

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 519.853, 004.942

ПОИСК СИЛЫ ТОКА И СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ БАРАБАНА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ¹

Статья поступила в редакцию 21.03.2022, в окончательном варианте – 25.04.2022.

Соловьева Инна Александровна, ¹Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106; ²Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33,

¹аспирант, ²ассистент, ORCID: 0000-0002-1798-1859, e-mail: good.win32@yandex.ru

Соловьев Денис Сергеевич, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Литовка Юрий Владимирович, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5792-340X, e-mail: polychem@list.ru

В работе проводится анализ существующих исследований по оптимизации конструктивных параметров барабанов и режимов электролиза для снижения неравномерности гальванического покрытия мелких деталей. На основе проведенного анализа формулируется задача поиска силы тока и степени загрузки барабана для минимизации неравномерности получаемого покрытия. Для поставленной задачи предлагается математическая модель, которая учитывает глубину проникновения тока внутрь барабана и потери металла на истирание. Приводится анализ решения задачи оптимизации путем ее декомпозиции на две подзадачи, решаемые методами «золотого сечения» и пристрелки. Демонстрация решения задачи оптимизации приводится для никелирования установочного цилиндрического штифта М 5х36.

Ключевые слова: неравномерность покрытия, гальванический процесс, барабан, мелкие детали, математическая модель, оптимизация

SEARCH THE CURRENT AND THE DEGREE OF BARREL-SHAPED CAGE LOADING TO REDUCE THE NON-UNIFORMITY FOR THE PLATING COATING OF SMALL DETAILS

The article was received by the editorial board on 21.03.2022, in the final version – 25.04.2022.

Solovjeva Inna A., ¹Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation; ²Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

¹postgraduate student, ²Assistant, ORCID: 0000-0002-1798-1859, e-mail: good.win32@yandex.ru

Solovjev Denis S., Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Litovka Yuri V., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

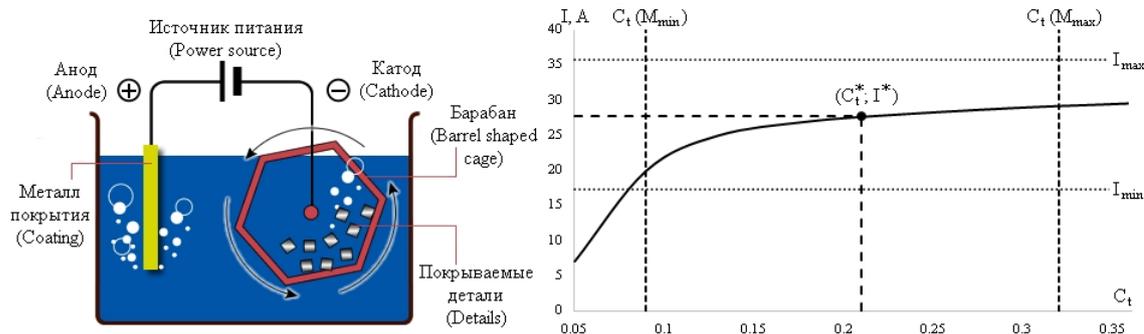
Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-5792-340X, e-mail: polychem@list.ru

The article provides an analysis for existing research on optimizing the design parameters of barrel-shaped cages and electrolysis modes to reduce the coating non-uniformity of small details. The problem of searching the current and the degree of barrel-shaped cage loading to minimize the non-uniformity of the plating coating is formulated on the analysis basis. A mathematical model that considers the current penetration depth into the load and metal losses due to abrasion is proposed to solve the problem. The analysis to the optimization problem solution is carried out by decomposition into two subproblems, which are solved by the golden section and shooting methods. Demonstration of the optimization problem solution is given for nickel plating of the locating cylindrical pin M 5x36.

