

УДК 004.942

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-115-123

Нечеткая продукционная модель знаний для корректировки результатов математического моделирования и оптимизации гальванического процесса при его практической реализации

Д.С. Соловьев

Рассмотрены основные параметры (технологические условия и геометрические факторы), оптимизация которых служит для моделирования гальванических процессов с заданными характеристиками (неравномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали и длительность процесса).

Приведена математическая постановка задачи оптимизации гальванического процесса в виде аддитивной свертки частных критериев, описаны состав системы уравнений математической модели процесса и алгоритмы поиска ее решения. Расхождение реальных параметров с принятыми в расчетах по математической модели может быть весьма значительным. Для исключения потребности в повторном решении задачи оптимизации предложено применение опыта, знаний и интуиции технолога-гальваника, осуществляющего непосредственную реализацию технологического процесса. Реализация указанного подхода возможна с использованием нечеткой продукционной модели знаний, учитывающей технологические условия и геометрические факторы в совокупности.

Цель разработанной модели — получение близких к оптимальным экспериментальным значениям частных критериев с учетом отклонений значений найденных параметров от реальных за счет их корректировки. Определены входные и выходные переменные с терминами и функциями принадлежности. Сформулированы основные электрохимические закономерности для построения базы знаний продукционной модели, содержащей систему правил на основе условных высказываний в виде «IF ... THEN ...».

Рассмотрено применение разработанной модели на примере коррекции результатов моделирования и оптимизации гальванического процесса никелирования в сульфатном электролите для деталей со сложными формами поверхности. Для выбранных форм деталей решена задача оптимизации, итоги которой реализованы на объекте без и с корректировкой по разработанной модели знаний. Полученные результаты сравнивались путем расчета относительного отклонения прогнозируемого значения критерия от экспериментального.

Показано, что корректировка найденных оптимальных параметров оказывает влияние на целевой критерий при увеличении веса первого слагаемого (неравномерность толщины покрытия) ввиду его вычисления для объекта с распределенными координатами и, как следствие, нелинейной зависимости.

Ключевые слова: нечеткая продукционная модель знаний, математическое моделирование, оптимизация, гальванический процесс.

Для цитирования: Соловьев Д.С. Нечеткая продукционная модель знаний для корректировки результатов математического моделирования и оптимизации гальванического процесса при его практической реализации // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 115—123. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-115-123.

A Fuzzy Production Model of Knowledge for Adjusting the Results from Mathematical Modeling of an Electroplating Process and for Optimizing It in Being Embodied

D.S. Solovjev

The main parameters (technological conditions and geometric factors) the optimization of which is used to simulate electroplating processes with specified characteristics (coating thickness nonuniformity over the part surface and process duration) are considered.

The mathematical statement of the electroplating process optimization problem written in the form of additive convolution of partial criteria is presented. The composition of the process mathematical model's system of equations and the algorithms for finding its solution are described. It is pointed out that the parameters adopted for calculations according to the mathematical model may differ considerably from the actual parameters. To eliminate the need of repeatedly solving the optimization problem, it is proposed to use the experience, knowledge and intuition of a specialist in electroplating technology who directly conducts the technological process. The proposed approach can be implemented using a fuzzy production model of knowledge that takes into account technological conditions and geometric factors in an integrated manner.

The aim of the developed model is to obtain close-to-optimal experimental values of partial criteria taking into account the deviations of the found parameter values from their actual values by adjusting them. The input and output variables with terms and membership functions are defined. The key electrochemical regularities required for constructing the production model knowledge base, which contains a system of rules based on conditional statements in the form of "IF ... THEN ..." are formulated.

The application of the developed model is considered taking as an example the problem of correcting the results of modeling and optimizing the nickel plating process in a sulfate electrolyte for parts with complex surface shapes. For the selected forms of parts, the optimization

problem was solved, the results of which were implemented in the plant without and with correction according to the developed knowledge model. The obtained results were compared by calculating the relative deviation of the predicted value of the criterion from its experimental value.

It is shown that the correction of the found optimal parameters has an effect on the target criterion with increasing the weight of the first term (the coating thickness nonuniformity) due to its being calculated for an object with distributed coordinates and, as a consequence, due to a nonlinear dependence.

Key words: fuzzy production model of knowledge, mathematical modeling, optimization, electroplating process.

For citation: Solovjev D.S. A Fuzzy Production Model of Knowledge for Adjusting the Results from Mathematical Modeling of an Electroplating Process and for Optimizing It in Being Embodied. Bulletin of MPEI. 2019;6:115—123. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-115-123.

Введение

В реальных гальванических процессах ток на поверхности изделий сложной геометрической формы или изделий, имеющих отверстия, не распределяется равномерно [1]. Поэтому фактическая плотность тока и, как следствие, толщина слоя гальванического покрытия на различных участках изделия неодинаковы. Это негативно влияет на коррозионные и физико-механические свойства, а также декоративные качества готового изделия. Снижения неравномерности слоя покрытия на обрабатываемом изделии добиваются поиском оптимальных технологических условий и геометрических факторов при протекании гальванического процесса. К технологическим условиям относятся: плотность тока [2], температура [3] и кислотность электролита [4]. К геометрическим факторам — форма и размеры анода [5], расстояние между анодами и изделием-катодом (межэлектродное расстояние) [6] и уровень электролита в гальванической ванне [7]. Ввиду дороговизны гальванического процесса (стоимости реагентов, затрат на электроэнергию и пр.) определение оптимальных условий и геометрических факторов представляется весьма сложной проблемой и подходит исключительно для производств с небольшой номенклатурой обрабатываемых изделий. Таким образом, поиск оптимальных технологических условий и геометрических факторов посредством математического моделирования гальванических процессов — весьма актуальная задача.

