

welds when welding flux cored wire in carbon dioxide), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1972, no. 7, pp. 47–48 (in Russian).

8. **GOST 16037–80.** *Soedineniya svarnye stal'nykh truboprovodov. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery* (Welded joints of steel pipelines. Basic types and sizes of structural elements), Moscow, Publishing House of Standards, 1980, 24 p. (in Russian).

9. **Rykalin N. N., Uglov A. A.** *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* (Calculations of thermal processes in welding), Moscow, Mashgiz, 1951, 296 p. (in Russian).

10. **Goldak John A.** *Computational Welding Mechanics*, Mehdi Akhlaghi — Springer, 2007, 323 p.

11. **Lundbäck Andreas.** *Finite Element Modelling and Simulation of Welding of Aerospace Components*, Luleå, Luleå tekniska universitet, 2003, 50 p.

12. **Shishkov M. M.** *Database of steels and alloys: Directory. View. 3*, Donetsk, Southeast, 2002, 456 p.

13. **Matrosov Y. I., Litvinenko D. A., Golovanenko S. A.** *Stal' dlya magistral'nykh truboprovodov* (Steel for main pipelines), Moscow, Metallurgy, 1989, 288 p. (in Russian).

14. **Vabishevich P. N.** *Metod fiktivnykh oblastei v zadachakh matematicheskoi fiziki* (The method of fictitious domains in mathematical physics), Moscow, Publishing house of the Moscow State University, 1991, 156 p. (in Russian).

15. **You Sung Han, Kyehyung Lee and Myoung-Soo Han.** *Finite Element Analysis of Welding Processes by Way of Hypoelasticity-Based Formulation*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, ASME, April 2011, vol. 133, pp. 1–13.

16. **SYSWELD 2013:** *Metallurgical Transformation Model* LSG2M Nancy, ESI Group in 2009, 75015 Paris, France, January 2013, 53 p.

17. **Leblond J. B., Devaux J. C.** *A New Kinetic Model for Anisothermal Metallurgical Transformations in Steels Including Effect of Austenite Grain Size*, *Acta Metallurgica*, 1984, vol. 32, pp. 137–146.

18. **Lyubov B. J.** *Kineticheskaya teoriya fazovykh prevrashchenii* (Kinetic theory of phase transitions), Moscow, Metallurgy, 1969, 263 p. (in Russian).

19. **Koistinen D. P., Marburger R. E.** *A general equation prescribing the extent of austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels*, *Acta Metallurgica*, 1959, vol. 7, no. 1, pp. 59–60.

20. **Gill F., Murray W., Wright M.** *Prakticheskaya optimizatsiya* (Practical Optimization), Moscow, Mir, 1985, 509 p. (in Russian).

21. **Dyurgerov N. G., Solovyanyuk L. A.** *Samoregulirovanie i upravlenie protsessom svarki korotkoi dugoi* (Self-regulation and the management of short arc welding), *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2014, no. 1, pp. 3–5 (in Russian).

УДК 621.357

DOI: 10.17587/mau.18.631-636

Д. С. Соловьев, канд. техн. наук, solovjevdenis@mail.ru, **И. А. Мукина**, магистрант, good.win32@yandex.ru,

Ю. В. Литовка, д-р техн. наук, проф., polychem@list.ru,

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока

Рассматриваются основные известные электрохимические и геометрические подходы, а также их сочетания для снижения неравномерности гальванического покрытия изделий. Выявленные в результате анализа недостатки известных методов учтены в предлагаемом авторами подходе, который использует изменение силы тока на каждой анодной секции для снижения неравномерности слоя покрытия. Предлагаемый гальванический процесс в ванне со многими анодами рассмотрен в качестве объекта управления, для которого описаны входные и выходные координаты, внешние возмущающие и управляющие воздействия. Приводятся виды критериев оценки рассматриваемого подхода. Ставится задача оптимального управления силой тока на анодных секциях в гальваническом процессе нанесения покрытия на изделие с целью обеспечить наименьшую неравномерность распределения слоя покрытия за наименьшее время.