Keywords: non-uniformity coating; plating process; barrel-shaped cage; small details; mathematical model; optimization

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90019.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Гальванические покрытия используются для защиты деталей от коррозии, придания им специальных свойств и улучшения внешнего вида [1]. К основным факторам, определяющим качество получаемого покрытия, относится его равномерность [2]. Как правило, гальваническое покрытие наносится путем «подвешивания» покрываемой металлической детали в растворе электролита. Однако данный подход имеет следующие недостатки: трудоемкость «подвешивания» больших объемов мелких деталей; использование подвесок может оставить следы на деталях, что приведет к ухудшению качества гальванического покрытия. Поэтому гальванические покрытия на мелкие детали наносят, как правило, в насыпном виде, загрузив их в ванну с барабаном [3]. Вращающиеся барабаны используются для избавления от трудоемких операций монтажа деталей на подвесочные приспособления, которые снижают производительность технологического процесса в целом. Условие получения покрытия на деталях с использованием вращающихся барабанов имеет существенные отличия от получения покрытия с использованием подвесок [4–6]. В процессе нанесения покрытия детали непрерывно перемешиваются, то есть периодически они могут оказываться на внешней поверхности или внутри загрузки. На поверхности деталей изменяется плотность тока из-за изменения их положения относительно анодов. Вследствие потери контакта с катодными токоподводами или массой загруженных деталей они могут оказываться неполяризованными. Кроме того, происходит механическое взаимодействие деталей друг с другом. Поэтому каждая из одновременно покрываемых деталей может иметь в конце процесса случайное значение толщины, которое обуславливается влиянием совокупности факторов. Исследованию влияния факторов на равномерность толщины получаемого таким способом покрытия посвящено множество работ. В работе [7] исследуется влияние диаметра барабана. В работе [8] исследуется влияние количества отверстий и их размеров на поверхности барабана. В работе [9] исследуется влияние температуры и состава электролита. В работе [10] исследуется влияние скорости вращения барабана и длительности гальванического процесса. Из проведенного анализа следует, что отсутствуют работы, посвященные исследованию влияния силы тока и степени загрузки барабана с использованием математических моделей процесса, которые учитывают глубину проникновения тока внутрь барабана и потери металла на истирание.

Целью статьи является поиск силы тока и степени загрузки барабана для снижения неравномерности гальванического покрытия мелких деталей.

Материалы и методы. Гальванический процесс нанесения покрытия предполагает размещение мелких деталей внутри барабана, изготавливаемого обычно из полипропилена. Барабан содержит центральные стержни, которые проводят электрический ток. Барабан с деталями медленно вращается при погружении в электролитический раствор, тем самым обеспечивая перекачивание деталей. При этом ион металла восстанавливается до металлического покрытия на поверхности деталей под действием электрического поля. В свою очередь свежий раствор электролита снаружи барабана непрерывно поступает внутрь через небольшие отверстия в его стенке, а прореагировавший раствор и водород, образующийся в процессе нанесения покрытия, также выводятся из барабана через них. Сущность гальванического процесса нанесения покрытия на мелкие детали с использованием барабана показана на рисунке 1.

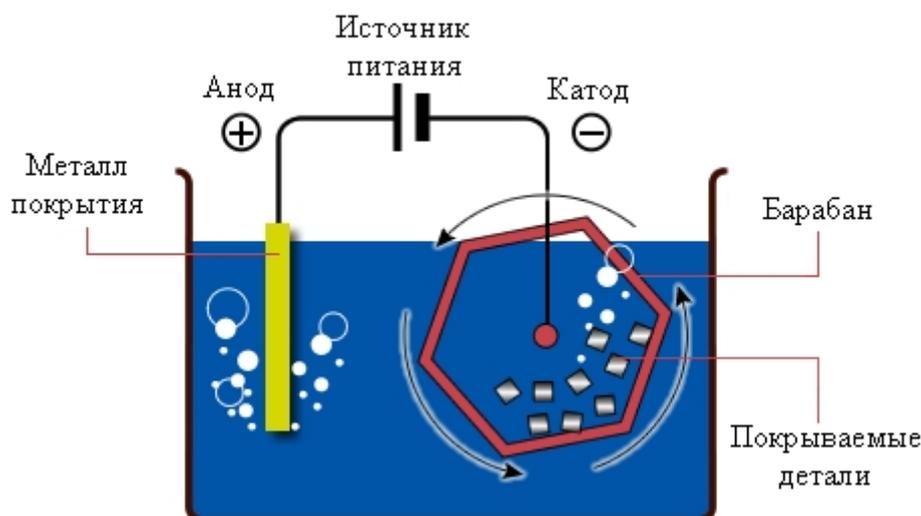


Рисунок 1 – Гальванический процесс нанесения покрытия на мелкие детали с использованием барабана

