

УДК 66.021.2.065.5:681.516.42

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОЛИЗА

А. Г. Лютов¹, А. Р. Ишкулова²

¹lutov1@mail.ru, ²Aliya.Ishkulova@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 08.04.2019

Аннотация. Посвящена решению проблемы улучшения качества гальванических покрытий. Для решения поставленной задачи в работе произведены анализ факторов, оказывающих влияние на качество покрытий, и обзор существующих способов улучшения равномерности гальванического покрытия. Повышения степени равномерности покрытия предлагается добиваться за счет оптимизации одновременного регулирования плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита с учетом изменения условий электролиза. Исследования эффективности предложенного способа управления производились с использованием математической модели процесса и генетических алгоритмов, в результате которых было получено, что одновременное регулирование тремя параметрами позволяет существенно улучшить равномерности и повысить скорость осаждения заданной толщины покрытия.

Ключевые слова: гальваническое покрытие; качество; равномерность покрытия; математическое моделирование; оптимальное управление; эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Качество, долговечность и надежность изделий машиностроительного производства зависит от качества изготовления и обработки деталей и комплектующих. Так, качественное гальваническое покрытие (ГП) позволяет повысить срок эксплуатации металлических изделий, что имеет особое значение для деталей, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности, действия агрессивных веществ, подвергающихся большим нагрузкам и трению.

Одним из наиболее значимых показателей качества ГП является равномерность распределения его на всей поверхности покрываемых изделий. Равномерность, в свою очередь, оказывает влияние на защитные и механические свойства покрытия. Недостаточная толщина покрытия на отдельных участках детали (в отверстиях, пазах и наиболее отдаленных от анода) не способна

обеспечить должную защиту от коррозии и обладать достаточной твердостью, прочностью и износостойкостью. Напротив, избыточная толщина на выступающих участках, ребрах и углах детали может приводить к изменению допусков, к растрескиванию покрытия и образованию нагаров, вследствие действия большой концентрации тока на этих участках изделий.

Равномерность ГП зависит от одновременного действия большого количества факторов, к которым относятся:

– геометрические факторы (формы и размеры деталей, анодов и электролизеров, взаимное расположение анодов и деталей в ванне);

– электрохимические факторы (состав, электропроводность, плотность, вязкость и рассеивающая способность электролита, напряжение, плотность тока и электродный потенциал);

– прочие (наличие или отсутствие перемешивания, состояние покрываемой поверхности, наличие в электролите посторонних примесей).

Учет вышеперечисленных факторов в процессе управления, для обеспечения качества ГП, является актуальной и сложной задачей.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Вопросу решения задачи повышения степени равномерности ГП посвящены работы [1–5], в которых предлагаются способы управления, заключающиеся в регулировании плотностью тока или межэлектродного расстояния с использованием многосекционных анодов. Однако для обеспечения равномерного распределения толщины покрытия необходимо при регулировании плотности тока учитывать и межэлектродное расстояние. Так, при уменьшении межэлектродного расстояния, осаждение ГП необходимо вести при низких значениях плотности тока, и наоборот.

В работе [6] для обеспечения равномерности покрытия предлагается производить одновременное регулирование плотностью тока, межэлектродным расстоянием и интенсивностью перемешивания электролита, однако в процессе нанесения покрытия условия электролиза изменяются вследствие следующих причин:

– изменения концентрации компонентов вследствие осаждения ионов металла на поверхность детали и испарения, что соответственно приводит к изменению электропроводности, плотности, вязкости и рассеивающей способности электролита;

– изменение электродного потенциала катода вследствие осаждения на него покрытия;

– образование диффузионного слоя у поверхности катода.

Таким образом, для обеспечения эффективного управления процессов нанесения ГП невозможно без учета изменения этих факторов при управлении процессом, однако измерение и определение их во время осаждения покрытия невозможно.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Производить прогнозирование изменения факторов изменяющихся в процессе осаждения ГП в данной работе предлагается с использованием математической модели [7].

