

duction. This is extremely important, because even small mechanical defects can influence the tracking precision of a complete system. This method was successfully implemented for the serially produced modules for the optical-location stations. Realization of the described method requires construction of an adequate mathematical model of a mechatronic module. The authors describe development of an ideal system model, including a servo-drive, a control system and additional hardware, such as sensors and servo-controller parameters. A list of typical failures for these types of systems is presented. This list was obtained after experimental diagnostics of over 100 produced units. The authors also describe how these failures can be presented in a mathematical model. An experiment is required to prove the effectiveness of this method by comparison of the model data with the data acquired.

Keywords: mechatronics, servo, servo-drive control, fault diagnostics, FLIR systems, automatization

For citation:

Boshlyakov A. A., Kovalev V. V., Rubtsov V. I. Automated Fault Diagnostics in the Scanners of the Optical-Location Stations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 180—185.

DOI: 10.17587/mau.18.180-185

References

1. **Korobeynikov A., Sarvarov A.** *ESiK*, 2015, no. 1 (26), pp. 4—9 (in Russian).
2. **Lukyanov S., Kondratiev A.** *Vestnik Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G. I. Nosova*, 2014, no. 1 (45), pp. 129—134 (in Russian).
3. **Barkov A., Barkova N.** *Trudy Peterburgskogo Energeticheskogo Instituta Povysheniya Kvalifikatsiy Mintopenergo Rossiyskoy Federatsiy i Instituta Vibratsii SShA*, Sankt-Peterburg, 1999, no. 9 (in Russian).
4. **Alexandrov A., Barkov A., Barkova N., Shafranskiy V.** *Vibratsiya i vibrodiagnostika sudovogo elektrooborudovaniya* (Vibration and vibration diagnostics of the ship's electrical), Sudostroenie, 1986 (in Russian).
5. **Barkov A., Barkova N., Borisov A.** *Vibratsionnaya diagnostika elektricheskikh mashin v ustanovivshisya rejimah raboty* (Vibration di-

agnostics of electrical machines in steady state operation), available at: <http://vibrotek.ru> (in Russian).

6. **Prakhov I., Bashirov M., Samorodov A.** *Problemy Bezopasnosti Chrezvychaynykh Situatsiy*, Moscow, VINITI, 2011, no. 1, pp. 62—69 (in Russian).
7. **Petukhov V., Sokolov V.** *Novosti Elektrotehniki* no. 1 (31), 2005 (in Russian)
8. **Samorodov A., Bashirov M., Churagulov D.** *Elektronnyi zhurnal "Neftegazovoe Delo"*, 2012, no. 6, pp. 10—19 (in Russian).
9. **Kuzeev I., Bashirov M.**, Sposob diagnostiki mekhanizmov i sistem s elektricheskim privodom, *Patent no. 2431152 ot 10.10.2011* (In Russian).
10. **Prakhov I., Bashirov M., Samorodov A.**, *Transport i Hranenie Nefteproduktov i Uglevodородного Syrja. Obrakademnauka*, 2011, no. 2, pp. 14—17 (in Russian).
11. **Boshlyakov A., Kovalev V., Rubtsov V.** *Izvestiya YUFU, Tehnicheskie nauki*, 2012 (in Russian).
12. **Aengus Murray.** *International Rectifier*, September 27, 2007.
13. **Dong Gan.** *Tennessee Technological University*, Dec. 2007.
14. **Casadei D., Serra G.** *Bulletin of polish academy of sciences. Technical Sciences*, 2006, vol. 54, no. 3.
15. **Thomas G. Habelter.** *IEEE Transactions on industry applications*, September/October 1992, vol. 28, no. 5.
16. **Pragasam Pillay, Krishnan R.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1988, vol. 35, no. 4.

УДК 66.021.2.065.5:681.516.42

DOI: 10.17587/mau.18.185-191

А. Г. Лютов, д-р техн. наук, проф., lutov1@mail.ru, **А. Р. Ишкулова**, аспирант, aliya.ishkulova@yandex.ru, Уфимский государственный авиационный технический университет

Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами

Рассмотрены вопросы управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами. Проведен анализ существующих способов управления процессом в ванне с многоанодной системой. Исследовано влияние плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины и скорость осаждения покрытия. Процесс нанесения гальванического покрытия рассмотрен как объект автоматизированного управления. Разработана структурная и функциональная схемы системы экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия. Разработан алгоритм управления процессом нанесения гальванического покрытия с помощью предложенной автоматизированной системы экстремального управления в ванне с многосекционными анодами.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, равномерность, многосекционный анод, экстремальное управление, структурная схема системы, алгоритм управления

Введение

В настоящее время гальваническая обработка металлических изделий является одним из самых распространенных способов защиты от коррозии, придания поверхности декоративной отделки и необходимых свойств (твердости, износостойкости, электропроводности, теплостойкости и т. д.).