Критерием оптимизации технологического процесса выступает неравномерность толщины покрытия мелких деталей в барабане. Неравномерность толщины гальванического покрытия определяется согласно:

$$\sigma = K\bar{h}/\sqrt{\Delta\tau}, \quad (1)$$

где K – коэффициент разброса; \bar{h} – средняя толщина покрытия; $\Delta\tau$ – длительность процесса.

Для связи критерия оптимизации с искомой силой тока и степенью загрузки барабана составим математическую модель.

Средняя толщина покрытия определяется согласно закону Фарадея:

$$\bar{h} = k\eta i_a \Delta\tau / [\rho(1 + \xi)], \quad (2)$$

где k – электрохимический эквивалент; η – выход по току; i_a – анодная плотность тока; ρ – плотность; ξ – коэффициент потерь на истирание (0.2...0.4 – для мягких металлов, 0.4...0.6 – для твердых металлов).

В качестве допущения предположим: поверхность внутри барабана представляет собой идеально гладкий цилиндр и загруженные в него детали движутся в режиме переката вокруг центра в точке C (рис. 2). Последнее допущение применимо в случае, когда барабан загружен деталями менее чем на половину.

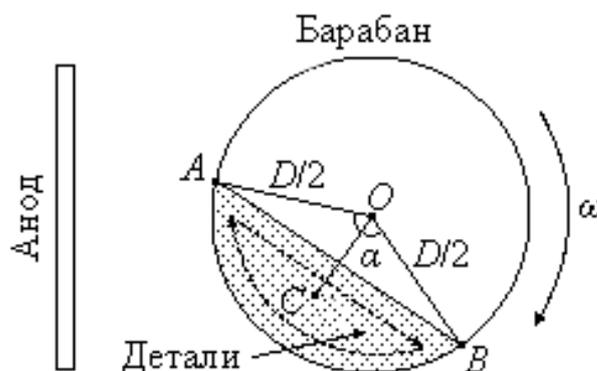


Рисунок 2 – Схема переката деталей внутри барабана

Коэффициент разброса определяется согласно:

$$K = \sqrt{\alpha(\gamma D f - 1) \left(1 + 360 \omega D \sin 0.5\alpha / (c\nu) \right) / (360 \omega E)}, \quad (3)$$

где α – угол к крайним точкам AB области с деталями в барабане; D – диаметр барабана; f – фактор загрузки; ω – скорость вращения барабана; γ – параметр распределения тока; E – эффективность перемешивания; ν – скорость падения деталей.

Угол к крайним точкам AB области с деталями в барабане определяется согласно:

$$\alpha = \arcsin \sin 2C_1 \pi + \sin 2C_1 \pi, \quad (4)$$

где C_1 – коэффициент загрузки барабана.

Параметр распределения тока определяется согласно:

$$\gamma = \sqrt{S_c z F i_0 / (V_c \chi R T)}, \quad (5)$$

где S_c – площадь детали; F – постоянная Фарадея; V_c – объем детали; z – количество электронов; R – универсальная газовая постоянная; χ – удельная электропроводность электролита; i_0 – плотность тока обмена; T – температура электролита.

Фактор загрузки определяется согласно:

$$f = 0.125(\alpha/360 - 0.5/\pi \sin \alpha - V_d/V_b) / (f_0 \cdot \alpha/360 - 1/\pi \sin 0.5\alpha), \quad (6)$$

где f_0 – коэффициент перфорации стенок барабана; V_d, V_b – объемы катодных контактов и барабана.

