

ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВАННАХ С БАРАБАНАМИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ ПОКРЫТИЯ

© В.И.Караваяев, Ю.В.Литовка

Тамбовский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 6 апреля 2004 г.

Рассмотрена задача оптимизации процесса нанесения гальванического покрытия в барабанных электролизерах с точки зрения критерия стандартного отклонения толщины покрытия на деталях.

Равномерность нанесенного слоя металла является одним из основных показателей качества гальванических покрытий, получаемых в ваннах с барабанами. Задачи получения заданной или минимально возможной дисперсии толщины покрытия возникают как на стадии проектирования электрохимических систем, так и при управлении технологическим процессом. Решение этих задач усложняется отсутствием разработанной теории процесса и противоречивостью экспериментальных данных о влиянии параметров системы на равномерность покрытия.

В технических условиях на изготовление деталей с гальваническими покрытиями, как правило, указана минимально допустимая толщина осадков, исходя из которой устанавливают длительность процесса электролиза. Если осаждение покрытий неравномерное, то по достижении минимально допустимой толщины осадков на одних участках, на других – толщина осадков может превышать минимальную в несколько раз. Это приводит к непроизводительному увеличению расхода осаждаемого металла, электролита и электроэнергии, снижает производительность гальванического оборудования, повышает себестоимость выпускаемой продукции.

При выборе составов электролитов и параметров режима электролиза, а также конструкции оборудования и загрузочных устройств стремятся обеспечить получение наиболее равномерных по толщине осадков на различных участках деталей.

В качестве критерия оптимизации, как правило, используют среднее квадратичное отклонение σ толщины покрытия на деталях от средней толщины покрытия (этот критерий в ряде работ именуется «стандартное отклонение»).

Основными факторами, влияющими на выбранный критерий, являются сила тока I , степень загрузки барабана C_1 , частота вращения барабана ω и параметры барабана: диаметр D и степень перфорации стенок f_0 . Выберем в качестве варьируемых переменных I , C_1 и D . Тогда для оптимизации барабанного электролизера необходимо найти силу тока I , степень за-

грузки барабана C_1 и диаметр барабана D , при которых стандартное отклонение толщины покрытия $\sigma(I, C_1, D)$ минимально:

$$\sigma(I, C_1, D) \longrightarrow \min$$

при связях, определяемых уравнениями математической модели и технологических ограничениях.

Частным случаем поставленной задачи оптимизации является поиск технологических переменных – силы тока I и степени загрузки C_1 для готового барабана. В этом случае необходимо найти силу тока I и степень загрузки барабана C_1 , при которых стандартное отклонение толщины покрытия $\sigma(I, C_1)$ минимально:

$$\sigma(I, C_1) \longrightarrow \min.$$

Для связи выбранного критерия с варьируемыми переменными составим систему уравнений математической модели. Теоретические представления о процессе и обобщения экспериментальных данных легли в основу предложенного в работе [1] уравнения связи между величиной стандартного отклонения толщины покрытия, наносимого на детали во вращающемся барабане, и параметрами системы:

$$\sigma = K \bar{h} \Delta \tau^{-0.5}, \quad (1)$$

где K – фактор разброса, \bar{h} – средняя толщина покрытия, $\Delta \tau$ – продолжительность процесса электроосаждения.

Средняя толщина покрытия определяется из уравнения

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n},$$

где h_i – толщина осадка на поверхности i -той детали, n – количество деталей в барабане.

Фактор разброса K определяется с помощью формулы

$$K = \left[(\gamma D f_e - 1) \frac{\alpha}{360 \omega E_m} \left(1 + \frac{\omega D \sin(\alpha/2)}{V_1 \alpha / 360} \right) \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где γ – параметр распределения тока; D – диаметр барабана; f_e – фактор загрузки; α – центральный угол, противоположный загрузке; ω – скорость вращения барабана; E_m – эффективность перемешивания деталей; V_1 – скорость падения деталей (в работе [1] рекомендовано брать $V_1 = 525$ см·мин⁻¹).