Основной сложностью, возникающей при оптимизации таких процессов, является наличие в традиционных моделях для описания гальванических процессов дифференциальных уравнений в частных производных, рассматривающих процесс как объект с распределенными координатами [8]. В связи с этим необходимо использование эффективных численных методов для решения задачи моделирования, ЭВМ с производительными основными характеристиками (оперативной памятью, тактовой частотой процессора) и специализированного программного обеспечения. Однако при реализации найденного оптимального управления на объекте расхождение реальных технологических условий и геометрических факторов с принятыми в расчетах по математической модели может быть весьма значительным. Так, в процессе электрохимических и химических реакций происходит расхо-

дование компонентов, испарение и вынос электролита на поверхности обработанных изделий и разбавление его водой, вносимой последующими изделиями, что влечет за собой изменение его состава и кислотности. Испарение электролитов (особенно горячих) меняет их уровень, что влияет на распределение электрических полей в объеме ванны. Теплотери корпуса ванны меняют температуру электролита в процессе нанесения покрытия. Погрешность системы лазерного позиционирования манипулятора с подвеской с деталями или, в случае ее отсутствия, использование ванны с ручной загрузкой может повлечь за собой изменение межэлектродного расстояния от эталонного значения. В таком случае найденные технологические условия и геометрические факторы уже не будут оптимальными, следовательно, требуется повторное решение задачи оптимизации, что является длительным процессом. Выходом из сложившейся ситуации служит применение опыта, знаний и интуиции технолога-гальваника, осуществляющего непосредственную реализацию гальванического процесса. Так, в [9] использована нечеткая продукционная модель знаний для прогнозирования шероховатости получаемого гальванического покрытия. Работа [10] посвящена разработке нечеткой продукционной модели для управления кислотностью электролита. Последующая реализация данных подходов на реальном объекте возможна с использованием системы управления с регулятором на базе созданной модели [11 — 13]. Однако отсутствуют работы, направленные на использование нечетких продукционных моделей, учитывающих технологические условия и геометрические факторы в совокупности.

Цель работы — получение оптимальных характеристик гальванических процессов с учетом отклонений найденных параметров от реальных значений за счет их корректировки посредством нечеткой продукционной модели знаний.

Постановка задачи оптимизации гальванического процесса

Рассмотрим критерии оценки результатов оптимизации технологических условий и геометрических факторов для нанесения гальванического покрытия.

Неравномерность распределения слоя на поверхности детали можно оценить с использованием критерия Л.И. Каданера:

$$R = \frac{\bar{\delta}}{\delta_{\min}} = \frac{1}{\|S_c\|} \frac{\int_{S_c} \delta(x, y, z) dS_c}{\min_{(x,y,z) \in S_c} \delta(x, y, z)}, \quad (1)$$

где δ_{\min} — минимальная толщина покрытия (определяется конструктивными требованиями на изделие и регламентом технологического процесса); $\bar{\delta}$ — значение средней толщины распределения покрытия по поверхности изделия-катада; $\|S_c\|$ — площадь поверхности изделия-катада; x, y, z — пространственные координаты точки, принадлежащей поверхности S_c .

Длительность процесса нанесения гальванического покрытия определяется из закона М. Фарадея:

$$T = \frac{\delta_{\min} \rho}{k \eta \bar{i}_c}, \quad (2)$$

где ρ — плотность металла покрытия; η — выход металла по току; \bar{i}_c — среднее значение катодной плотности тока; k — электрохимический эквивалент металла покрытия.

Пусть вектор управления u содержит компоненты технологических условий и геометрических факторов:

$$u = (\bar{i}_c, t, \text{pH}, L, H), \quad (3)$$

где t, pH — температура и кислотность электролита; L — межэлектродное расстояние; H — уровень электролита.

Найденные оптимальные значения компонентов вектора (3) должны обеспечить наименьшую неравномерность покрытия (1) за наименьшую длительность (2) гальванического процесса. Для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной воспользуемся аддитивной сверткой, минимальное значение которой требуется найти:

$$\Psi(\alpha) = \alpha \left(1 - \frac{R_{\min}}{R}\right)^2 + (1 - \alpha) \left(1 - \frac{T_{\min}}{T}\right)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где α — значение весового коэффициента из диапазона $0 \dots 1$; R_{\min}, T_{\min} — минимальные значения критериев (1), (2).

Для решения поставленной задачи в виде (4) используем эффективные (с точки зрения вычислительных ресурсов и длительности поиска) алгоритмы многомерной оптимизации нелинейных функций [14]. Для связи управляющих воздействий (3) с критерием оптимальности (4) в [15] сформирована система уравнений математической модели, базирующаяся на основных процессных уравнениях электрохимии (явлениях поляризации, законе Г.С. Ома в дифференциальной форме, дифференциальном уравнении в частных производных П.С. Лапласа с нелинейными граничными условиями II и III родов). Предложенную систему уравнений следует решать сеточным методом [16]. Для сеточного представления решения исходной задачи необходимо использовать конечно-разностную аппроксимацию дифференциального уравнения семиточечным шабло-

ном. Полученная система алгебраических уравнений решается комбинацией методов простой итерации (по распределению потенциала) и нижней релаксации (по плотности тока) [17].