Ключевые слова: гальванический процесс, ванна со многими анодами, сила тока, неравномерность распределения толщины покрытия, оптимальное управление, объект управления, критерий управления

Введение

Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при нанесении гальванических покрытий, является получение равномерного слоя покрытия на изделии сложной геометрической конфигурации. Неравномерное распределение покрытия влечет за собой дополнительный расход не только металла покрытия, но и электроэнергии, затрачиваемой на гальванический процесс. Соблюдение точности заданной толщины покрытия позволит исключить брак (толщина покрытия меньше заданной) и устранить из технологического процесса последующую механическую обработку изделий

(при излишней толщине). Изучению проблемы снижения неравномерности гальванического покрытия посвящено значительное число исследований. Одним из ключевых трудов в этой области является работа [1], согласно которой равномерность распределения толщины слоя гальванического покрытия обуславливается электрохимическими и геометрическими условиями осаждения. При учете электрохимических условий осаждения покрытия решается задача устранения диффузионных ограничений электролиза за счет интенсивного механического перемешивания электролита, покачивания катодных штанг, непрерывной или периодической фильтрации электролита, вибрации, осаждения в

ультразвуковом поле. Кроме того, применяют нестационарные режимы электролиза [2, 3] (реверсивный, импульсный и асимметричный переменный ток), включающие изменение формы тока и его параметров (частота, скважность) в целях замедления роста металлического покрытия на участках с повышенными плотностями тока, что дает возможность получать более качественные катодные покрытия, чем при электролизе с прямым током.

Одним из основных геометрических факторов, оказывающих влияние на равномерность распределения толщины гальванического покрытия, является межэлектродное расстояние. Согласно правилам получения равномерного распределения толщины гальванического покрытия, следующим из законов Г. С. Ома и Г. Кирхгофа, протекание наибольшего количества тока происходит в участках электролита с наименьшими межэлектродными расстояниями, и наибольшая толщина покрытия осаждается на углах и ребрах изделия (краевой эффект). В связи с этим при покрытии внешней поверхности изделия аноду придают форму, воспроизводящую очертания поверхности катода [4, 5]. Дополнительно для защиты ребер, острых углов и выступов на покрываемых деталях от избыточного концентрирования на них силовых линий тока применяют защитные экраны, а для регулирования распределения тока на поверхности детали используют биполярные электроды, имеющие большую электропроводность, чем электролит в межэлектродном пространстве [6].

Тем не менее, ряд исследователей предлагают различные сочетания электрохимических и геометрических условий нанесения гальванического покрытия. Так, в работе [7] предлагается использовать дополнительные аноды, способные перемещаться в направлении, перпендикулярном своей поверхности, причем их положение подбирается из расчета получения наиболее равномерного гальванического покрытия. Однако существование ограничений как на число дополнительных анодов, так и на занимаемые ими положения, связанные с технической реализацией конструкции перемещающих устройств, сделало эффективность применения такого способа для нанесения покрытий на детали сложной формы незначительной. В работе [8] рассматривается применение дополнительных анодов, включение или отключение которых осуществляется в режиме реверсирования тока. При этом процессы осаждения металлов на реверсивном токе не могут быть применены для всех электролитов.

Целью исследования является снижение неравномерности распределения толщины гальванического покрытия на изделиях сложной формы за счет оригинального сочетания оптимального элек-

трохимического режима с геометрическими конфигурациями используемых электродов, отличающегося относительной простотой конструктивной и технической реализации.

Гальванический процесс в многоанодной ванне с различными значениями силы тока

Минимально необходимыми составными частями традиционного электролизера являются: аноды, катод, ванна и электролит, заполняющий ванну электролизера. Для подвешивания анодов и изделия-катода в стационарных ваннах применяются штанги, изготавливаемые из меди или латуни, которые укрепляют на бортах ванны с помощью колодок. Продольные и поперечные анодные штанги соединяются между собой и с общим токоподводом. При данной (классической) системе ток разветвляется по двум направлениям и не подлежит регулированию на каждом из анодов.