Параметр γ определяется геометрией обрабатываемых деталей и свойствами электролита в соответствии с уравнением

$$\gamma = [(S/V_z) Z F i_0 / (\chi R T)]^{0.5}, \quad (3)$$

где S/V_z – отношение общей поверхности загрузки к ее объему; i_0 – плотность тока обмена (физический смысл данной величины – скорость реакции обмена ионами между металлом и раствором при равновесии; табличная величина, определяемая типом электрода и составом электролита); χ – удельная электропроводность раствора; Z – число электронов, участвующих в электрохимической реакции; $F = 96484.56$ Кл·моль⁻¹ – постоянная Фарадея; $R = 8.31433$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура раствора.

С учетом того что $V_z = n V_{\text{дет}} S = n S_{\text{дет}}$, где $V_{\text{дет}}$ и $S_{\text{дет}}$ – объем и площадь одной детали соответственно,

$$S/V_z = S_{\text{дет}}/V_{\text{дет}}$$

Тогда формула (3) примет вид

$$\gamma = [(S_{\text{дет}}/V_{\text{дет}}) Z F i_0 / (\chi R T)]^{0.5}.$$

Фактор загрузки f_e рассчитывается по уравнению [2]

$$f_e = \frac{\alpha/360 - 1/(2\pi)\sin\alpha - V_d/V_b}{8[f_0\alpha/360 - 1/\pi\sin(\alpha/2)]}, \quad (4)$$

где V_d – объем катодных контактов, V_b – объем барабана, f_0 – степень перфорирования стенок барабана.

Степень загрузки барабана C_t называется величиной, определяемая по формуле

$$C_t = V_z/V_b. \quad (5)$$

Рассмотрим сечение круглого барабана, перпендикулярное его оси (рис. 1).

Заштрихованная область – часть барабана, в которой находятся детали. Пусть L – длина барабана, тогда $V_b = S_b L$ и $V_z = S_z L$, где S_b – площадь сечения

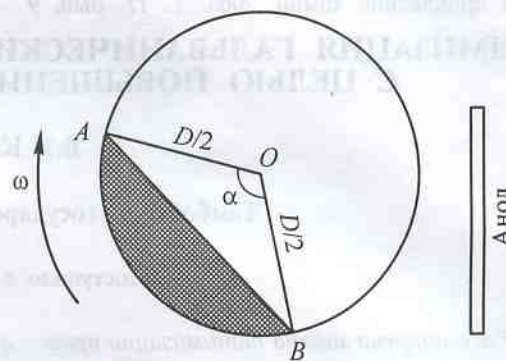


Рис. 1. Схема барабанного электролизера в сечении.

барабана, S_z – площадь сечения загрузки. Отсюда

$$C_t = S_z/S_b. \quad (6)$$

Площадь сечения барабана определяется как

$$S_b = \pi D^2/4,$$

а площадь загрузки определим как разницу площадей сектора AOB и треугольника AOB :

$$S_z = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\pi D^2}{4} - \frac{1}{2} \frac{D^2}{4} \sin\alpha.$$

Тогда уравнение (6) приводим к виду

$$C_t S_b = S_z,$$

$$C_t \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\pi D^2}{4} - \frac{1}{2} \frac{D^2}{4} \sin\alpha,$$

$$C_t \pi = \alpha/2 - \sin(\alpha/2),$$

$$\alpha = \sin\alpha + 2C_t \pi. \quad (7)$$

Из уравнения (7), зная степень загрузки барабана, можно определить центральный угол α (рад), противоположный загрузке.

В работе [1] эффективность перемешивания E_m определена как число беспорядочных перемешиваний загрузки, деленное на число оборотов барабана, или, иначе, число беспорядочных перемешиваний загрузки, приходящееся на один оборот барабана.

Примем допущение – барабанный электролизер является вращающимся гладким барабаном, в котором происходит движение сыпучего вещества – засыпанных деталей. Вещество в барабане находится в режиме переката и циркулирует вокруг точки C – центра циркуляции (рис. 2).

