на место s_m^k . Таким образом, на $(k+1)$ -м этапе будет использоваться система направлений поиска вида

$$s_1^{k+1}, s_2^{k+1}, \dots, s_n^{k+1} = s_1^k, s_2^k, \dots, s_{m-1}^k, s_{m+1}^k, \dots, s_n^k, s^k.$$

Шаг 4. На последнем шаге выполняется проверка критерия окончания поиска в конце любого этапа, который состоит в том, что изменение по каждой независимой переменной должно быть меньше, чем заданная точность e_i , $i = 1, \dots, n$, или

$$\|x_n^k - x_0^k\| \leq 0,1 e_i.$$

Одномерный поиск минимума функции $\Phi(x)$ в некотором выбранном направлении s_i^k , $i = 1, 2, \dots, n$ будем осуществлять при помощи чисел Фибоначчи. Алгоритм поиска состоит из двух стадий. На первой стадии выполняется определение отрезка, содержащего минимум. Шаг для поиска изменяется по числам Фибоначчи. На второй стадии одномерного поиска минимума производим собственно поиск минимума функции на найденном отрезке.

Критерий остановки поиска алгоритма Пауэлла учитывает абсолютную величину шага и поэтому желательно, чтобы $x_i \in [0, 1]$, тогда заданная точность будет одновременно и относительной ошибкой результата. Чтобы избежать нормирования переменных в используемой целевой функции, критерий остановки изменим так, чтобы в нем учитывалась относительная величина шага

$$(x_i^{k+1} - x_i^k) / x_i^k < e, \quad i = 1, \dots, n.$$

Проверка эффективности алгоритма выполнялась путем решения контрольной задачи поиска минимума функции Розенброка

$$\Phi(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2.$$

Верное решение контрольной задачи получено за 12 этапов. При этом функция Розенброка вычислялась 930 раз.

Заключение. С помощью предлагаемых методик решен ряд реальных задач по поиску оптимального управления токовыми режимами нанесения покрытий на поверхности деталей. По результатам решения реальных задач можно сделать вывод о том, что при определенной степени воображения, полученные численные результаты последовательностей включения анодных секций «рисуют» на поверхности секционированного анода «профиль» покрываемой детали.

Список литературы

1. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлов. – М.: Химия, 1979.
2. Ямпольский А.М. Способы получения равномерных и гладких покрытий. – Л.: ЛДНТП, 1970.
3. Егоров К.В., Манукян А.Б. Вопросы управления системами, описываемыми уравнением Лапласа / В кн. Применение и перспективы развития исполнительных устройств в системах регулирования и управления. – Кировокан, 1979.
4. Применение метода распределенного контроля для управления гальваническими процессами: Отчет / Егоров К.В. и др. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1975.

Modeling and Optimization of Current Regimes in the Process of Electroplated Coatings

I.V. Milovanov

Department "Systems of Automated Designing", TSTU

Key words and phrases: electroplated coatings; modeling of current distribution; current density; sectionalized anode; rectifier unit control.

Abstract: Galvanic bath with sectionalized anode to control the density of cathode current is modeled. The task of choosing optimum current regimes of the process of electroplated coatings is formulated. The algorithms of determining the sequence and duration of anode sections work are offered.

Modellierung und Optimisierung der Stromzustände bei den Prozessen des Auftragens von den galvanischen Niederschlägen

Zusammenfassung: Es wird das Galvanisierbad mit der abgeteilten Anode für die Regulierung von der Dichte des Katodenstroms modelliert. Es ist die Aufgabe der Auswahl der optimalen Stromzustände von den Prozessen der galvanischen Niederschläge formuliert. Es werden die Algorithmen der Bestimmung der Reihenfolgen und der Arbeitsdauer von den Anodensektionen vorgeschlagen.

Modélage et optimisation des régimes du courant dans les processus de l'exécution des revêtements électrolytiques

Résumé: On modèle un bain galvanique à l'anode actionnée pour la commande de l'épaisseur du courant cathodique. On a formulé le problème du choix des régimes optimaux du courant dans les processus de l'exécution des revêtements électrolytiques. On propose les algorithmes de la définition des successions et de la durée du travail des sections anodiques.