Одним из важнейших показателей качества гальванического покрытия (ГП), оказывающим влияние

на его защитные и механические свойства, является равномерность распределения толщины покрытия по всей обрабатываемой поверхности деталей.

Равномерность в большей степени зависит от размеров, форм и взаимного расположения анодов и обрабатываемых деталей в ванне, режима электролиза, состава электролита и перемешивания электролита.

Одним из современных и перспективных направлений в управлении процессом нанесения ГП

в целях улучшения равномерности распределения толщины покрытия является применение много-секционных анодов, которые представляют собой систему анодных секций, состоящих из отдельных металлических пластин одинаковых размеров квадратной формы. Для управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами предложен ряд способов, а именно:

1) управление расположением анодных секций [1];

2) управление током на каждой отдельной секции в зависимости от удаленности поверхности катода [2];

3) управление длительностью подачи тока на каждую отдельную секцию [3];

4) циклическое включение анодных секций по заранее определенной программе [4];

5) управление режимом реверсирования тока [5].

Основная часть предложенных способов основана на регулировании плотности тока и управлении режимом подачи напряжения на каждую отдельную анодную секцию с учетом геометрических форм катода и свойств электролита. Однако значительное влияние на равномерность распределения толщины покрытия оказывают межэлектродное расстояние и интенсивность перемешивания электролита. Заметим, что интенсивность перемешивания не учитывается и не регулируется ни в одном из предложенных способов.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины и скорость осаждения покрытия и разработка структуры автоматизированной системы управления процессом нанесения ГП.

Математическое моделирование и исследование влияния параметров процесса на равномерность и производительность процесса

Исследование влияния таких параметров процесса, как плотности тока, межэлектродные расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины ГП, при осаждении покрытия в ванне с многосекционными анодами проводилось с помощью математической модели [6], которая рассчитывает распределение толщины покрытия путем решения уравнения Лапласа

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

при граничных условиях

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \varphi - \eta_a \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_a} = U, \\ \varphi_k &= \varphi + \eta_k \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_k} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где Δ — оператор Лапласа; φ — электрический потенциал; S_a, S_k — поверхности анодов и катодов соответственно; U — напряжение в электролизере, которое рассчитывается по формуле

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

η_a, η_k — анодное и катодное перенапряжения, определяются по формуле

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

Здесь i — рабочая плотность тока; l — расстояние между электродами, β — электродная поляризация:

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

где R — универсальная газовая постоянная; T — температура; n — число электронов, переносимых в реакции; F — число Фарадея; i_d — предельная диффузионная плотность тока:

$$i_d = \frac{mFDC_0}{\delta}, \quad (6)$$

здесь D — коэффициент диффузии; C_0 — концентрация разряжающихся частиц; δ — толщина диффузионного слоя.

Коэффициент диффузии D и толщина диффузионного слоя δ рассчитываются по следующим формулам:

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

$$\delta = 0,26 \sqrt{\frac{xv}{U_0}} \sqrt[3]{\frac{D}{v}}, \quad (8)$$

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

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

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

где h_{\min} — минимальная толщина покрытия; h_i — толщина покрытия в точке (x, y, z) поверхности катода:

$$h_i = \frac{i(x, y, z) \tau_{\text{ВТ}}}{d}.$$

Здесь Θ — электрохимический эквивалент; τ — продолжительность процесса осаждения; ВТ — выход металла по току; d — плотность металла; $i(x, y, z)$ — плотность тока в точке (x, y, z) на поверхности детали, которая рассчитывается по следующей формуле:

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

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

В результате проведенных исследований получены графики зависимости коэффициента равномерности