Эффективность перемешивания определяется согласно:

$$E = 4 \left(1 - (2/3 \cdot \cos 0.5\alpha + 1/3)^2 \right) / (L(\alpha - \sin \alpha)), \quad (7)$$

где L – длина барабана.

Объем барабана определяется согласно:

$$V_b = 0.25\pi L D^2. \quad (8)$$

С одной стороны, коэффициент загрузки барабана определяется согласно:

$$C_t = M / (\rho_m V_b), \quad (9)$$

с другой стороны:

$$C_t = V_b / V_z, \quad (10)$$

где M – масса загрузки; ρ_m – насыпная плотность; V_z – объем загрузки.

Количество деталей определяется согласно:

$$n = [M / M_c], \quad (11)$$

где M_c – масса детали.

Площадь загрузки определяется согласно:

$$S_z = n S_c. \quad (12)$$

При размещении в барабане между деталями образуются зазоры, в связи с чем засыпанные детали представляют собой пористый электрод. Вследствие этого распределение тока неравномерно по всей структуре расположения деталей. Для получения наиболее равномерного покрытия необходимо учитывать факт проникновения тока внутрь загрузки. В качестве допущения примем, что детали, засыпанные в барабан, представляют собой электрод, сечением которого является окружность – эквивалентный электрод (рис. 3а). Тогда площадь деталей в активной зоне (зоне проникновения тока) определяется согласно:

$$S_a = \pi W L S_z (D - W) / V_z, \quad (13)$$

где W – глубина проникновения тока.

Плотность тока на глубине W от внешней поверхности электрода определяется согласно:

$$i = i_a \exp\left(-W \sqrt{r_a^2 S_a \delta} / (V_z W)\right), \quad (14)$$

где δ – перенапряжение на границе «электролит – металл»; r_a – радиус эквивалентного электрода.

Сила тока через площадь деталей в активной зоне определяется согласно закону Ома в дифференциальной форме:

$$I = i_a S_a. \quad (15)$$

Из (14) следует, что глубина проникновения тока внутрь загрузки зависит от отношения площади деталей в активной зоне к объему загрузки. Тогда глубина проникновения тока в барабанах меньшего размера будет выше, чем в барабанах большего размера при одинаковом объеме загрузки (рис. 3б). Таким образом, распределение плотности тока в барабане большего размера будет более неравномерным по сравнению с барабаном меньшего размера.

Радиус эквивалентного электрода определяется согласно:

$$r_a = \sqrt{S_z / \pi}. \quad (16)$$

Перенапряжение на границе «электролит – металл» определяется согласно уравнению Тафеля:

$$\delta = 2.3RT \ln(i_a / i) / (zF). \quad (17)$$

Известно, что в электролитах с высокой рассеивающей способностью получается гальваническое покрытие с наименьшей неравномерностью. Рассеивающая способность определяется согласно:

$$H = (W V_z) / (r_a^2 S_a) \partial \delta / \partial i. \quad (18)$$

На поверхности пористого электрода при $H \geq 1$ распределение плотности тока близко к равномерному. При $H < 1$ из-за концентрации плотности тока вблизи свободной поверхности пористого электрода равномерность снижается.