Распределение толщины покрытия определяется путем решения системы уравнений математической модели процесса нанесения ГП (1).

$$\left\{ \begin{aligned} h(x, y, z, \tau) &= \frac{i(x, y, z, \tau) \cdot \tau \cdot VT}{d} \\ i(x, y, z, \tau) &= \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi(x, y, z, \tau)}{\partial n} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} &= 0 \\ \varphi_a &= \varphi - \eta_a \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_a} = U \\ \varphi_k &= \varphi + \eta_k \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_k} = 0 \\ U &= i l \rho \\ \eta_{a, k}(x, y, z, \tau) &= \beta i(x, y, z, \tau) \\ \beta &= \frac{RT}{n F i_d} \\ i_d &= \frac{n F D C_0}{\delta} \\ D &= \frac{M_p R T}{n F^2} \\ \delta &= 0,26 \sqrt{\frac{xv}{u}} \sqrt[3]{\frac{D}{v}} \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

где φ – электрический потенциал; ρ – удельное электросопротивление электролита; $\partial \varphi / \partial n$ – направление внешней нормали к поверхности катода; U – напряжение в электролизере; η_a, η_k – анодное и катодное перенапряжение; S_a, S_k – площади поверхности анодов и катодов, соответственно; i – рабочая плотность тока, А/дм²;

l – межэлектродное расстояние, см; β – электродная поляризация; R – универсальная газовая постоянная, $R=8,134 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}/\text{с}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{моль}$; T – температура, К; n – число электронов, переносимых в реакции; F – число Фарадея, $F=96485 \text{ Кл}/\text{моль}$; i_d – предельная диффузионная плотность тока; D – коэффициент диффузии; C_0 – концентрация, разряжающихся частиц; δ – толщина диффузионного слоя; M_p – молярная электрическая проводимость; x – расстояние от края электрода; ν – кинематическая вязкость электролита; u – скорость потока электролита, см/с.

Решение уравнений математической модели производится методом конечных разностей, для области электролизера с расположенными в ней электродами, разбитыми на сетку с шагом h_s [7].

Учет изменения концентрации компонентов производится путем определения количества атомов металла, осажденных на поверхности детали, по следующей формуле:

$$\Delta C = \frac{h(x, y, z, \tau) \cdot h_s^2}{V_m},$$

где V_m – атомный объем.

Изменение катодного потенциала в процессе осаждения ГП при помощи математической модели производится путем перерасчета при каждой итерации потенциала катода по шестой формуле системы уравнений (1). Аналогично, на каждой итерации производится перерасчет толщины диффузионного слоя D по формуле 11 системы уравнения математической модели (1).

Определение режима управления процессом, при котором обеспечивается наиболее равномерное распределение толщины покрытия, невозможно без решения задачи оптимального управления.

Задача оптимизации управления по критерию равномерности покрытия сводится к максимизации коэффициента равномерности, за счет регулирования плотности тока i , межэлектродного расстояния l и интенсивности перемешивания электролита u в процессе осаждения ГП:

$$K_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h_{\min}(t)}{h_i(x, y, z, t)} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент равномерности; h_{\min} – минимальная толщина покрытия; h_i – толщина покрытия в точке (x, y, z) поверхности катода; n – количество точек определения толщины покрытия на поверхности изделия.

Решение поставленной задачи оптимального управления процессом нанесения ГП по трем параметрам одновременно может быть эффективно произведено с использованием генетических алгоритмов (ГА) [8].

Поиск значений параметров процесса нанесения ГП, при которых достигается максимум коэффициента равномерности, с использованием ГА производится путем случайного формирования начального набора решений (популяции), для чего первоначально производится определение длины строки, в которой необходимо закодировать в двоичном коде решения задачи оптимального управления и для каждого параметра определяется по формуле:

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

где j – требуемое число битов; x_{\max} , x_{\min} – максимальное и минимальное значение параметра; n_x – точность регулирования параметра знаков после запятой.

Преобразование двоичного кода в действительные значения производится по следующей формуле:

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

где v_i – двоичный код, соответствующий i -тому параметру.

Поиск оптимального режима управления производится путем определения значения коэффициента равномерности для каждого решения начального набора и отбора решений с наиболее близкими к максимуму значениями для формирования из них следующего поколения набора решений.

Формирование нового поколения решений производится путем использования операций скрещивания и мутации. Операция скрещивания заключается в определении случайной точки скрещивания, в которой производится разделение двух решений начального набора на две части в каждой, из которых формируются новые решения. Помимо этого, начальный набор решений подвергается операции мутации, заключающийся в случайном изменении одного или нескольких битов решения на противоположное значение. Для полученного нового набора решений вновь производится определение значений коэффициента равномерности и из решений, при которых получено значение K_p , ближе к точке максимума формируется новый набор решений.

Вышеописанные операции повторяются до тех пор, пока не будет определен набор решений, в котором не наблюдается увеличение значения коэффициента равномерности.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВО ВРЕМЯ ОСАЖДЕНИЯ ГП

Для установления принципов управления, при которых обеспечивается наиболее равномерное распределение толщины ГП, были проведены исследования с использованием математической модели и генетических алгоритмов.