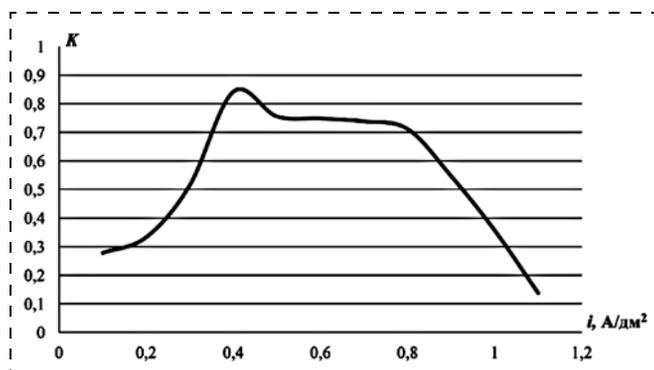


Рис. 1. График зависимости коэффициента равномерности от плотности тока

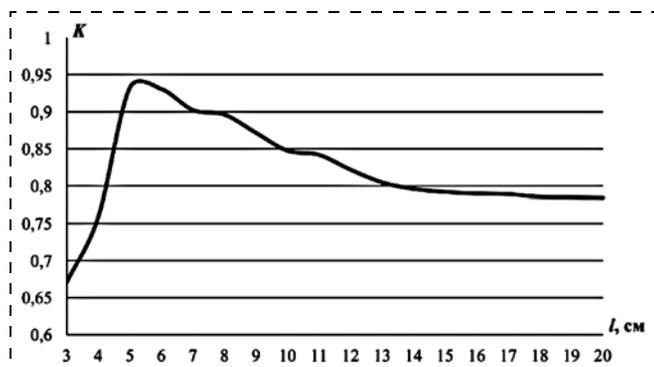


Рис. 2. График зависимости коэффициента равномерности от межэлектродного расстояния

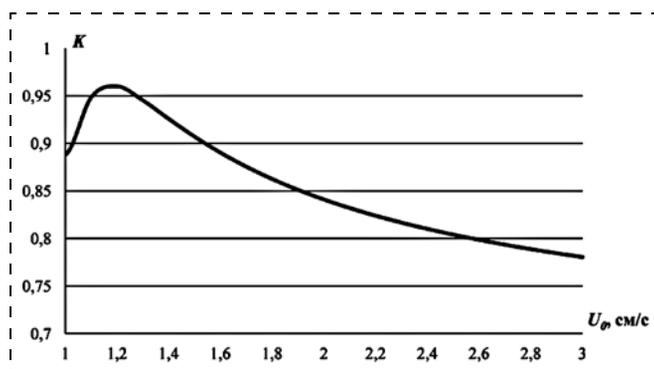


Рис. 3. График зависимости коэффициента равномерности от интенсивности перемешивания электролита

от плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита, представленные на рис. 1, 2 и 3 соответственно.

Из графиков видно, что коэффициент равномерности нанесения ГП экстремально зависит от плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита и принимает максимальное значение при определенных значениях перечисленных параметров. Кроме того, плотность тока, межэлектродное расстояние и интенсивность перемешивания оказывают влияние на скорость осаждения ГП (графики зависимости представлены на рис. 4, 5 и 6 соответственно).

Таким образом, разработка автоматизированной системы экстремального управления процес-

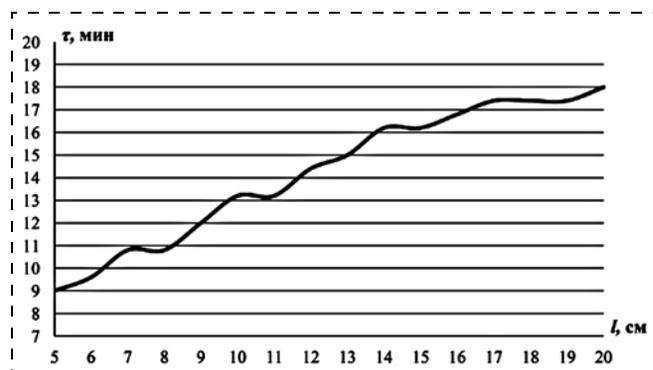


Рис. 4. График зависимости длительности осаждения 10 мкм никелевого покрытия от межэлектродного расстояния

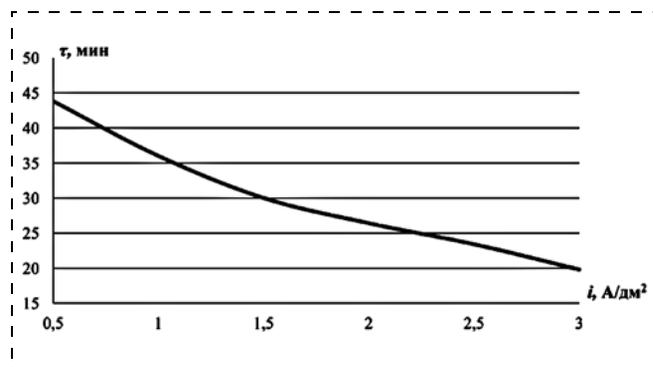


Рис. 5. График зависимости длительности осаждения 10 мкм никелевого покрытия от плотности тока