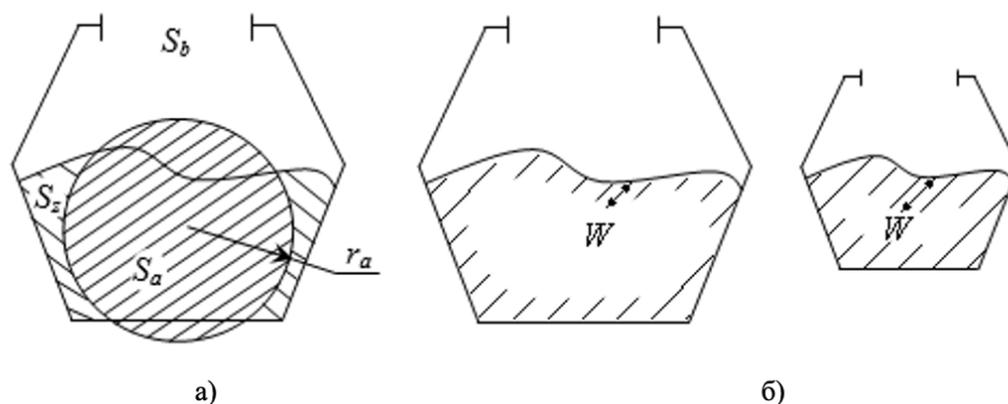


Рисунок 3 – Поперечное сечение барабана с эквивалентным электродом (а) и глубина проникновения тока внутрь загрузки при уменьшении размеров барабана (б)

Сформулируем задачу оптимизации. Найти силу тока I и коэффициент загрузки C_i деталей в барабане, для которых неравномерность (1) гальванического покрытия будет минимальной при уравнениях (2)–(18) и ограничениях:

$$\Delta\tau \leq \tau_{\max}, \quad (19)$$

$$\bar{h} \geq h_{\min}, \quad (20)$$

$$M_{\min} \leq M \leq M_{\max}, \quad (21)$$

$$i_{\min} \leq i_a \leq i_{\max}, \quad (22)$$

где τ_{\max} – максимальная длительность процесса (определяется производительностью гальванической линии в целом); M_{\min} – минимальная масса загрузки (определяется заданной производительностью барабана); h_{\min} – минимальная толщина покрытия, несоблюдение которой приводит к браку детали; M_{\max} – максимальная масса загрузки (обусловлена особенностью конструкции барабана); i_{\max} – предельно допустимая плотность тока, выше которой качество покрытия снижается; i_{\min} – минимальная плотность тока, ниже которой гальваническое покрытие не осаждается.

Проведем анализ влияния ограничений (19), (20) на критерий (1). Согласно уравнению (3), коэффициент разброса не зависит от времени. Тогда с учетом $\Delta\tau = const$ минимальное значение неравномерности толщины гальванического покрытия (1) будет получаться при $\bar{h} = h_{\min}$ в (2). Следовательно, (1) примет

вид $\sigma = const / \sqrt{\Delta\tau}$ и будет иметь минимальное значение при $\Delta\tau = \tau_{\max}$. Коэффициент загрузки (3) не зависит от силы тока I , а зависит от степени загрузки C_i . Для расчета I по (15), согласно (13), (14), необходимо знать глубину проникновения тока внутрь загрузки W . Однако для расчета распределения плотности тока i в (14) необходимо знать распределение перенапряжения δ , которое, согласно (17), также зависит от плотности тока. Поэтому для расчета распределения перенапряжения используется формула (15), которая получает первоначальное распределение плотности тока.

Таким образом, задача оптимизации разбивается на две подзадачи: внешнюю и внутреннюю. Внешняя подзадача сводится к одномерной задаче поиска минимума коэффициента разброса одним из методов одномерной оптимизации на отрезке $[M_{\min}/(\rho_m V_b), M_{\max}/(\rho_m V_b)]$. По найденному минимуму коэффициента разброса во внутренней подзадаче определяется распределение перенапряжения одним из методов решения краевых задач и осуществляется поиск значения глубины проникновения тока внутрь загрузки, исходя из распределения плотности тока и перенапряжения.

Экспериментальная часть. Решение задачи оптимизации осуществим на примере поиска силы тока и коэффициента загрузки барабана для никелирования установочного цилиндрического штифта М 5 х 36. В таблице 1 приводятся значения параметров, используемых в расчете уравнений (2)–(18).

В таблице 2 приводятся значения ограничений (19)–(22), используемых при решении задачи оптимизации неравномерности гальванического покрытия.

Для решения внешней подзадачи использовался метод «золотого сечения» [11]. Для решения внутренней подзадачи использовался метод пристрелки [12]. Поиск решения задачи оптимизации осуществлялся в разработанном программном обеспечении [13].