Нечеткая продукционная модель знаний для корректировки результатов оптимизации гальванического процесса

Цель разработки нечеткой продукционной модели знаний — получение наиболее близких к оптимальным экспериментальных значений частных критериев (1), (2) с учетом отклонений значений вектора (3) от реальных за счет корректировки его компонентов. При разработке продукционной модели знаний воспользуемся следующими закономерностями, выявленными экспертами в области нанесения гальванических покрытий, для электролитов с монотонной поляризационной кривой [18].

1. С повышением температуры t электролита происходит ухудшение рассеивающей способности за счет снижения электродной поляризации и, как следствие, повышение неравномерности R покрытия, а также снижение значения выхода по току η (без внесения изменения в характер его зависимости), что влечет за собой увеличение длительности процесса T .

2. Катодный выход по току η снижается при уменьшении pH раствора вследствие выделения водорода, что влечет за собой увеличение длительности процесса T . Также наблюдается снижение рассеивающей способности, в результате чего покрытие на катоде S_c получается неравномерным R по толщине.

3. Снижения неравномерности распределения металла R по поверхности катода S_c достигают увеличением электропроводности электролита и катодной поляризации. При возрастании плотности тока \bar{i}_c происходит падение выхода по току η , влекущее за собой ухудшение неравномерности R . Если при гальваническом покрытии применить высокие плотности тока (выше рассчитанного \bar{i}_c), то длительность процесса T уменьшается.

4. Для деталей сложной конфигурации при увеличении межэлектродного расстояния L в соответствии с кроющей способностью электролита наблюдается снижение неравномерности R по поверхности S_c . По мере увеличения L скорость анодного растворения снижается, а следовательно, увеличивается длительность процесса T .

5. Снижение уровня H электролита в гальванической ванне может повлечь за собой неполное погружение детали-катада S_c , в результате чего ухудшится качество и неравномерность R покрытия, а также увеличится объемная плотность тока и, как следствие, повысится температура t раствора, что ведет к увеличению длительности процесса T (согласно п. 1).

Предложено провести корректировку оптимального значения компонента \bar{i}_c^* при отклонениях осталь-

ных компонентов вектора u от реальных значений на объекте. Выбор в качестве корректируемой величины средней катодной плотности тока \bar{i}_c^* обусловлен более широким диапазоном ее допустимых значений и наибольшим влиянием на оцениваемые критерии оптимальности (1), (2) [19].

В качестве входных лингвистических переменных для разрабатываемой модели выступают отклонения компонентов вектора u от реальных значений, измеренных на объекте:

$$\Delta t = t^* - t^m; \quad (5)$$

$$\Delta pH = pH^* - pH^m; \quad (6)$$

$$\Delta L = L^* - L^m; \quad (7)$$

$$\Delta H = H^* - H^m, \quad (8)$$

где $*$, m — оптимальное и измеренное значения.

Для переменных (5) — (8) определим следующие термы с функциями принадлежности:

1. $\mu_1^{\Delta t}(\Delta t)$, $\mu_1^{\Delta pH}(\Delta pH)$, $\mu_1^{\Delta L}(\Delta L)$, $\mu_1^{\Delta H}(\Delta H)$ — «большое⁻»;

2. $\mu_2^{\Delta t}(\Delta t)$, $\mu_2^{\Delta pH}(\Delta pH)$, $\mu_2^{\Delta L}(\Delta L)$, $\mu_2^{\Delta H}(\Delta H)$ — «среднее⁻»;

3. $\mu_3^{\Delta t}(\Delta t)$, $\mu_3^{\Delta pH}(\Delta pH)$, $\mu_3^{\Delta L}(\Delta L)$, $\mu_3^{\Delta H}(\Delta H)$ — «незначительное»;

4. $\mu_4^{\Delta t}(\Delta t)$, $\mu_4^{\Delta pH}(\Delta pH)$, $\mu_4^{\Delta L}(\Delta L)$, $\mu_4^{\Delta H}(\Delta H)$ — «среднее⁺»;

5. $\mu_5^{\Delta t}(\Delta t)$, $\mu_5^{\Delta pH}(\Delta pH)$, $\mu_5^{\Delta L}(\Delta L)$, $\mu_5^{\Delta H}(\Delta H)$ — «большое⁺».

Знаки «+» и «-» в формулировках термов означают положительное и отрицательное значение отклонения найденного оптимального значения от измеренного. Выбор в пользу пятиэлементного терм-множества обусловливается правилом «магического числа» 7 ± 2 [20], согласно которому в кратковременной человеческой памяти может находиться в среднем 5 односложных слов.

В качестве выходной лингвистической переменной в модели выступает величина изменения катодной плотности тока \bar{i}_c , требующаяся для корректировки ее оптимального значения:

$$\bar{i}_c^r = \bar{i}_c^* + \Delta \bar{i}_c, \quad (9)$$

где \bar{i}_c^r — скорректированное значение катодной плотности тока.