Показано [3], что среднее время τ_c одного цикла циркуляции материала вокруг точки C можно определить как

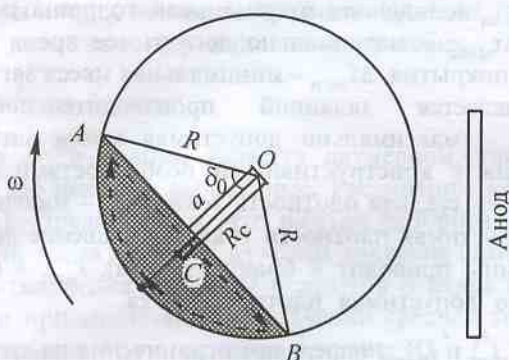


Рис. 2. Схема циркуляции деталей в барабане.

$$\tau_c = \frac{2Q}{4\rho_{\text{нас}}\omega(R^2 - R_c^2)},$$

где $Q = 1/2L\rho R^2(2\delta_0 - \sin 2\delta_0)$ – общее количество материала в барабане, R – радиус барабана, $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность материала, δ_0 – значение углов AOC и COB (рис. 2), R_c – расстояние от оси барабана до центра циркуляции C .

Тогда

$$\tau_c = \frac{LR^2(2\delta_0 - \sin 2\delta_0)}{4\omega(R^2 - R_c^2)}. \quad (8)$$

Так как $\tau_c \geq 0$ и $Q \geq 0$, то из выражения (8) следует, что $R^2 - R_c^2 > 0$, $R > R_c$ или $R_c < R$. Данное условие выполняется, если барабан загружен менее чем на половину. Следовательно, $C_1 < 0.5$. Среднее число N циклов циркуляции за время Δt пребывания в барабане

$$N = \Delta t / \tau_c. \quad (9)$$

Тогда при Δt , равном времени одного оборота, $N = E_m$. Время одного оборота

$$\tau_1 = 1/\omega. \quad (10)$$

Объединив формулы (8)–(10) и учитывая, что $2\delta_0 = \alpha$, получим

$$E_m = \frac{4}{L(\alpha - \sin \alpha)} \left[1 - \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \right].$$

В работе [4] приведена методика расчета R_c , из которой следует, что, как правило, центр циркуляции C находится на расстоянии одной трети глубины загрузки от поверхности загрузки. Тогда

$$R_c = a + 1/3(R - a) = (2a + R)/3 = (2R \cos \delta_0 + R)/3 = R/3 [2 \cos(\alpha/2) + 1].$$

Отсюда

$$E_m = \frac{4}{1(\alpha - \sin \alpha)} \left[1 - \left(\frac{2 \cos(\alpha/2) + 1}{3} \right)^2 \right]. \quad (11)$$

Значение средней толщины покрытия \bar{h} на деталях одной загрузки определяется на основе закона Фарадея [5]:

$$\bar{h} = \frac{\mathcal{E} \eta}{\rho_M} i \Delta t, \quad (12)$$

где η – выход по току, \mathcal{E} – электрохимический эквивалент осаждаемого металла ($\text{г} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$), ρ_M – плотность осаждаемого металла ($\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$), i – средняя плотность тока ($\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$).

При перемещении деталей внутри барабана происходит их интенсивное перемешивание. В результате механических воздействий часть нанесенного покрытия стирается, что особенно заметно при электроосаждении мягких металлов (цинка, олова и т. п.). В работе [6] введен коэффициент потерь на истирание ξ , который принимает следующие значения: 20–40% – для твердых металлов, 40–60% – для мягких. С учетом коэффициента ξ уравнение (12) принимает вид

$$\bar{h} = \frac{\mathcal{E} \eta}{\rho_M (1 + 0.01\xi)} i \Delta t. \quad (13)$$

Плотность тока есть отношение силы тока I к площади S_a поверхности слоя деталей, обращенной к аноду:

$$i = I/S_a. \quad (14)$$

Допустим, что поверхность, обращенная к аноду есть прямоугольник со сторонами AB и L (рис. 1). Сторона $AB = D \sin(\alpha/2)$. Тогда площадь S_a определяется как

$$S_a = LD \sin(\alpha/2). \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) уравнение (13) принимает вид

$$\bar{h} = \frac{\mathcal{E} \eta}{\rho_M (1 + 0.01\xi)} \frac{I}{LD \sin(\alpha/2)} \Delta t. \quad (16)$$

Определим, как зависит площадь загрузки S_z от степени загрузки барабана C_1 .