Суть исследований заключалась в установлении принципов регулирования плотности тока, межэлектродного расстояния и

интенсивности перемешивания электролита в процессе осаждения ГП в условия изменения концентрации ионов металла осаждаемого покрытия, толщины диффузионного слоя и электродного потенциала.

Исследования проводились на примере процесса нанесения хромового покрытия на катод в гальванической ванне, размерами $60 \times 40 \times 40$ см.

Расчеты для процесса осаждения покрытия в ванне с многосекционными анодами, размеры каждой анодной секции были приняты равными 3×3 см, и расстоянием между секциями 1 см. Многосекционный анод, представляет собой систему из 25 анодных секций размерностью 5×5 .

Формы и размеры катода и гальванической ванны с расположенными в ней анодами и катодом представлены на рис. 1.

Расчеты производились при следующих параметрах электролиза:

- состав электролита – CrO_3 (250 г/л), H_2SO_4 (25 г/л);
- температура электролита – 55°C ;
- удельная электропроводность – $0,0166 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Поиск значений параметров, при которых обеспечивается максимума коэффициента равномерности ГП, производился при следующих диапазонах:

- плотность тока – $45\text{--}55 \text{ А/дм}^2$;
- межэлектродное расстояние – $5\text{--}20$ см;
- интенсивность перемешивания электролита – $0,5\text{--}50$ см/с.

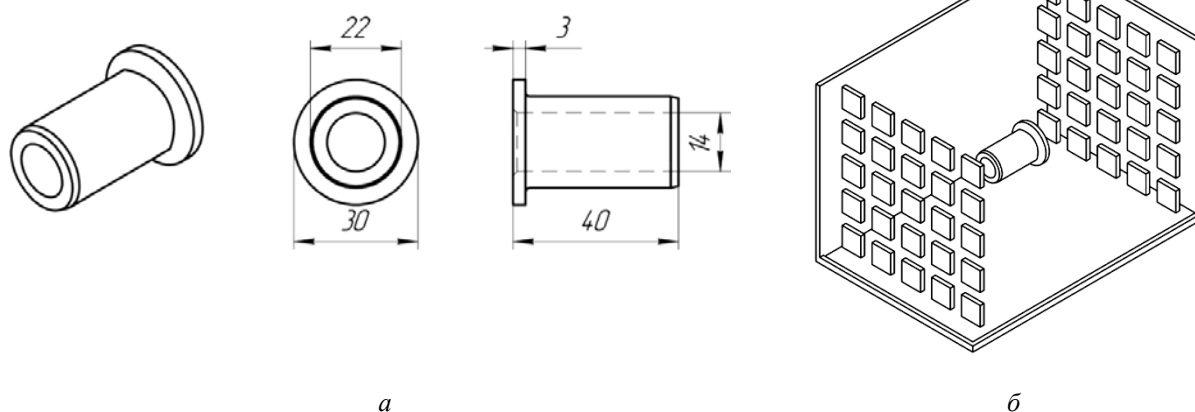


Рис. 1. Геометрическая конфигурация и размеры катода и гальванической ванны

Для проведения сравнительного анализа осаждения покрытия с регулированием параметров в процессе осаждения покрытия и без, были проведены расчеты равномерности распределения покрытия при следующих значениях параметров процесса:

- плотность тока – 50 А/дм²;
- межэлектродное расстояние – 10 см;
- интенсивность перемешивания электролита – 20 см/с.

Длительность процесса нанесения определялась для осаждения 20 мкм хромового покрытия.

В результате проведенных исследований, значение коэффициента равномерности при осаждении покрытия с регулированием параметров процесса было получено равным 0,72, без регулирования – 0,43. Длительность времени, необходимая для осаждения 20 мкм толщины покрытия, определенная в результате проведенных исследований, для случая с регулированием параметров в процессе осаждения ГП составила 24 мин, без регулирования – 40 мин.

Таким образом, из приведенных результатов сравнительного анализа видно, что использование оптимального регулирования в процессе осаждения покрытия позволяет существенно улучшить равномерность покрытия, при этом на осаждение заданной толщины покрытия затрачивается меньше времени.

В процессе осаждения покрытия с оптимальным регулированием параметров процесса изменение плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита проводилось в соответствии с графиками, представленными на рис. 2.

Из полученных графиков видно, что наиболее равномерное распределение покрытия обеспечивается при периодическом повышении и понижении значения плотности. Периодическое повышение плотности объясняется тем, что в процессе осаждения вследствие иммиграции ионов металла на поверхность катода концентрация их в прикатодной области сокращается, повышение плотности тока позволяет доставить в эту

область ионы металла из более отдаленных участков межэлектродного пространства электролита.