Основная идея предлагаемого технологического процесса нанесения гальванического покрытия предусматривает разбиение монолитного анода на систему из N прямоугольных анодных секций, каждая из которых подвешивается на своем участке штанги, отделенном с обеих сторон изоляционным материалом. Каждый участок такой штанги снабжается своим элементом токоподвода, шина от которого, в свою очередь, соединяется с общим источником питания ванны через устройство, позволяющее задавать различную силу тока для каждого j -го анода. На рис. 1 демонстрируется схема гальванической ванны с независимыми анодами и изделием-катодом (для упрощения схемы штанга,

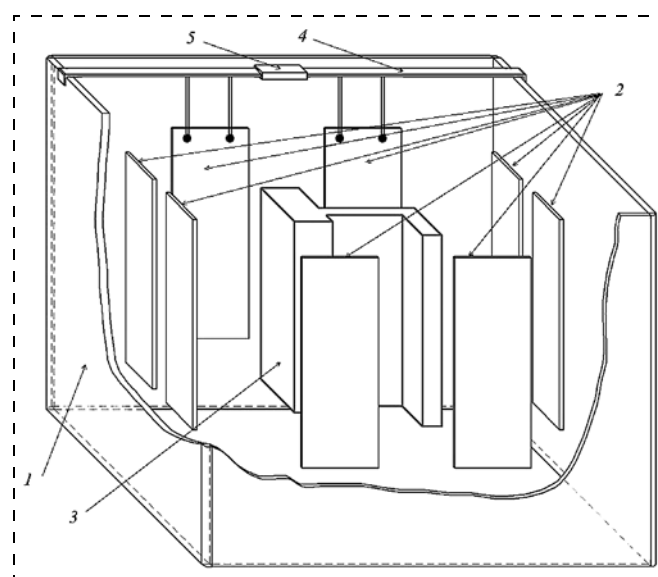


Рис. 1. Схема гальванической ванны с независимыми анодами и катодом:
1 — гальваническая ванна; 2 — аноды; 3 — катод; 4 — штанга; 5 — изолятор

разделенная изоляционным материалом, и крепления анодов показаны только для двух анодов).

Для пояснения электрохимической сути предлагаемого процесса рассмотрим электрический эквивалент гальванического процесса в ванне, состоящей из N анодов и детали-катода, подвешенных в растворе электролита (рис. 2).

Процессы адсорбции, протонизации и диссоциации, которые протекают у поверхности и на поверхностях j -го анода и катода и приводят к возникновению тока, представлены в виде поляризационных сопротивлений R_{a_j} и R_k соответственно.