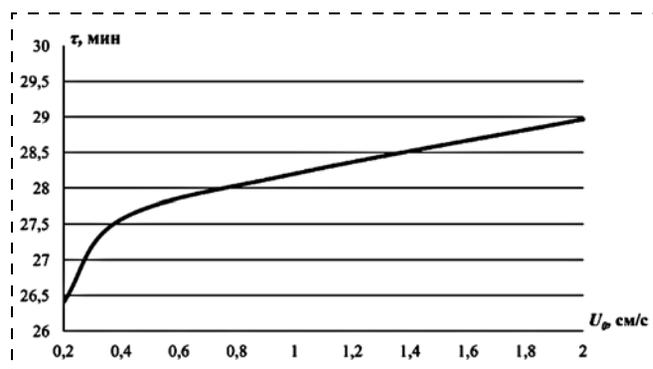


Рис. 6. График зависимости длительности осаждения 10 мкм никелевого покрытия от интенсивности перемешивания электролита

сом нанесения ГП, которая обеспечивала бы нахождение и поддержание максимального значения коэффициента равномерности ГП в условиях действия возмущений процесса, является важной и актуальной задачей, позволяющей добиться качественного улучшения равномерности распределения толщины ГП.

Автоматизация системы экстремального управления процессом нанесения ГП

Рассмотрим процесс нанесения ГП как объект автоматизированного управления (рис. 7). Входными координатами (U) — управляющими воздействиями, обеспечивающими желаемое поведение процесса нанесения ГП, — являются плотность тока (u_1), межэлектродное расстояние (u_2) и интенсивность перемешивания электролита (u_3). Кроме того, входными величинами процесса нанесения ГП являются геометрические формы электродов (u_4), температура (u_5) и уровень электролита (u_6).

На процесс оказывают влияние также внешние возмущающие воздействия (F), такие как изменение концентрации компонентов (f_1), проводимости (f_2) и вязкости электролита (f_3) в процессе осаждения ГП.

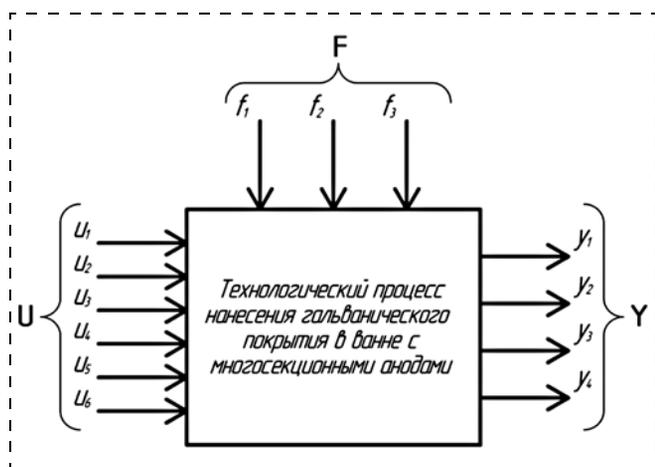


Рис. 7. Представление технологического процесса нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами как объекта автоматизированного управления

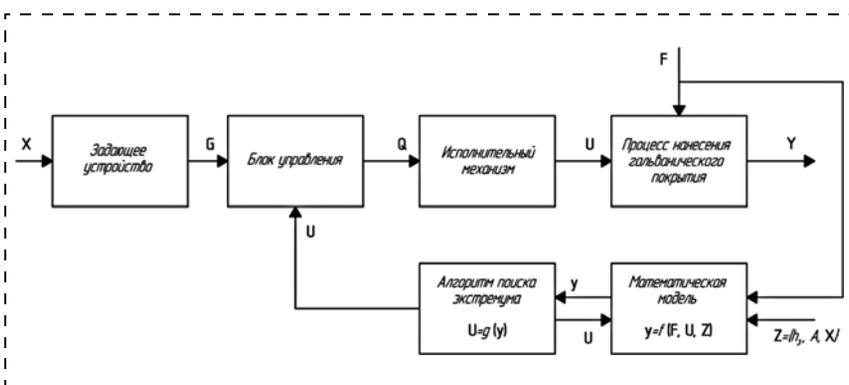


Рис. 8. Структурная схема системы управления процессом нанесения ГП

Выходными координатами процесса (Y) — управляемыми параметрами — являются катодная плотность тока (y_1), межэлектродное расстояние (y_2), интенсивность перемешивания (y_3), длительность процесса (y_4).

Рассмотрим построение системы управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами.