Для слагаемого $\Delta \bar{i}_c$ из (9) введем следующие термы с функциями принадлежности.

1. $\mu_1^{\Delta \bar{i}_c}(\Delta \bar{i}_c)$ — «уменьшить быстро».

2. $\mu_2^{\Delta \bar{i}_c}(\Delta \bar{i}_c)$ — «уменьшить».

3. $\mu_3^{\Delta \bar{i}_c}(\Delta \bar{i}_c)$ — «не изменять».

4. $\mu_4^{\Delta \bar{i}_c}(\Delta \bar{i}_c)$ — «увеличить».

5. $\mu_5^{\Delta \bar{i}_c}(\Delta \bar{i}_c)$ — «увеличить быстро».

Диапазоны лингвистических переменных и конкретный вид функций принадлежности термов зависят от металлов покрытия и используемых электродитов для гальванических процессов.

Совокупность функций принадлежности определяет продукционную модель поиска режимных параметров нанесения гальванического покрытия в терминах нечеткой логики. В свою очередь, база знаний продукционной модели содержит систему правил на основе условных высказываний типа Э. Мамдани [21], записанных в виде «IF ... THEN ...».

При формулировании продукционных правил для данной базы знаний воспользуемся следующей методикой:

- для каждого термина выходной переменной существует, по крайней мере, одно правило;

- имеется, по крайней мере, одно правило, в котором каждый из термов входной переменной играет роль посылки;

- не существует значений вектора входных переменных, степень истинности продукции для которых нулевая.

В связи с этим требуемое число правил в такой модели значительно меньше всевозможных сочетаний значений величин входных переменных.

Система правил формирует выходные значения переменных, исходя из величин значений входных переменных следующим образом.

1. IF $\Delta t = \text{«большое»}$ AND $\Delta pH = \text{«большое»}$ AND $\Delta L = \text{«большое»}$ AND $\Delta H = \text{«большое»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить быстро»}$.

2. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«не изменять»}$.

3. IF $\Delta t = \text{«большое»}$ AND $\Delta pH = \text{«большое»}$ AND $\Delta L = \text{«большое»}$ AND $\Delta H = \text{«большое»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить быстро»}$.

4. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«большое»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

5. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«большое»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить»}$.

6. IF $\Delta t = \text{«большое»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

7. IF $\Delta t = \text{«большое»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить»}$.

8. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«большое»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«не изменять»}$.

9. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«большое»}$ AND $\Delta L = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«не изменять»}$.

10. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«большое»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

11. IF $\Delta t = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta pH = \text{«незначительное»}$ AND $\Delta L = \text{«большое»}$ AND $\Delta H = \text{«незначительное»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить»}$.

12. IF $\Delta t = \text{«большое»}$ AND $\Delta pH = \text{«большое»}$ AND $\Delta L = \text{«большое»}$ AND $\Delta H = \text{«большое»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить»}$.

13. IF $\Delta t = \text{«большое»}$ AND $\Delta pH = \text{«большое»}$ AND $\Delta L = \text{«большое»}$ AND $\Delta H = \text{«большое»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

14. IF $\Delta t = \text{«среднее»}$ AND $\Delta pH = \text{«среднее»}$ AND $\Delta L = \text{«среднее»}$ AND $\Delta H = \text{«среднее»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

15. IF $\Delta t = \text{«среднее»}$ AND $\Delta pH = \text{«среднее»}$ AND $\Delta L = \text{«среднее»}$ AND $\Delta H = \text{«среднее»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить»}$.

16. IF $\Delta t = \text{«среднее»}$ AND $\Delta pH = \text{«среднее»}$ AND $\Delta L = \text{«среднее»}$ AND $\Delta H = \text{«среднее»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«не изменять»}$.

17. IF $\Delta t = \text{«среднее»}$ AND $\Delta pH = \text{«среднее»}$ AND $\Delta L = \text{«среднее»}$ AND $\Delta H = \text{«среднее»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

18. IF $\Delta t = \text{«среднее»}$ AND $\Delta pH = \text{«среднее»}$ AND $\Delta L = \text{«среднее»}$ AND $\Delta H = \text{«среднее»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«увеличить»}$.

19. IF $\Delta t = \text{«среднее»}$ AND $\Delta pH = \text{«среднее»}$ AND $\Delta L = \text{«среднее»}$ AND $\Delta H = \text{«среднее»}$ THEN $\Delta \bar{i}_c = \text{«уменьшить»}$.

Следует отметить, что для систем нечеткого логического вывода адекватное моделирование достигается при нескольких десятках правил, дальнейшее увеличение количества которых влечет за собой проявление недостатков продукционных моделей знаний [22].

Операцию дефаззификации для указанной системы правил предлагается проводить по методу «центра тяжести», к достоинствам которого относится детальный учет формы функции принадлежности (на итоговое значение выходной переменной влияют все сработанные правила).