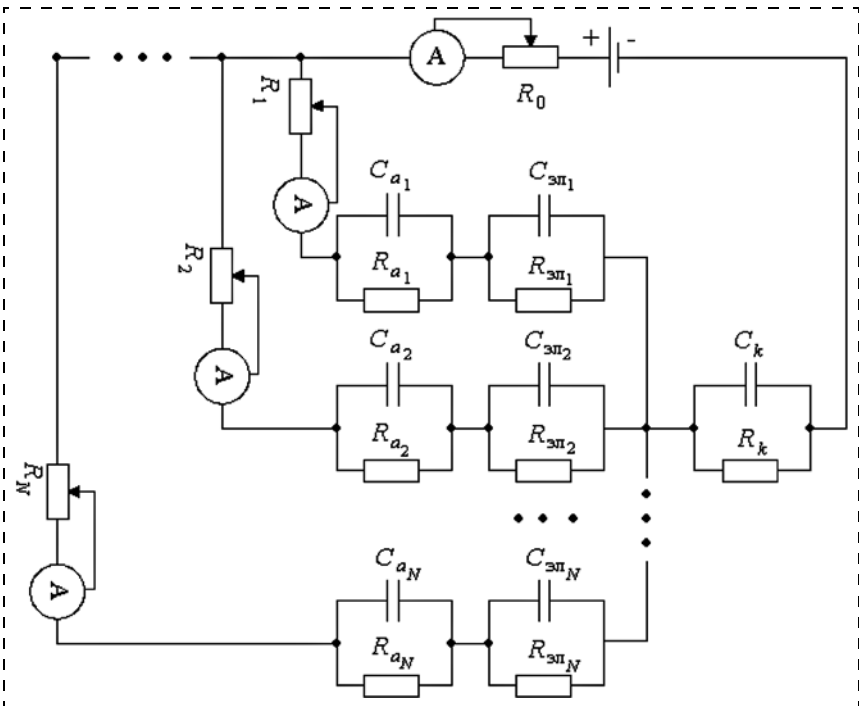


Рис. 2. Электрический эквивалент гальванического процесса в многоанодной ванне

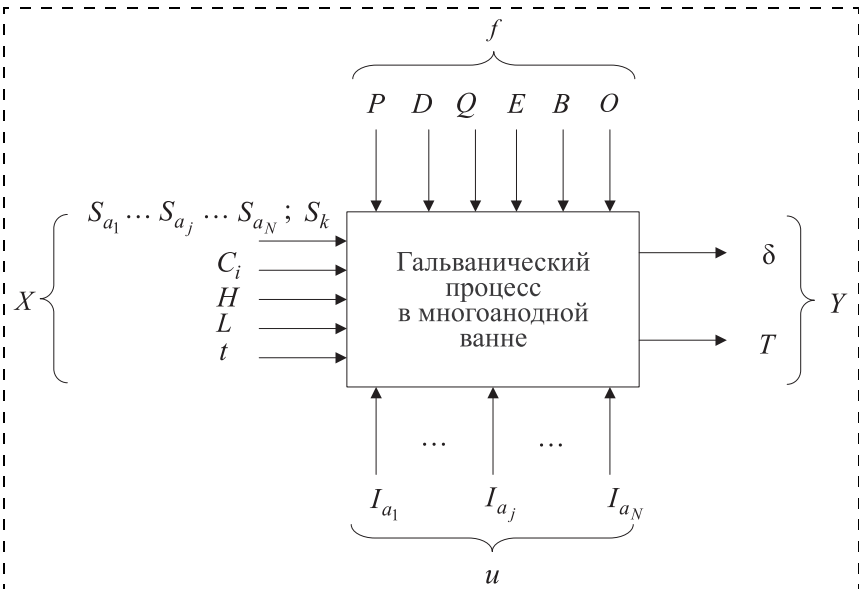


Рис. 3. Гальванический процесс в многоанодной ванне как объект управления

В свою очередь, заряженная поверхность электродов и приближенные к нему противоположно заряженные ионы образуют конденсаторы с емкостями C_{a_j} и C_k . Катод и j -ая анодная секция разделены между собой раствором электролита с сопротивлением $R_{элj}$, образующего межэлектродную емкость $C_{элj}$, которая определяется расстоянием между электродами и площадью поверхности электродов. Регулируемые значения силы тока I_{a_j} для j -го анода из системы секций S_{a_N} формируются

путем управления полупроводниковыми электронными регуляторами R_j на основе информации об измеренных амперметрами значениях силы анодного тока. В свою очередь, суммарная сила тока, подаваемая на N анодных секций, не превышает номинального значения и задается нагрузкой R_0 .

Гальванический процесс в многоанодной ванне с различными значениями силы тока как объект управления

Выбор оптимального режима электролиза должен в итоге обеспечить минимальную себестоимость единицы продукции, которая является основным критерием оценки предлагаемого авторами подхода. Важнейшими факторами, определяющими экономичность электролиза, являются толщина наносимого покрытия и длительность процесса нанесения. В связи с этим рассмотрим предлагаемый гальванический процесс как объект управления (рис. 3), выделив конечное множество входных и выходных координат, а также внешних возмущающих и управляющих воздействий.

На вход X объекта управления поступает следующая информация: конфигурация и расположение в ванне j -го анода из системы секций S_{a_N} и обрабатываемой детали S_k , концентрация i -го компонента электролита C_i , качество H предварительной поверхностной подготовки детали, уровень L и температура t раствора электролита.

С выхода Y объекта управления снимается информация о распреде-

лении толщины слоя покрытия δ по поверхности детали и длительности T гальванического процесса.

В качестве управляющих воздействий u на объект задается сила тока I_{a_j} для j -го анода из системы секций S_{a_N} .

К числу внешних измеряемых и не измеряемых возмущений f относятся: наличие в электролите посторонних примесей P , поверхностные дефекты D детали, вынос электролита Q из ванны поверхностью детали, испарение электролита E с зеркала ванны, прерванный электрический контакт B в процессе нанесения покрытия и опыт оператора O гальванической линии. Несмотря на то что внешние возмущения носят стохастический характер, их влияние на гальванический процесс можно снизить или предотвратить, если уделять должное внимание вопросам выбора гальванооборудования для подготовки и нанесения покрытий и надлежащего ухода за ним, периодического анализа состава электролитов, входного контроля покрываемых деталей, а также переподготовки и повышения квалификации оператора-гальваника.