Решение задачи управления процессом имеет определенные трудности, связанные со сложностью контроля распределения толщины покрытия в процессе осаждения. Существуют приборы для контроля толщины покрытия в процессе осаждения [7—11], но они не позволяют определить распределение толщины покрытия по всей поверхности и обладают малой точностью. По этой причине в данной работе предлагается система управления процессом нанесения ГП с принципом управления по возмущению с использованием математической модели. Структурная схема системы экстремального управления процессом нанесения ГП представлена на рис. 8.

На вход системы поступает информация о начальных значениях X параметров процесса, о возмущающих воздействиях F , а также информация о геометрических формах катода A и заданная толщина покрытия h_3 .

Задающее устройство, в соответствии с начальными значениями параметров процесса, устанавливает значения G регулируемых величин, корректирование которых осуществляется в блоке управления, на основании информации U о значениях параметров процесса в точке экстремума коэффициента равномерности.

Экстремум коэффициента равномерности определяется в результате совместного использования алгоритма поиска экстремума [12], осуществляющего определение значений плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита, при которых достигается максимум коэффициента равномерности, и математической модели процесса нанесения ГП, которая рассчитывает распределение толщины покрытия по поверхности катода на основе системы уравнений (1)—(8).

Блок управления, в свою очередь, формирует сигналы Q управления исполнительным механизмом, с помощью которых происходит управление процессом.

В системе имеются четыре контура управления:

- контур управления током;
- контур управления расположением анодных секций и межэлектродным расстоянием;
- контур управления интенсивностью перемешивания электролита;
- контур поддержания температуры электролита.

В обратной связи всех контуров управления располагаются: блок датчиков, включающий в себя датчики температуры, уровня, проводимости, вязкости и концентрации компонентов электролита; блок математической модели процесса нанесения ГП; блок алгоритма поиска экстремума. Функциональная схема системы экстремального управления процессом нанесения ГП представлена на рис. 9.

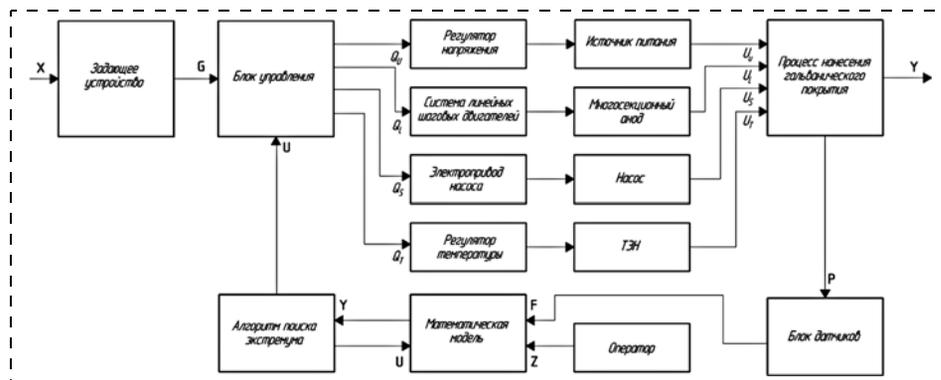


Рис. 9. Функциональная схема системы управления процессом нанесения ГП

Алгоритмизация системы экстремального управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами

Алгоритм работы системы экстремального управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами (рис. 10) состоит из следующих этапов:

1) ввод оператором начальных значений X плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита, изображения обрабатываемой детали A и требуемой толщины покрытия h_3 ;

2) опрос датчиков температуры, уровня, проводимости, вязкости и концентрации компонентов электролита;

3) расчет распределения толщины ГП с помощью математической модели, значения коэффициента равномерности K и минимальной толщины h_{\min} ;

4) поиск экстремума коэффициента равномерности и определение значений плотности тока (i_3), межэлектродного расстояния (l_3) и интенсивности перемешивания электролита (u_3) в точке экстремума;

5) установка значений параметров процесса в соответствии с определенными на предыдущем этапе значениями;

6) запуск процесса нанесения ГП путем подключения электродов к источнику тока и погружения в электролит;

7) выполнение операций опроса датчиков, расчета распределения толщины ГП, поиска экстремума коэффициента равномерности, регулирования параметров процесса и проверка выполнения условия достижения минимальной толщины покрытия h_{\min} заданной толщины h_3 , при котором происходит переход на следующий этап;

8) останов процесса нанесения ГП, извлечение электродов из ванны и отключение питания.