Пример использования нечеткой продукционной модели знаний

Рассмотрим применение разработанной модели на примере коррекции результатов моделирования и оптимизации гальванического процесса никелирования в сульфатном электролите. Выбор данного процесса обусловлен его широкой распространенностью в промышленности и широким диапазоном варьирования компонентов вектора управления u . В качестве из-

делия-катода S_c используем детали Z-, T-, V-образной формы поверхности, для которых решается задача оптимизации (4). Площади обрабатываемых поверхностей деталей составляли 3...5 дм² при соотношении площадей анода к катоду, равном 1,5:1. Поверхности анода и катода завешивали симметрично напротив друг друга в пространстве ванны размерами 40×30×40 см (длина, ширина, высота). Процесс рассчитывали для $\delta_{\min} = 9$ мкм. В качестве функций принадлежности входных и выходных переменных в продукционной модели знаний использовали симметричные гауссовские, вид которых представлен на рис. 1. Нечеткая продукционная модель знаний реализована с использованием инструментов Fuzzy Logic Toolbox пакета Matlab [22].

Диаграмма процесса получения значения выходной переменной $\Delta \bar{i}_c$ по правилам нечеткой продукционной модели знаний на примере четких значений входных переменных $\Delta t = -1$ °C; $\Delta pH = 0,1$; $\Delta L = 10$ мм; $\Delta H = -20$ мм изображена на рис. 2.

Для изделий Z-, T-, V-образной формы поверхностей катода решали задачу оптимизации (4), затем найденные оптимальные значения вектора (3), за исключением плотности тока \bar{i}_c^* , отклоняли в допустимых для никелирования диапазонах, и вычисляли скорректированное значение \bar{i}_c^r . Найденное скорректированное значение сравнивали с оптимальным путем нахождения относительного отклонения вычисленного критерия (4) от экспериментального значения.

Измерение среднего значения нанесенного никелевого покрытия в (1) выполняли по ГОСТ 9.302—88 толщиномером «Константа К5». Толщиномер имеет погрешность измерения ± 1 мкм в диапазоне 0...100 мкм с разрешающей способностью 0,1 мкм. Для уменьшения влияния случайных факторов проводили серию экспериментов с усреднением измеренной в геометрически эквивалентных друг другу точках толщины слоя покрытия на поверхности изделия.

Относительные отклонения результатов решения задачи (4) от экспериментальных результатов, полученных для оптимальных значений компонентов вектора (3) без и с коррекцией для различных значений весового коэффициента α представлены в таблице.

Наибольшее относительное отклонение численного значения критерия (4) от экспериментального без (24,75%) и с коррекцией (16,58%) плотности тока \bar{i}_c^* на

Результаты сравнения оптимального режима с коррекцией плотности тока \bar{i}_c^* на $\Delta \bar{i}_c$ и без коррекции

Форма S_c	Относительное отклонение численного значения $\Psi(\alpha)$ от экспериментального, %					
	без коррекции			с коррекцией		
	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,9$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,9$
Z-образная	12,21	17,64	24,75	11,24	13,40	16,58
T-образная	10,12	16,65	22,87	9,31	12,49	16,24
V-образная	11,72	18,24	23,72	10,90	14,95	15,89