При условии, что в барабане покрываются одинаковые детали, площадь загрузки

$$S_z = nS_{\text{дет}}$$

Из уравнения (5) следует, что объем загрузки $V_z = C_1 V_b$. Насыпную плотность можно определить как

$$\rho_{\text{нас}} = M/V_z,$$

где M – масса загрузки.

Откуда $M = \rho_{\text{нас}} V_z = \rho_{\text{нас}} C_1 V_b$. Тогда количество деталей в барабане

$$n = M/M_{\text{дет}} = \rho_{\text{нас}} C_1 V_b / (\rho_{\text{дет}} V_{\text{дет}}),$$

где $M_{\text{дет}}$ – масса одной детали, $\rho_{\text{дет}}$ – плотность детали.

Площадь загрузки

$$S_z = n S_{\text{дет}} = C_1 V_b S_{\text{дет}} / V_{\text{дет}} \rho_{\text{нас}} / \rho_{\text{дет}}$$

Математическая постановка задачи оптимизации с учетом построенной математической модели выглядит следующим образом: необходимо найти силу тока I , степень загрузки барабана C_1 и диаметр барабана D , при которых стандартное отклонение толщины покрытия $\sigma(I, C_1, D)$ минимально:

$$\sigma(I, C_1, D) \rightarrow \min,$$

Уравнения связи:

$$\sigma = K h \Delta \tau^{-0.5},$$

$$\bar{h} = \frac{\partial \eta}{\rho_m (1 + 0.01 \xi)} \frac{I}{LD \sin(\alpha/2)} \Delta \tau,$$

$$K = \left[(\gamma D f_e - 1) \frac{\alpha}{360 \omega E_m} \left(1 + \frac{\omega D \sin(\alpha/2)}{V_1 \alpha / 360} \right) \right]^{0.5},$$

$$E_m = \frac{4}{L(\alpha - \sin \alpha)} \left[1 - \left(\frac{2 \cos(\alpha/2) + 1}{3} \right)^2 \right],$$

$$f_e = \frac{\alpha/360 - 1/(2\pi) \sin \alpha - V_d/V_b}{8[f_0 \alpha/360 - 1/\pi \sin(\alpha/2)]},$$

$$\gamma = [(S_{\text{дет}}/V_{\text{дет}}) Z F i_0 / (\chi RT)]^{0.5}, \quad (17)$$

$$\alpha = \sin \alpha + 2C_1 \pi,$$

$$i = I/S_a,$$

$$M = C_1 V_b \rho_{\text{нас}},$$

$$V_b = L \pi D^2 / 4.$$

Ограничения:

$$\bar{h} \geq h_{\text{мин}}, \quad (18)$$

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

$$M_{\text{мин}} \leq M \leq M_{\text{макс}}, \quad (20)$$

$$i_{\text{мин}} \leq i \leq i_{\text{макс}}, \quad (21)$$

где $h_{\text{мин}}$ – заданная минимальная толщина покрытия, $\Delta \tau_{\text{макс}}$ – максимально допустимое время нанесения покрытия, $M_{\text{мин}}$ – минимальная масса загрузки (определяется заданной производительностью), $M_{\text{макс}}$ – максимально допустимая масса загрузки (связана с конструктивными особенностями барабана), i – средняя плотность тока, $i_{\text{макс}}$ – максимально допустимая плотность тока (превышение данной величины приводит к браку изделий), $i_{\text{мин}}$ – минимально допустимая плотность тока.