Оценка эффективности применения системы экстремального управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами

Оценку эффективности применения предложенной автоматизированной системы экстремального управления проводили на примере процесса

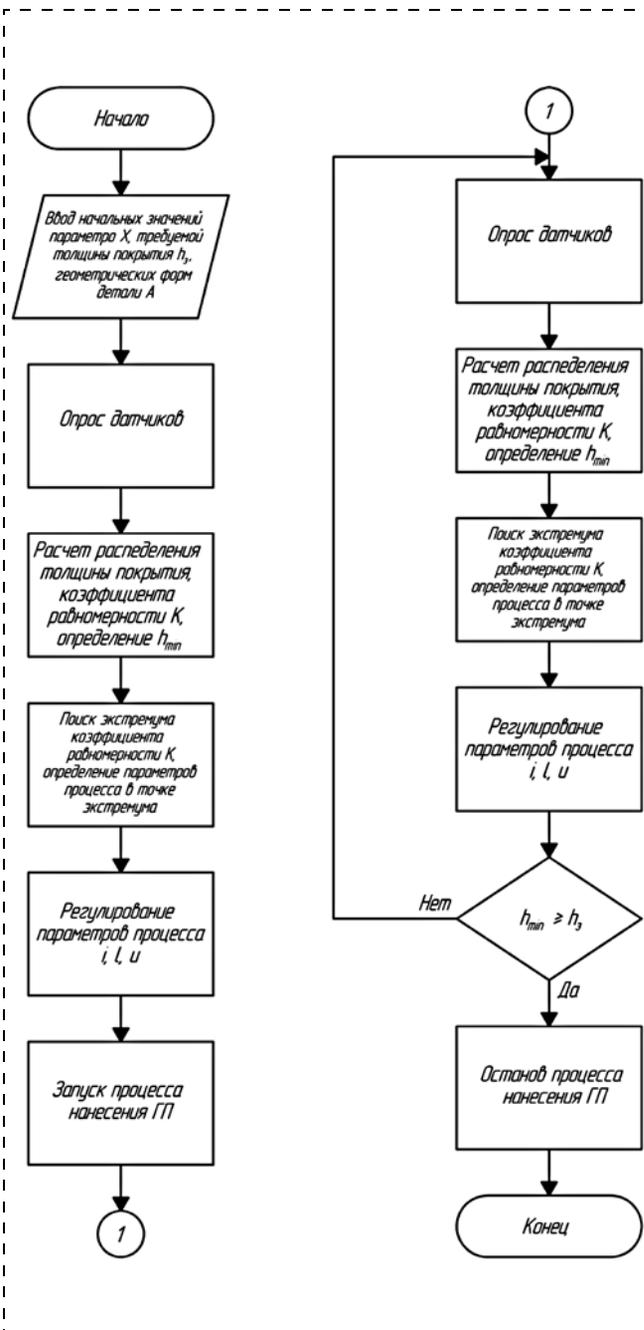


Рис. 10. Укрупненный алгоритм управления процессом нанесения ГП

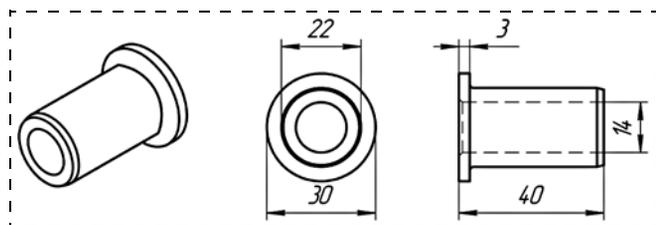


Рис. 11. Конфигурация и размеры катода

нанесения хромового покрытия на внешние поверхности катода (рис. 11), в гальванической ванне размерами $20 \times 20 \times 30$ см, с многосекционными анодами, которые представляют собой систему из 25 анодных секций размерностью 5×5 , состоящих из квадратных пластин одинакового размера 3×3 см и расстоянием между секциями 1 см. Расчет распределения толщины наносимого покрытия проводили при следующих параметрах:

Состав электролита, г/л	CrO_3 (230...270), H_2SO_4 (23...27)
Плотность тока, А/дм ²	45...55
Интенсивность перемешивания электролита, см/с	5...45
Температура электролита, °С	55
Удельная электропроводность, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	0,0166
Выход по току, %	35
Длительность нанесения покрытия, мин	20

Исследования распределения толщины покрытия проводили при управлении плотностью тока, межэлектродным расстоянием и интенсивностью перемешивания электролита в процессе осаждения покрытия и без управления, в ванне с многосекционными анодами, расположенными в одной плоскости, и с выровненным межэлектродным расстоянием. В результате проведенных исследований распределения толщины покрытия были получены следующие значения коэффициентов равномерности:

- при осаждении покрытия в ванне с расположением анодных секций в одной плоскости с управлением параметрами процесса — 0,51;
- при осаждении покрытия в ванне с расположением анодных секций в одной плоскости без управления параметрами процесса — 0,32;
- при осаждении покрытия в ванне с выровненным межэлектродным расстоянием с управлением параметрами процесса — 0,48;
- при осаждении покрытия в ванне с выровненным межэлектродным расстоянием без управления параметрами процесса — 0,30.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что применение автоматизированной системы экстремального управления процессом нанесения ГП для улучшения равномерности распределения толщины осаждаемого покрытия является целесообразным.