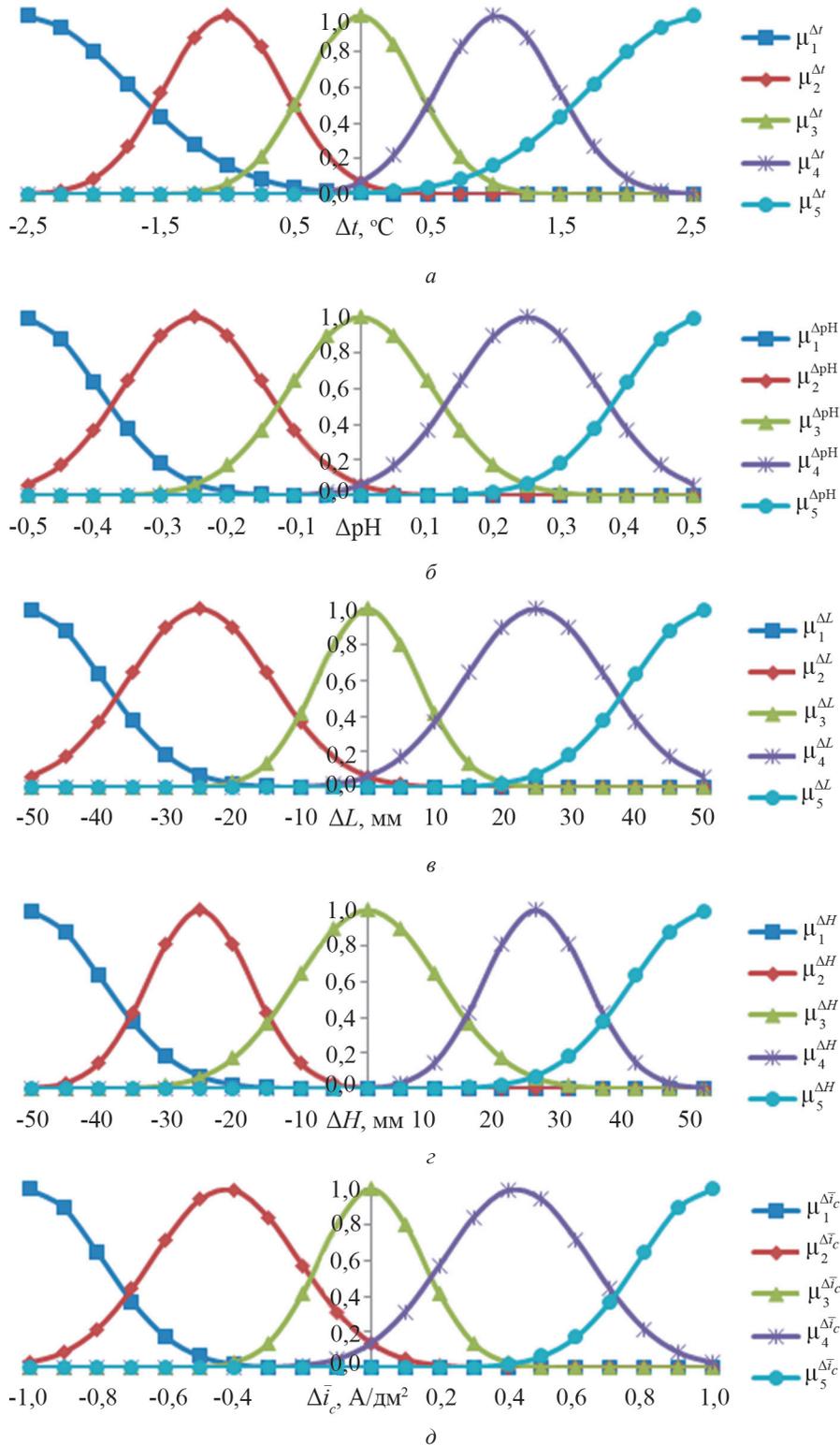


Рис. 1. Функции принадлежности для входных переменных Δt (а), ΔpH (б), ΔL (в), ΔH (г) и выходной переменной $\Delta \bar{i}_c$ (д)

$\Delta \bar{i}_c$, получаемую по нечеткой продукционной модели знаний, достигается при значениях α , близких к единице. Наибольший эффект (доходит до 8,16%) в плане снижения величины отклонения экспериментальных значений критерия (4), полученных без и с коррекцией

наблюдается также для значений α , близких к единице. Для значений α , близких к нулю, т. е. с приданием большего веса второму слагаемому в свертке (4), эффект снижения величины отклонения экспериментальных значений критерия (4), полученных без коррекции

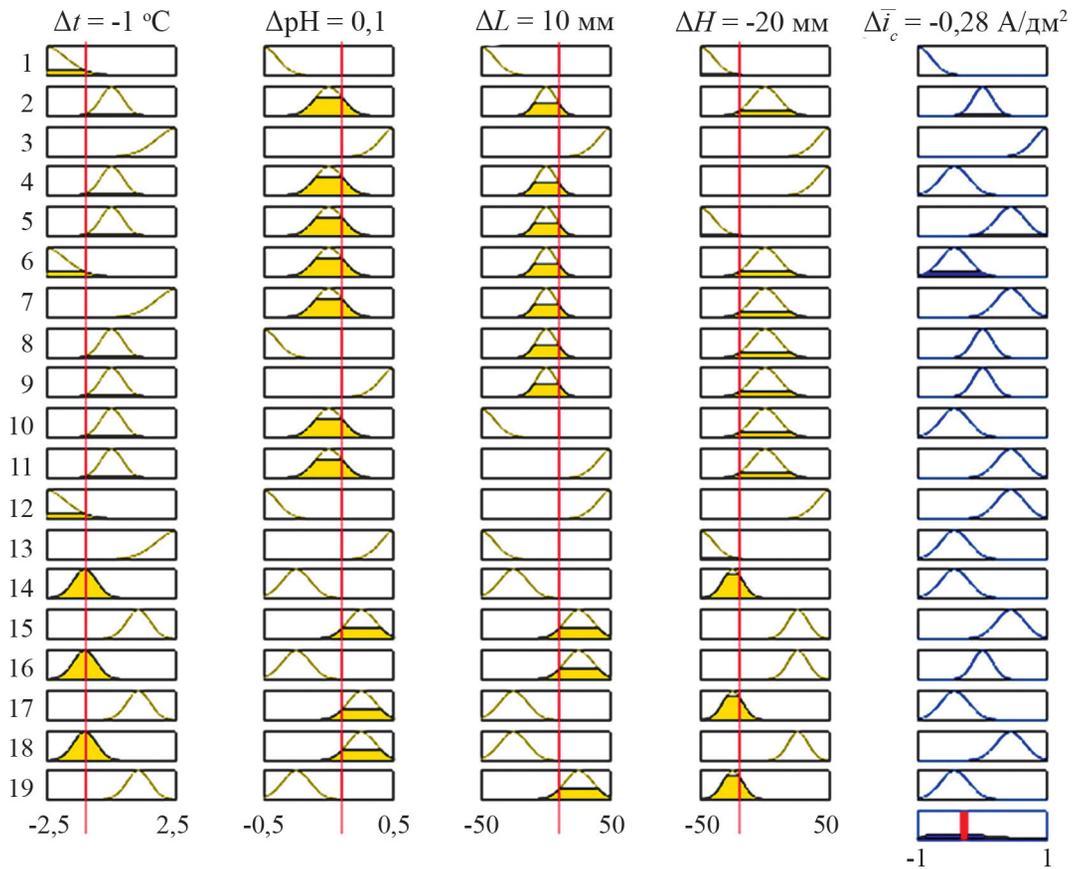


Рис. 2. Процесс получения значения выходной переменной $\Delta \bar{i}_c$ по правилам нечеткой продукционной модели знаний на примере значений входных переменных $\Delta t = -1$ °C; $\Delta \rho H = 0,1$; $\Delta L = 10$ мм; $\Delta H = -20$ мм

и с коррекцией величины плотности тока, становится минимальным (доходит до 0,13%).