Зная $i_{\text{мин}}$ и $i_{\text{макс}}$, определим ограничения на силу тока: $I_{\text{мин}} = S_a i_{\text{мин}}$, $I_{\text{макс}} = S_a i_{\text{макс}}$ при фиксированном значении площади поверхности S_a слоя деталей, обращенного к аноду. Решение задачи оптимизации начнем с частного случая как наиболее простого.

Первоначально необходимо провести анализ существования решения задачи оптимизации. Решение существует, если существует область допустимых решений, задаваемая ограничениями (18), (20)–(21) (рис. 3).

Графики функций $i = i_{\text{мин}}$, $i = i_{\text{макс}}$ и $h = h_{\text{мин}}$ есть кривые, исходящие из начала координат. Угол наклона этих кривых прямо пропорционален значению плотности тока i . Для первой функции $i = i_{\text{мин}}$, для второй $i = i_{\text{макс}}$, для третьей $i = i_{h_{\text{мин}}}$, где $i_{h_{\text{мин}}}$ – значение плотности тока, при которой толщиной покрытия равна $h_{\text{мин}}$. Значение $i_{h_{\text{мин}}}$ можно найти из уравнения (13):

$$i_{h_{\text{мин}}} = \frac{h_{\text{мин}} (1 + 0.01 \xi) \rho_m}{\partial \eta \Delta \tau}.$$

Условие существования области допустимых решений, а значит, и самого решения таково: график функции $h = h_{\text{мин}}$ должен проходить выше графика

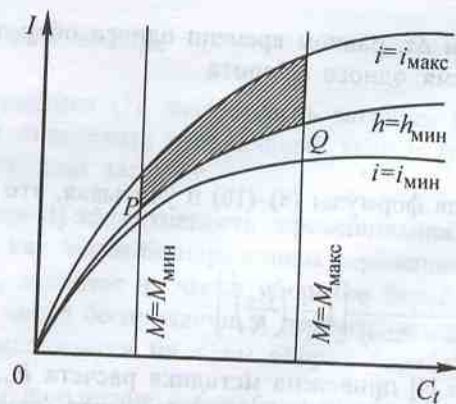


Рис. 3. Ограничения и область допустимых решений задачи оптимизации.

I – сила тока (А), C_1 – степень загрузки барабана (%); то же для рис. 4–6.

$i = i_{\text{мин}}$ и $i = i_{\text{макс}}$ – кривые ограничений на среднюю плотность тока i , $M = M_{\text{мин}}$ и $M = M_{\text{макс}}$ – прямые ограничения на массу загрузки M , $h = h_{\text{мин}}$ – кривая ограничения на толщину наносимого покрытия h .

функции $i=i_{\text{мин}}$, но ниже графика функции $i=i_{\text{макс}}$, а это возможно при выполнении условия

$$i_{\text{мин}} \leq i_{h_{\text{мин}}} \leq i_{\text{макс}} \quad (22)$$

Задача оптимизации является двумерной, так как в ней две искомые переменные. Рассмотрим уравнение (1). Предположим, что фактор разброса K постоянен, тогда с учетом $\Delta\tau=\text{const}$ значение стандартного отклонения толщины покрытия σ будет минимально при минимальном значении средней толщины покрытия h , т.е. искомое решение (C_1^*, I^*) будет лежать на кривой $h=h_{\text{мин}}$ в области допустимых решений (отрезок PQ).

Минимальное значение стандартного отклонения толщины покрытия $\sigma=K h_{\text{мин}} \Delta\tau^{-0.5}$. Фактор разброса K не зависит от $\Delta\tau$. Тогда $\sigma=\text{const} \cdot \Delta\tau^{-0.5}$. Следовательно, с ростом времени нанесения покрытия $\Delta\tau$ убывает стандартное отклонение толщины покрытия σ , а минимальное значение σ наблюдается при $\Delta\tau=\Delta\tau_{\text{макс}}$, поэтому неравенство (19) преобразуется в равенство $\Delta\tau=\text{const}=\Delta\tau_{\text{макс}}$.