Таблица 1 – Значения параметров

Параметр		Значение
Барабан	L , см	60
	D , см	22,5
	ω , об/ч	480
	f_0	0,22
	V_d , см ³	800
	v , см/ч	31500
Деталь	S_c , см ²	6,04
	V_c , см ³	0,71
	M_c , г	5,53
	ρ_m , г/см ³	5
Гальванический процесс	i_0 , А/см ²	0,001
	ε	0,4
	ρ , г/см ³	8,9
	k , г/(А·ч)	1,095
	H	0,97
	Z	2
	T , К	313
	χ , 1/(Ом·см)	0,5
	F , Кл/моль	96484,56
	R , Дж/(моль·К)	8,31

Таблица 2 – Значения ограничений

Параметр		Значение
Барабан	M_{\min} , г	10000
	M_{\max} , г	40000
Гальванический процесс	h_{\min} , МКМ	8
	τ_{\max} , ч	0,5
	i_{\min} , А/см ²	0,015
	i_{\max} , А/см ²	0,030

Результаты и их обсуждение. На рисунке 4 показаны зависимости плотности тока и рассеивающей способности электролита от глубины проникновения тока внутрь загрузки. На глубине $W > 0,93$ см от внешней поверхности S_a плотность тока i отсутствует, а рассеивающая способность электролита снижается ($H < 1$), тем самым увеличивая неравномерность покрытия.

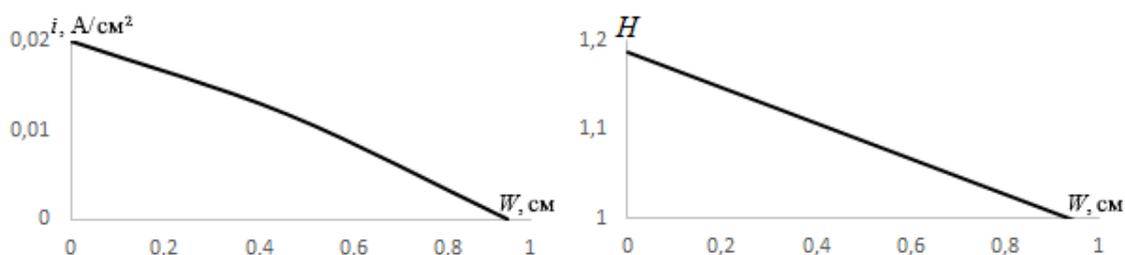


Рисунок 4 – Зависимость плотности тока (слева) и рассеивающей способности электролита (справа) от глубины проникновения тока внутрь загрузки

На рисунке 5 показана область допустимых решений (располагается между прямыми $C_t(M_{\min})$ и $C_t(M_{\max})$, I_{\min} и I_{\max}) и оптимальное решение (C_t^* ; I^*) для задачи оптимизации.