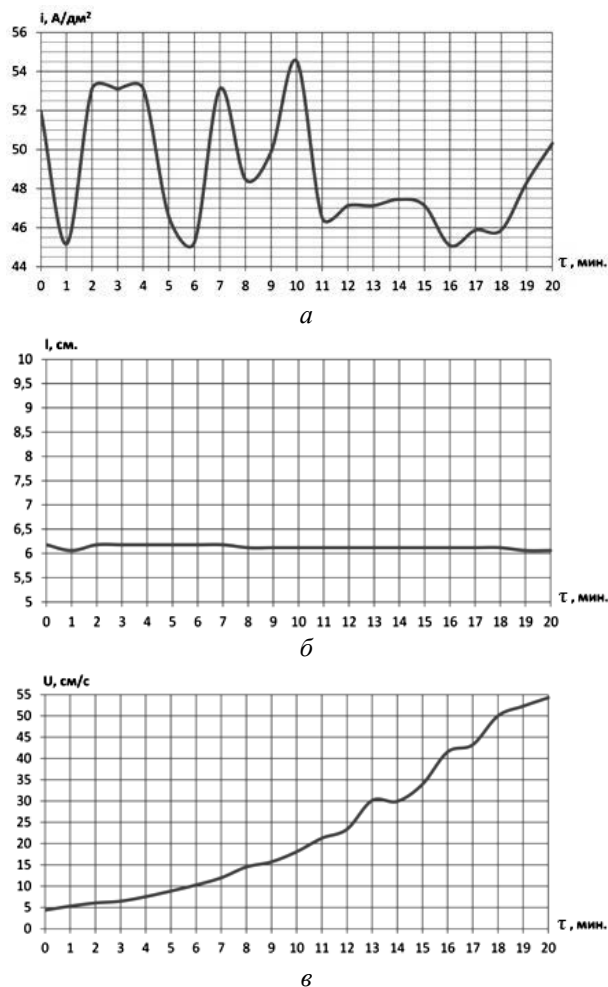


Рис. 2. Изменение плотности тока (а), межэлектродного расстояния (б) и интенсивности перемешивания электролита (в) во времени для получения наиболее равномерного распределения толщины ГП

Из представленных результатов исследования (рис. 2) видно, что в процессе осаждения ГП с регулированием параметров процесса межэлектродное расстояние изменялось не значительно, это можно объяснить тем, что расстояние между анодом и катодом в большей степени влияет на распределение плотности тока на поверхности детали, которая зависит от форм катода. Однако при осаждении покрытия на детали различных геометрических форм и размеров необходимо определять оптимальное межэлектродное расстояние для каждого типа деталей.

В процессе осаждения ГП регулирование интенсивности перемешивания электролита производилось путем постепенного увеличения скорости потока жидкости, что объясняется тем, что в процессе осаждения покрытия концентрация ионов осаждаемого металла в межэлектродной области электролита сокращается и требуется обеспечивать поступление их из глубины электролита. Помимо этого, вследствие действия электрического тока на поверхности катода образуется диффузионный слой, который со временем увеличивает и препятствует иммиграции ионов металла на поверхность детали, уменьшение толщины диффузионного слоя может быть обеспечено путем увеличения скорости потока электролита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос улучшения качества ГП за счет одновременного оптимального управления плотностью тока, межэлектродным расстоянием и интенсивностью перемешивания электролита с учетом изменения условий электролиза.

Для установления принципов управления процессом нанесения ГП при изменении условий электролиза были проведены исследования при помощи математической модели. Исследования проводились для случаев с регулированием параметров процесса во время осаждения покрытия и без регулирования. В результате проведенного сравнительного анализа было установлено, что регулирование параметров процесса позволяет существенно улучшить равномерность распределения толщины ГП на поверхности детали, помимо этого, на осаждение заданной толщины покрытия затрачивается меньше времени. Таким образом, можно сделать вывод, что применение предложенного способа управления процессом является целесообразным и позволяет повысить качество покрытия, производительность гальванической линии и сократить расходы металла и электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авторское** свидетельство 1048005 СССР, МКЗ С 25 D 21/12. Способ автоматического управления процессами электроосаждения металла покрытия / А. Н. Алексеев и др. (СССР). № 3423910/22-02. Заявл. 14.04.82. Оpubл. 15.10.83.