Постановка задачи оптимального управления гальваническим процессом в многоанодной ванне с различными значениями силы тока

Критерий неравномерности должен давать возможность технико-экономической оценки выбранного токового режима на основании данных о распределении слоя металла на покрываемом изделии.

Обычно решающим при выборе оптимального режима нанесения гальванических покрытий оказывается расход металлов. В связи с этим относительное количество израсходованного металла, т. е. отношение среднего распределения толщины осажденного металла $\bar{\delta}$ к заданной минимальной толщине слоя $\delta_{\min}$ по поверхности изделия S_k в результате гальванического процесса длительностью T , определится из выражения

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

где $\delta_{\min}$, $\bar{\delta}$ — минимальная и средняя толщины покрытия, которые определяются как

$$\delta_{\min} = \min_{(x, y) \in S_k} \delta(x, y, z); \quad (2)$$

$$\bar{\delta} = \frac{\int_{S_k} \delta(x, y, z) dS_k}{\|S_k\|}, \quad (3)$$

где (x, y, z) — координаты точки в пространстве ванны, принадлежащей поверхности катода S_k .

Длительность гальванического процесса T определяется временем, в течение которого осаждается слой покрытия минимальной толщины $\delta_{\min}$:

$$T = \frac{\rho \delta_{\min}}{\bar{j}_k \eta \cdot 100}, \quad (4)$$

где T — длительность процесса, ч; $\bar{j}_k$ — средняя катодная плотность тока, А/дм²; $\delta_{\min}$ — минимальная толщина покрытия, мкм; Θ — электрохимический эквивалент металла, г/(А · ч); ρ — плотность металла покрытия, г/см³; η — выход металла по току, в долях единицы.

В связи с тем, что необходимо обеспечить наименьшую неравномерность распределения слоя покрытия за наименьшее время, получаем двухкритериальную задачу оптимизации.

Пусть R^* , T^* — минимумы однокритериальных задач (1) и (4). Сведем двухкритериальную задачу к однокритериальной. Для этого введем невязки, определяющие неоптимальность выполнения каждого критерия, как

$$r_1 = 1 - \frac{R^*}{R}; \quad (5)$$

$$r_1 = 1 - \frac{T^*}{T}. \quad (6)$$

Тогда общая задача однокритериальной оптимизации будет звучать следующим образом.

Найти силу тока $I_{a_j}^*$ для j -го анода из системы секций S_{a_N} при заданной форме изделия-катода S_k , доставляющие минимум функции взвешенных квадратичных отклонений каждого критерия от своего оптимума:

$$\Psi(\alpha) = \alpha r_1^2 + (1 - \alpha) r_2^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

при ограничении

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (8)$$

Таким образом, исходная многокритериальная задача (1) и (4) сведена к однокритериальной задаче условной параметрической оптимизации (с параметром α), для решения которой могут быть использованы эффективные методы математического программирования.

Особенности решения задачи оптимального управления гальваническим процессом в многоанодной ванне с различными значениями силы тока

При низких плотностях тока покрытие получается крупнокристаллической структуры, вследствие чего возможны участки с непокрытой поверхностью. Высокие катодные плотности тока позволяют

получать однородный мелкозернистый осадок. Однако повышение плотности тока возможно только в определенных пределах. Для получения более равномерных по толщине металлических осадков необходимо применять силу тока тем меньшую, чем сложнее форма покрываемых изделий, при этом продолжительность времени нанесения покрытия для такого режима гальванического процесса резко повышается. В связи с этим первым этапом решения задачи (7) является поиск минимумов однокритериальных задач (1) и (4). Ввиду монотонности большинства поляризационных катодных кривых, минимум критерия неравномерности R^* будет находиться в области наименьших допустимых рабочих плотностей тока, а минимум критерия продолжительности процесса T^* — в области наибольших допустимых плотностей тока. Поиск данных плотностей тока осуществляется с использованием методов оптимизации нулевого порядка [9], например, симплексным методом, так как критерий неравномерности недифференцируемый, следовательно, применение методов высшего порядка не представляется возможным. На втором этапе любым методом одномерной оптимизации осуществляется поиск параметра α , доставляющего минимум однокритериальной задаче (7).