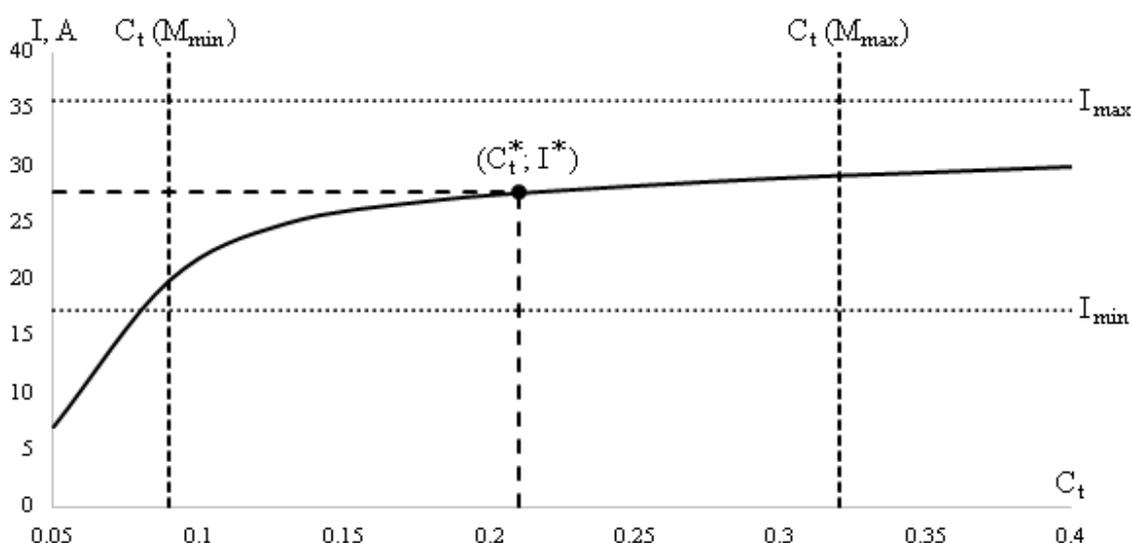


Рисунок 5 – Область допустимых решений и оптимальное решение задачи оптимизации

В таблице 3 приводятся найденные значения параметров в результате решения задачи оптимизации неравномерности гальванического покрытия.

Таблица 3 – Найденные значения параметров

Параметр		Значение
Барабан	C_t	0,21
	$S_z, \text{см}^2$	19270
	$M, \text{г}$	25062
Гальванический процесс	$i_a, \text{А/см}^2$	0,002
	$S_a, \text{см}^2$	1379
	$I, \text{А}$	27,64
	$\sigma, \text{мкм}$	0,508

Таким образом на $n = [M/M_c] = [25062/5,53] = 4532$ деталях установочного цилиндрического штифта $M 5 \times 36$ средняя толщина никелевого покрытия составит $\bar{h} = h_{\min} + \sigma = 8 + 0.508 = 8.508$ мкм.

Заключение. Проблема получения гальванического покрытия с заданной толщиной и минимальной неравномерностью возникает при управлении технологическим процессом. Для гальванического процесса нанесения покрытий на мелкие детали с использованием барабанов имеется ряд специфических особенностей, связанных с необходимостью улучшения качества наносимых покрытий в условиях ужесточающихся требований к ним. Решение проблемы усложняется противоречивостью экспериментальных исследований о воздействии параметров процесса и барабана на равномерность покрытия. Выходом из сложившейся ситуации является оптимизация параметров гальванического процесса и барабана с использованием разработанной математической модели, которая учитывает глубину проникновения тока внутрь барабана и потери металла на истирание. Улучшение качества наносимых покрытий повлечет за собой уменьшение брака и перерасхода металла, что в итоге снизит себестоимость обработки деталей.

Библиографический список

1. Гамбург, Ю. Д. Теория и практика электроосаждения металлов / Ю. Д. Гамбург, Дж. Зангари. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 438 с.
2. Помогаев, В. М. Прогнозирование равномерности осаждения гальванических покрытий / В. М. Помогаев, А. В. Волкович, И. В. Петроченкова, А. Е. Шувакин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 3. – С. 103–106.
3. Singleton, R. Fundamentals of barrel plating / R. Singleton, E. Singleton // Metal Finish. – 2011. – Vol. 109 (8). – P. 14–22.
4. Purcar, M. 3D electrode shape change simulation in electroplating / M. Purcar, C. Munteanu, V. Topa // Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique. – 2013. – Vol. 58. – P. 252–262.
5. Лютов, А. Г. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 4 (70). – С. 45–48.
6. Соловьев, Д. С. Применение решения обратной задачи математического моделирования гальванического процесса для оптимизации неравномерности толщины покрытия / Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева, Ю. В. Литовка // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1 (49). – С. 131–143.