Бюл. № 38. [А. N. Alekseev, et. al. (USSR). Copyright certificate 1048005 USSR MKI3 C 25 D 21/12. "Automatic process control method of electrodeposition coating of metal", Number 3423910, 1983.]

2. **Авторское** свидетельство 1463810 СССР, МКИ4 С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / Н. Д. Кошевой и др. (СССР). № 4316493/31-02. Заявл. 31.08.87. Оpubл. 30.03.83. Бюл. № 9. [Н. D. Koshevoy, et. al. Copyright certificate USSR 1463810. An apparatus for plating / (USSR). Number 4316493 / 31-02; 1983.]

3. **Литовка Ю. В.** Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю. В. Литовка, И. А. Дьяков // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31, № 2. С. 218–221. [Y. V. Litovka, I. A. Diakov, "The method of calculating the potential of the anodes in the plating bath abounding", (in Russian), in *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, vol. 31, no. 2. pp. 218-221, 1997.]

4. **Соловьев Д. С.** Оптимальное управление гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями: дисс. канд. техн. наук: Тамбов: ТГТУ, 2014. 166 с. [D. S. Soloviev, *Optimal control of electroplating processes to cycle on the anode sections: PhD*: Tambov: TGTU, 2014. 166 p.]

5. **Конкина В. В.** Математическое моделирование и оптимальное управление реверсным режимом нанесения гальванических покрытий в многоанодной ванне / В. В. Конкина, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 2. С. 7–15. [V. V. Konkina, D. S. Soloviev, Y. V. Litovka, "Mathematical modeling and optimal control of reverse plating regime mnogoanodnoy bath", (in Russian), in *Vestnik ASTU. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, no. 2, pp. 7-15, 2015.]

6. **Лютов А. Г.** Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Мехатроника, автоматизация и управление. 2017. Т. 19, № 3. С. 185–191. [A. G. Liutov, A. R. Ishkulova, "Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating", (in Russian), in *Mekhatronika, avtomatizaciya i upravlenie*, vol. 19, no. 3. pp. 185-191, 2017.]

7. **Лютов А. Г.** Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 20, № 4. С. 45–48. [A. G. Liutov, A. R. Ishkulova, "Modeling plating process based on geometric configurations of electrodes", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 20, no. 4. pp. 45-48, 2015.]

8. **Лютов А. Г.** Оптимизация управления процессом нанесения гальванического покрытия в ваннах с многосекционными анодами с использованием генетических алгоритмов / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Вестник Южноуральского государственного университета: Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17, № 1. С. 103–111. [A. G. Liutov, A. R. Ishkulova, "Optimization of electroplating process control in baths with multisection anodes using genetic algorithms", (in Russian), in *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo. Series "Computer technology, management, electronics"*, vol. 17, no. 1, pp. 103-111., 2017.]

ОБ АВТОРАХ

ЛЮТОВ Алексей Германович, проф., зав. каф. автоматиз. технол. процессов. Дипл. инж. электронной техники (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. упр. сложн. техн. объектами.

ИШКУЛОВА Алия Рифовна, ст. преп. каф. технол. произв. летат. аппаратов филиала в г. Кумертау. Дипл. инженер по автоматиз. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. упр. сложн. техн. процессами и объектами.

METADATA

Title: Multi-parametric control of the process of drawing a galvanic coating taking into account a change in the electrolysis conditions.

Authors: A. G. Lutov¹, A. R. Ishkulova²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹lutov1@mail.ru, ²Aliya.ishkulova@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 2 (84), pp. 138-144, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The work is devoted to solving the problem of improving the quality of electroplated coatings. To solve this problem, we analyzed the factors affecting the quality of coatings and a review of existing methods for improving the uniformity of electroplating. In the work, it is proposed to increase the degree of uniformity of the coating by optimizing the simultaneous control of the current density, the interelectrode distance, and the intensity of electrolyte mixing, taking into account changes in the electrolysis conditions. Studies of the effectiveness of the proposed control method were carried out using a mathematical model of the process and genetic algorithms, as a result of which it was found that the simultaneous control of three parameters allows us to significantly improve the uniformity and increase the deposition rate of a given coating thickness.

Key words: electroplated coating; quality; coating uniformity; math modeling; optimal control; efficiency.

About authors:

LUTOV, Alexey Germanovich, Prof., Head. Dept. of Automated Technological Processes. Dipl. the engineer of electronic technics (UAI, 1985), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).

ISHKULOVA, Aliya Rifovna, senior lecturer of the department of aircraft production technologies. Dipl. engineer on automation of technological processes (USATU 2012).