Данные результаты объясняются тем, что первое слагаемое в свертке (4) вычисляется для процесса с распределенными координатами (1), в отличие от второго слагаемого, для которого прослеживается явная обратная связь по (2) для корректировки (9). Поэтому влияние корректировки (9) большим образом удастся учесть при увеличении веса первого слагаемого значением α , близким к единице, ввиду его нелинейной зависимости.

Заключение

Интеллектуализация этапов моделирования технологических процессов получения гальванических покрытий с требуемыми характеристиками — все более востребованная задача. Получение подобных покрытий невозможно только с применением математическо-

го аппарата оптимизации математических моделей на базе уравнений электрохимических процессов и требует использования опыта, знаний и интуиции технолога-гальваника, которые могут быть реализованы в виде нечеткой продукционной модели знаний.

Разработанная модель используется для коррекции найденных оптимальных технологических условий и геометрических факторов с учетом отклонений их значений при получении гальванических покрытий на реальном объекте.

Следует заметить, что для повышения точности расчета в традиционных математических моделях требуется убирать допущения, увеличивать количество уравнений и число узлов сетки вдоль каждой из координат, а для повышения точности расчета в нечеткой продукционной модели знаний необходимо изменение вида функций принадлежности термов, увеличение их числа и, как следствие, количества правил вывода, что представляется значительно более простой задачей.

Литература

1. Каданер Л.И. Равномерность гальванических покрытий. Харьков: Изд-во ХГУ, 1961.
2. Сторублев М.Л., Ивахненко А.Г. Управление качеством процесса нанесения гальванических покры-

References

1. Kadaner L.I. Ravnornost' Gal'vanicheskikh Pokrytiy. Khar'kov: Izd-vo KHGU, 1961. (in Russian).
2. Storublev M.L., Ivakhnenko A.G. Upravlenie Kachestvom Protsessa Nanesheniya Gal'vanicheskikh Po-

тий // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2009. № 2. С. 41—45.

3. **Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Кадырбаев Р.М.** Влияние температуры электролита и катодной плотности тока на качество и толщину гальванического покрытия при восстановлении работоспособности зеркальной поверхности гильз гидроцилиндров // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2015. № 3 (68). С. 16—22.

4. **Наумов Л.В.** Закономерности электроосаждения сплава кобальт-никель при различных режимах электролиза // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Серия «Технические науки»*. 2013. № 1 (25). С. 76—84.

5. **Люттов А.Г., Ишкулова А.Р.** Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // *Вестник Уфимского гос. авиационного технического ун-та*. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 45—48.

6. **Шульгин В.Г.** Распределение тока и повышение равномерности осаждения металлов в гальванотехнике и гальванопластике. Л.: ЛДНТП, 1983.

7. **Шеркунов В.Г., Редников С.Н., Власов А.Е., Тезе П.** Влияние динамики движения электролита в гальванической ванне на однородность наносимого покрытия // *Вестник МГТУ им. Г.Н. Носова*. 2016. Т. 14. № 3. С. 32—38.

8. **Solovjev D.S., Solovjeva I.A., Litovka Yu.V., Korobova I.L.** About One Counterexample of Applying Method of Splitting in Modeling of Plating Processes // *J. Physics: Conf. Series*. 2018. V. 1015. P. 032138.

9. **Jinxiang Z., Zaiman Z., Yanbin Q., Linru Y, Suqin W., Lianyu L.** pH Fuzzy Control of Automated Industrial Electroplating of Gold // *Chem. Eng. Techn.* 1997. V. 20. No. 8. Pp. 576—580.

10. **Jaya A.S.M., Kadir N.A.A., Jarrah M.I.M.** Modeling of Tin Coating Roughness Using Fuzzy Logic Approach // *Sci. Intern. (Lahore)*. 2014. V. 26. No. 4. Pp. 1563—1567.

11. **Джамбеков А.М.** Нечеткая система управления процессом каталитического риформинга // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2015. № 4 (32). С. 268—280.

12. **Мялик Я.В., Федулов А.С.** Моделирование систем управления двухколесной балансирующей платформой // *Вестник МЭИ*. 2016. № 3. С. 61—65.

13. **Анисимов Д.Н., Май Т.А.** Двухуровневая нечеткая система управления динамическими объектами // *Вестник МЭИ*. 2017. № 4. С. 101—109.

14. **Лесин В.В., Лисовец Ю.П.** Основы методов оптимизации. М.: Изд-во МАИ, 1995.

15. **Deconinck J.** Mathematical Modelling of Electrode Growth // *J. Appl. Electrochem.* 1994. V. 24. No. 3. Pp. 212—218.

16. **Агошков В.И., Дубовский П.Б., Шутяев В.П.** Методы решения задач математической физики. М.: Физматлит, 2002.

krytiy. *Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii*. 2009;2:41—45. (in Russian).