Заключение

Проведенные в данной работе расчеты показали целесообразность и эффективность применения

предложенной автоматизированной системы экстремального управления процессом нанесения ГП для повышения равномерности распределения толщины ГП.

Предложенная автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения ГП содержит четыре контура регулирования, в обратной связи которых находятся датчики температуры, уровня, проводимости, вязкости и концентрации компонентов электролита, а также математическую модель процесса и алгоритм поиска экстремума, что позволит более эффективно осуществлять управление параметрами процесса, учитывать и компенсировать влияние возмущающих факторов, таких как изменение концентрации компонентов, проводимости и вязкости электролита. За счет этого можно значительно повысить показатели качества ГП и готовых изделий, увеличить производительность гальванической линии, сократить расход металла и электроэнергию.

Список литературы

1. Литовка Ю. В., Тарураев В. А. Оптимизация гальванической ванны с подвижными анодами // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Автоматика. Управление. 1997. Т. 1, Вып. 2. С. 41—48.
2. А. с. 1463810 СССР, МКИ С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / Н. Д. Кошевой и др. (СССР). № 4316493/31-02; заявл. 31.08.87; опубл. 30.03.83, бюл. № 9.
3. Литовка Ю. В., Дьяков И. А. Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31, № 2. С. 218—221.
4. Соловьев Д. С. Оптимальное управление гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями: дис. канд. техн. наук. Тамбов: ТГТУ, 2014. 166 с.
5. Конкина В. В., Соловьев Д. С., Литовка Ю. В. Математическое моделирование и оптимальное управление реверсным режимом нанесения гальванических покрытий в многоанодной ванне // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 2. С. 7—15.
6. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2015. Т. 19, № 4. С. 45—48.
7. А. с. 88662 СССР, МПК С25D 21/12. Способ непрерывного контроля толщины гальванического покрытия изделий в ванне и устройство для осуществления способа / Крепс Б. И., Паллей С. С (СССР). № 405626; заявл. 12.10.49; опубл. 01.01.50.
8. А. с. 968590 СССР, VGR G 01 B 7/06/ Устройство для контроля толщины гальванического покрытия в процессе осаждения / Краснопрошина А. А. и др. (СССР). № 3213560/25-28; заявл. 05.12.80; опубл. 23.10.82, бюл. № 39.
9. А. с. 107101 СССР, МПК С25D 21/12. Прибор для непрерывного измерения толщины гальванических покрытий / Эльгард А. М. (СССР). № 558642; заявл. 17.09.56; опубл. 01.01.57.
10. А. с. 119414 СССР, МПК С25D 21/12. Прибор контроля и управления режимами гальванических покрытий / Гинберг А. М. и др. (СССР). № 591223; заявл. 31.01.1958; опубл. 01.01.1959.
11. А. с. 1344822 СССР, МПК С23С 14/54. Способ нанесения вакуумных покрытий сложного состава и устройство для его осуществления / Капустин А. А. и др. (СССР). № 4916093/21; заявл. 31.01.1991; опубл. 27.06.1995, бюл. № 38.
12. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Многомерная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2016. Т. 20, № 2 (72). С. 34—39.

Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating

A. G. Lutov, lutov1@mail.ru, A. R. Ishkulova, aliya.ishkulova@yandex.ru✉,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation

Corresponding author: **Ishkulova Aliya R.**, Postgraduate Student,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation,
e-mail: aliya.ishkulova@yandex.ru

Received on May 05, 2016

Accepted on September 07, 2016

The paper deals with the process control plating in a bath with multi-section anodes. The analysis of existing methods of process control in the bath with multi-section anodes. The influence of current density, distance between electrodes and electrolyte mixing intensity on the uniformity of coating and performance of the deposition process thickness. Established extreme nature of dependence of the uniformity of the coating on the current density, distance between electrodes and electrolyte mixing intensity. In this paper, the process of plating is considered as a object of automated control. The block diagram of a system of extreme process control plating based on the principle of management on indignation with using a mathematical model. The function chart of the extreme control system plating process in a bath of multi-anodes. In a control system there are four contours of regulation: contour of regulation of tension; contour of management of an arrangement of anode sections and interelectrode distance; contour of management of intensity of hashing of electrolyte and contour of maintenance of temperature of electrolyte. In feedback of all contours of regulation settle down: the block of sensors including sensors of temperature, concentration of components of electrolyte, conductivity and level; block of mathematical model of process of putting electroplated coating; block of algorithm of search of an extremum. The control algorithm of process of putting electroplated coating by means of the developed automated system of management in a bathtub with multisection anodes is developed.