7. Караваев, В. И. Оптимизация гальванических процессов в ваннах с барабанами с целью повышения равномерности покрытия / В. И. Караваев, Ю. В. Литовка // Журнал прикладной химии. – 2004. – Т. 77, № 9. – С. 1481–1486.
8. Han, K. H. Barrel plating process specification for undercoating with copper cyanate / K. H. Han, S. B. Lee, I. K. Hong // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2012. – Vol. 18 (3). – P. 888–897.
9. Hong, I. K. Optimization of barrel plating process for electroless Ni-P plating / I. K. Hong, H. Kim, S. B. Lee // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – Vol. 20 (5). – P. 3767–3774.
10. Yanagishita, T. Fabrication of Porous Si Particles by Barrel Anode Etching / T. Yanagishita, S. Ueno, K. Taniguchi, H. Masuda // Chemistry Letters. – 2016. – Vol. 45 (7). – P. 708–710.
11. Измаилов, А. Ф. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – Москва : Физматлит, 2008. – 320 с.
12. Самарский, А. А. Численные методы математической физики / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва : Научный мир, 2000. – 358 с.
13. Соловьева, И. А. Оптимизация гальванических процессов для деталей, покрываемых насыпью в барабанах / И. А. Соловьева, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022613030, дата регистрации 01.03.2022.

References

1. Gamburg, Yu. D., Zangari, G. *Teoriya i praktika elektroosazhdeniya metallov* [Theory and practice of metal electrodeposition]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2015. 438 p.
2. Pomogaev, V. M., Volkovich, A. V., Petrochenkova, I. V., Shuvakin, A. E. Prognozirovaniye ravnomernosti osazhdeniya galvanicheskikh pokrytiy [Uniformity of electroplate deposition prediction]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2007, vol. 50, no. 3, pp. 103–106.
3. Singleton, R., Singleton E. Fundamentals of barrel plating. *Metal Finish*, 2011, vol. 109 (8), pp. 14–22.
4. Purcar, M., Munteanu, C., Topa, V. 3D electrode shape change simulation in electroplating. *Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique*, 2013, vol. 58, pp. 252–262.
5. Lutov, A. G., Ishkulova, A. R. Modelirovaniye protsessa naneseniya galvanicheskikh pokrytiy s uchetom geometricheskikh konfiguratsiy elektrodov [Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2015, vol. 19, no. 4 (70), pp. 45–48.
6. Solovyev, D. S., Solovyeva, I. A., Litovka, Yu. V. Primeneniye resheniya obratnoy zadachi matematicheskogo modelirovaniya galvanicheskogo protsessa dlya optimizatsii neravnomernosti tolschiny pokrytiya [Inverse problem solution of the mathematical modeling for galvanic process to optimize the non-uniformity of the coating thickness]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 1 (49), pp. 131–143.
7. Karavaev, V. I., Litovka, Yu. V. Optimizatsiya galvanicheskikh protsessov v vannakh s barabanami s tselyu povysheniya ravnomernosti pokrytiya [Optimization of electroplating processes in drum baths to obtain a more uniform coating]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2004, vol. 77, no. 9, pp. 1481–1486.
8. Han, K. H., Lee, S. B., Hong, I. K. Barrel plating process specification for undercoating with copper cyanate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, vol. 18 (3), pp. 888–897.
9. Hong, I. K., Kim, H., Lee, S. B. Optimization of barrel plating process for electroless Ni-P plating. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, vol. 20 (5), pp. 3767–3774.
10. Yanagishita, T., Ueno, S., Taniguchi, K., Masuda, H. Fabrication of Porous Si Particles by Barrel Anode Etching. *Chemistry Letters*, 2016, vol. 45 (7), pp. 708–710.
11. Izmailov, A. F., Solodov, M. V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 320 p.
12. Samarsky, A. A., Gulina, A. V. *Chislennyye metody matematicheskoy fiziki* [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2000. 358 p.
13. Solovyeva, I. A., Solovyev, D. S., Litovka, Yu. V. Optimizatsiya galvanicheskikh protsessov dlya detaley, pokryvaemykh nasypyu v barabanakh [Optimization of electroplating processes for parts coated in bulk barrels]. *Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM* [The Certificate on official registration of the computer program], no. 2022613030, registration date 01.03.2022.