3. **Rakhimyanov Kh.M., Yanpol'skiy V.V., Kadyrbaev R.M.** Vliyanie Temperatury Elektrolita i Katodnoy Plotnosti Toka na Kachestvo i Tolshchinu Gal'vanicheskogo Pokrytiya pri Vosstanovlenii Rabotosposobnosti Zerkal'noy Poverkhnosti Gil'z Gidrotsilindrov. *Obrabotka Metallov (Tekhnologiya, Oborudovanie, Instrumenty)*. 2015; 3(68): 16—22. (in Russian).

4. **Naumov L.V.** Zakonomernosti Elektroosazhdeniya Splava Kobal't-nikel' pri Razlichnykh Rezhimakh Elektroliza. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Povolzhskiy Region. Seriya «Tekhnicheskie Nauki»*. 2013; 1(25):76—84. (in Russian).

5. **Lyutov A.G., Ishkulova A.R.** Modelirovanie Protssesa Naneseniya Gal'vanicheskikh Pokrytiy s Uchetom Geometricheskikh Konfiguratsiy Elektroodov. *Vestnik Ufimskogo Gos. Aviatsionnogo Tekhnicheskogo Un-ta*. 2015; 19;4 (70):45—48. (in Russian).

6. **Shul'gin V.G.** Raspredelenie Toka i Povyshenie Ravnornosti Osazhdeniya Metallov v Gal'vanotekhnike I Gal'vanoplastike. L.: LDNTP, 1983. (in Russian).

7. **Sherkunov V.G., Rednikov S.N., Vlasov A.E., Teze P.** Vliyanie Dinamiki Dvizheniya Elektrolita v Gal'vanicheskoy Vanne na Odnorodnost' Nanosimogo Pokrytiya. *Vestnik MGTU im. G.N. Nosova*. 2016; 14;3:32—38. (in Russian).

8. **Solovjev D.S., Solovjeva I.A., Litovka Yu.V., Korobova I.L.** About One Counterexample of Applying Method of Splitting in Modeling of Plating Processes. *J. Physics: Conf. Series*. 2018;1015:032138.

9. **Jinxiang Z., Zaiman Z., Yanbin Q., Linru Y, Suqin W., Lianyu L.** pH Fuzzy Control of Automated Industrial Electroplating of Gold. *Chem. Eng. Techn.* 1997;20;8:576—580.

10. **Jaya A.S.M., Kadir N.A.A., Jarrah M.I.M.** Modeling of Tin Coating Roughness Using Fuzzy Logic Approach. *Sci. Intern. (Lahore)*. 2014;26;4:1563—1567.

11. **Dzhambekov A.M.** Nechetkaya Sistema Upravleniya Protssesom Kataliticheskogo Riforminga. *Prikaspiyskiy Zhurnal: Upravlenie i Vysokie Tekhnologii*. 2015; 4 (32):268—280. (in Russian).

12. **Myalik Ya.V., Fedulov A.S.** Modelirovanie Sistem Upravleniya Dvukhkolesnoy Balansiruyushchey Platformoy. *Vestnik MEI*. 2016;3:61—65. (in Russian).

13. **Anisimov D.N., May T.A.** Dvukhurovnevaya Nechetkaya Sistema Upravleniya Dinamicheskimi Ob'ektami. *Vestnik MEI*. 2017;4:101—109. (in Russian).

14. **Lesin V.V., Lisovets Yu.P.** Osnovy Metodov Optimizatsii. M.: Izd-vo MAI, 1995. (in Russian).

15. **Deconinck J.** Mathematical Modelling of Electrode Growth. *J. Appl. Electrochem.* 1994;24;3:212—218.

16. **Agoshkov V.I., Dubovskiy P.B., Shutyaev V.P.** Metody Resheniya Zadach Matematicheskoy Fiziki. M.: Fizmatlit, 2002. (in Russian).

17. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989.
18. Агладзе Р.И. и др. Прикладная электрохимия. М.: Химия, 1984.
19. Левин А.И. Теоретические основы электрохимии. М.: ГНТИЛЧЦМ, 1963.
20. Miller G.A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two // The Psychological Rev. 1956. V. 63. Pp. 81—97.
21. Mamdani E. Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // Proc. IEEE. 1974. V. 121. No. 12. Pp. 1585—1588.
22. Тарасян В.С. Пакет Fuzzy Logic Toolbox for Matlab. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013.
23. Любарский Ю.Я. Интеллектуальные информационные системы. М.: Наука, 2016.
17. Samarskiy A.A., Gulin A.V. Chislennye Metody. M.: Nauka, 1989. (in Russian).
18. Agladze R.I. i dr. Prikladnaya Elektrokimiya. M.: Khimiya, 1984. (in Russian).
19. Levin A.I. Teoreticheskie Osnovy Elektrokhimii. M.: GNTILCHTSM, 1963. (in Russian).
20. Miller G.A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. The Psychological Rev. 1956;63:81—97.
21. Mamdani E. Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. Proc. IEEE. 1974;121;12:1585—1588.
22. Tarasyan V.S. Paket Fuzzy Logic Toolbox for Matlab. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2013.
23. Lyubarskiy Yu.Ya. Intellektual'nye Informatsionnye Sistemy. M.: Nauka, 2016. (in Russian).

Сведения об авторе:

Соловьев Денис Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Information about author:

Solovjev Denis S. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Mathematical Modeling and Information Technology, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 17.12.2018

The article received to the editor: 17.12.2018