На рис. 4 демонстрируются результаты поиска решения задачи оптимизации (7) для изделия, представленного на рис. 1. По горизонтальной оси откладываются значения параметра α , по вертикальной — получаемые значения критериев неравномерности покрытия, длительности процесса и функции взвешенных квадратичных отклонений каждого критерия от своего оптимума.

Изучение полученных зависимостей значений критериев от параметра α показывает, что изменение параметра в целом не приводит к ухудшению либо улучшению отдельных решений задач оптимизации неравномерности распределения толщи-

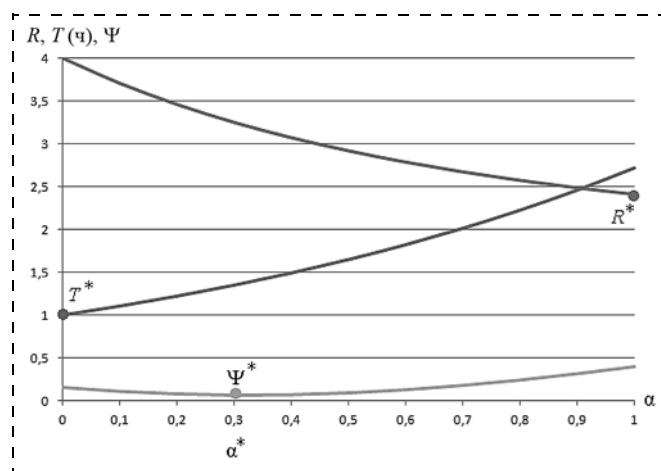


Рис. 4. Параметризация двухкритериальной задачи

ны покрытия либо длительности гальванического процесса. Следует отметить, что параметризация двухкритериальной задачи оптимизации гальванического процесса позволяет определять желаемый баланс между качеством покрытия изделия и длительностью его обработки.

Заключение

Подходы, реализующие сочетание оптимальных режимов электролиза с геометрическими условиями нанесения покрытия, сложны в технической реализации и при этом не всегда приносят ожидаемые результаты (в плане равномерности). В связи с этим предложен оригинальный способ снижения неравномерности гальванического покрытия с использованием системы независимых анодных секций, соединенных с общим источником питания ванны через устройство, позволяющее задавать различную силу тока для каждого из анодов с целью уменьшить плотность тока на более нагруженных участках и увеличить ее на менее нагруженных участках катода.

Следует также отметить, что важным преимуществом предложенного авторами способа снижения неравномерности гальванического покрытия является низкая стоимость необходимого оборудования. Тот факт, что для смены электролита гальванического процесса или формы покрываемой детали не требуется вносить изменения в конструктивную часть системы секций, а необходимо лишь рассчитать оптимальный токовый режим функционирования системы анодных секций, позволяет применять предлагаемый способ снижения неравномерности гальванического покрытия для широкой номенклатуры обрабатываемых гальваническим образом изделий при серийном типе производства.

Список литературы

1. Каданер Л. И. Равномерность гальванических покрытий. Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1961. 414 с.
2. Романенко А. В. Изучение влияния параметров реверсивного тока на равномерность цинковых покрытий, полученных в аммонийном электролите // Журнал прикладной химии. 1998. Т. 71. № 11. С. 1900—1902.
3. Obaid N., Sivakumaran R., Lui J., Okunade A. Modeling the electroplating of hexavalent chromium // COMSOL Conference 2013 in Boston. URL: https://www.comsol.ru/paper/download/180829/obaid_paper.pdf (дата обращения: 17.01.2016).
4. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 45—48.
5. Teeratananon M., Pruksathorn K., Damronglerd S., Dupuy F., Vergnes H., Fenouilletc B. Duverneuilc Experimental investigation of the current distribution in mohler cell and rotating cylinder hull cell // Science Asia. 2004. V. 30. P. 375—381.
6. Соловьев Д. С., Као В. З., Литовка Ю. В. Оптимальное управление технологическим процессом нанесения гальваниче-

ского покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 8. С. 547—553.

7. Helle H. P. E., Beek G. H. M., Ligtelijn J. Th. Numerical determination of potential distribution and current densities in multi-electrode systems // Corrosion. 1981. Vol. 37 (9). P. 522—530.

8. Konkina V. V., Solovjev D. S. Mathematical modelling of electroplating in reverse mode for the multianode bath // ISJ Theoretical & Applied Science. 2015. Vol. 3, N. 23. P. 59—62.

9. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 742 с.

Specific Features of the Optimal Control of the Electroplating Processes in a Multianode Bath with Different Amperage Values

D. S. Solovjev, solovjevdenis@mail.ru✉,

I. A. Mukina, good.win32@yandex.ru, Yu. V. Litovka, polychem@list.ru,
Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation

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

Received on March 02, 2017

Accepted on March 16, 2017

The article describes the main electrochemical and geometrical approaches, and also their combinations intended to reduce the non-uniformity in electroplating of products. The identified drawbacks were taken into account in the approach proposed by the authors, which uses a modified amperage at each section of the anode, in order to reduce the non-uniformity of the coating layer. The essence of this approach is presented in a structural diagram and is explained in terms of the electrochemical processes occurring in the electric equivalent process in a multianode electroplating bath with different amperages. The proposed process in a galvanic bath with a number of anodes is considered as a control object, for which the input and output coordinates, external disturbance and control actions are described. The types of the evaluation criteria for the approach are presented. The task set in the article is that of the optimal amperage control on the anode sections in the process of deposition of a galvanic coating on a product in order to ensure the lowest unevenness in distribution of the coating layer in the shortest period of time. The authors consider approaches to a solution for the optimal control envisaging minima of the partial criteria and a subsequent search for the parameter of one-criterion problem for minimizing of the weighted squared deviations of each criterion from its optimum.

Keywords: galvanic process, multianode bath, amperage, non-uniformity of the coating thickness, optimal control, control object, control criterion

For citation:

Solovjev D. S., Mukina I. A., Litovka Yu. V. Specific Features of the Optimal Control of the Electroplating Processes in a Multianode Bath with Different Amperage Values, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 631—636.

DOI: 10.17587/mau.18.631-636

References

1. Kadaner L. I. *Ravnomernost' gal'vanicheskikh pokrytij* (The uniformity of galvanic coatings), Har'kov, Publishing house of Har'kov state university, 1961, 414 p. (in Russian).

2. Romanenko A. V. *Izuchenie vliyaniya parametrov reversivnogo toka na ravnomernost' cinkovykh pokrytij, poluchennykh v ammonijnom ehlektrolite* (Effect of reversing current parameters on the uniformity of zinc coatings obtained in ammonia electrolyte), *Zhurnal Prikladnoj Himii*, 1998, vol. 71, no 11, pp. 1900—1902 (in Russian).

3. Obaid N., Sivakumaran R., Lui J., Okunade A. Modeling the electroplating of hexavalent chromium, *COMSOL Conference 2013 in Boston*, available at: https://www.comsol.ru/paper/download/180829/obaid_paper.pdf (date of access: 17.01.2016).

4. Lyutov A. G., Ishkulova A. R. *Modelirovanie processa naneseniya gal'vanicheskikh pokrytij s uchetom geometricheskikh konfiguracij ehlektrodo* (Modeling of plating process in view of geometrical confi-

gurations of electrodes), *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 19, no. 4 (70), pp. 45—48 (in Russian).

5. Teeratananon M., Pruksathorn K., Damronglerd S., Dupuy F., Vergnes H., Fenouilletc B. Duverneuile Experimental investigation of the current distribution in mohler cell and rotating cylinder hull cell, *Science Asia*, 2004, vol. 30, pp. 375—381.

6. Solov'ev D. S., Kao V. Z., Litovka Yu. V. *Optimal'noe upravlenie tekhnologicheskimi processami naneseniya gal'vanicheskogo pokrytiya v vanne s dopolnitel'nymi katodami i bipolyarnymi ehlektrodami* (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 (in Russian).

7. Helle H. P. E., Beek G. H. M., Ligtelijn J. Th. Numerical determination of potential distribution and current densities in multi-electrode systems, *Corrosion*, 1981, vol. 37 (9), p. 522—530.

8. Konkina V. V., Solovjev D. S. Mathematical modelling of electroplating in reverse mode for the multianode bath, *ISJ Theoretical & Applied Science*, 2015, vol. 3, no. 23, pp. 59—62.

9. Pupkov K. A., Egupov N. D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Methods of classical and modern automatic control theory), vol. 4: Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. H. Bauman, 2004, 742 p. (in Russian).