Keywords: electroplated coating, multisection anode, extreme management, structural diagram, function diagram, control algorithm

For citation:

Lutov A. G., Ishkulova A. R. Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating Management of Process Plating, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 185–191.

DOI: 10.17587/mau.18.185-191

References

1. Litovka Y. V., Taruraev V. A. *Optimizacija gal'vanicheskoy vanny s podvizhnymi anodami* (Optimization of the plating bath with moving anodes), *Izvestija TulGU. Serija: Vychislitel'naja tehnika. Avtomatika. Upravlenie*, 1997, vol. 1, no. 2. pp. 41–48 (in Russian).
2. Koshevoy N. D. e. a. *Ustrojstvo dlja nanesenija gal'vanicheskikh pokrytij* [An apparatus for plating], Patent USSR, no. 4316493, 1983.
3. Litovka Y. V., Diakov I. A. *Metod raschjota potencialov anodov v mnogoanodnoj gal'vanicheskoy vanne* (The method of calculating the potential of the anodes in the plating bath abounding), *Teoreticheskie Osnovy Himicheskoy Tehnologii*, 1997, vol. 31, no. 2. pp. 218–221 (in Russian).
4. Soloviev D. S. *Optimal'noe upravlenie gal'vanicheskimi processami s ciklicheski vkljucaemymi anodnymi sekcijami* (Optimal control of electroplating processes to cycle on the anode sections), Publishing house of TSTU, Tambov, dis. of the cand. tech. sciences. pp. 166, 2014 (in Russian).
5. Konkina V. V., Soloviev D. S., Litovka Y. V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimal'noe upravlenie reversnym rezhimom nanesenija gal'vanicheskikh pokrytij v mnogoanodnoj vanne* (Mathematical modeling and optimal control of reverse plating regime in bath with multi-section anodes), *Vestnik ASTU. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, Astrakhan, no. 2, pp. 7–15, 2015. (in Russian).
6. Liutov A. G., Ishkulova A. R. *Modelirovanie processa nanesenija gal'vanicheskikh pokrytij s uchetom geometricheskikh konfiguracij jelektrodov* (Modeling plating process based on geometric configurations of electrodes), *Vestnik UGATU*, Ufa, 2015, vol. 19, no. 4. pp. 45–48 (in Russian).
7. Krepis B. I. et al. *Sposob nepreryvnogo kontrolja tolshhiny gal'vanicheskogo pokrytija izdelij v vanne i ustrojstvo dlja osushhestvlenija sposoba* [A method of continuous control of the thickness of the plating bath products and a device for carrying out the method], Patent USSR, no. 88662, 1950.
8. Krasnoproshina A. A. et al. *Ustrojstvo dlja kontrolja tolshhiny gal'vanicheskogo pokrytija v processe osazhdenija* [Device for measuring the thickness of a plating deposition process], Patent USSR, no. 968590, 1980.
9. Jel'gard A. M. *Pribor dlja nepreryvnogo izmerenija tolshhiny gal'vanicheskikh pokrytij* [Device for the continuous measurement of thickness of galvanic coatings], Patent USSR, no. 107101, 1950.
10. Ginberg A. M. et al. *Pribor kontrolja i upravlenija rezhimami gal'vanicheskikh pokrytij* [Device control and management regimes of galvanic coatings], Patent USSR, no. 591223, 1958.
11. Kapustin A. A. et al. *Sposob nanesenija vakuumnyh pokrytij slozhnogo sostava i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Application method of vacuum coating of complex composition and device for its realization], Patent USSR, no. 4916093/21, 1991.
12. Liutov A. G., Ishkulova A. R. *Mnogomernaja sistema jekstre-malnogo upravlenija processom nanesenija gal'vanicheskogo pokrytija v vanne s mnogosekcionnymi anodami* (Multidimensional system of extreme management of process of putting electroplated coating in a bath with multisection anodes), *Vestnik UGATU*, Ufa, 2016, vol. 20, no. 2. pp. 34–39 (in Russian).