Функция фактора разброса K не зависит от значения силы тока I , а определяется только значением степени загрузки C_1 . Тогда, определив значение C_1^* , при котором функция фактора разброса $K(C_1)$ принимает минимальное значение, можно точно определить положение искомого решения задачи оптимизации на кривой $h=h_{\text{мин}}$ в области допустимых решений:

$$I^* = Si_{h_{\text{мин}}} = LD \sin(\alpha/2) i_{h_{\text{мин}}} \quad (23)$$

Таким образом, двумерная задача оптимизации сводится к одномерной задаче поиска минимума функции $K(C_1)$ на отрезке $[C_{1P}, C_{1Q}]$, где

$$C_{1P} = M_{\text{мин}} / (\rho_{\text{нас}} V_b),$$

$$C_{1Q} = M_{\text{макс}} / (\rho_{\text{нас}} V_b).$$

Для решения общей задачи оптимизации, которая является трехмерной, рассматривали частные случаи при различных значениях диаметра барабанного электролизера D .

Минимальное значение стандартного отклонения толщины покрытия $\sigma=K h_{\text{мин}} \Delta\tau^{-0.5} = K(D)\text{const}$. В формуле (2) для фактора разброса K диаметр D стоит в числителе с положительным знаком, поэтому с ростом D значение стандартного отклонения толщины покрытия σ увеличивается. Таким образом, минимальное значение σ достигается при минимально возможных значениях диаметра D .

Тогда решение общей задачи оптимизации проводят так: начиная с $D_{\text{мин}}$ с шагом ΔD увеличивают значение D до тех пор, пока не будет существовать допустимая область решений [выполнение условия

(22)]. Этот диаметр принимается за оптимальный D^* . Далее находят минимум функции $K(C_1)$ на отрезке $[C_{1P}, C_{1Q}]$ одним из методов одномерной оптимизации (например, методом деления отрезка пополам). По найденному оптимальному значению C_1^* определяют по формуле (23) оптимальное значение силы тока I^* .

Таким образом, на последнем этапе решения трехмерной задачи оптимизации используется одномерный алгоритм.

При использовании ограничения (18) возможны отклонения толщины покрытия в меньшую сторону от среднего значения для большого количества деталей. Более правильным будет использование ограничения вида

$$\bar{h} - \sigma \geq h_{\text{мин}},$$

$$\bar{h} \geq h_{\text{мин}} + \sigma. \quad (24)$$

Значение стандартного отклонения толщины покрытия σ будет минимальным при минимальном значении \bar{h} , т.е. при

$$\bar{h} = h_{\text{мин}} + \sigma,$$

Координата C_1^* соответствует минимуму функции $K(C_1)$. Значение I^* можно вычислить по значению \bar{h} и C_1^* с помощью формул (7) и (16).

Необходимо добиться выполнения условия (24). Для этого пользуются следующим методом

1. Задают начальное значение $\sigma^{(0)}=0$. Принимают $h_{\text{мин}}=h_{\text{мин}}+\sigma^{(0)}$. Решают задачу оптимизации с ограничением (18). В результате получают оптимальное значение $\sigma^{(1)}$.
2. Принимают $h_{\text{мин}}=h_{\text{мин}}+\sigma^{(1)}$. Решают задачу оптимизации с ограничением (18). В результате получают оптимальное значение $\sigma^{(2)}$ и т.д.

Продолжают до тех пор, пока не выполнится условие

$$|\sigma^{(i+1)} - \sigma^{(i)}| \leq \epsilon,$$

где i – номер итерации, ϵ – заданная точность.

В исследовании проведено решение задачи оптимизации режима работы барабанной ванны никелирования. В качестве примера взят барабанный электролизер со следующими параметрами: диаметр $D=22.5$ см, длина $l=60$ см, частота вращения $\omega=8$ об \times мин $^{-1}$, степень перфорации стенок $f_0=22\%$.

Характеристики наносимого металла (никеля) и электролита: электрохимический эквивалент $\mathcal{E}=1.095$ г \cdot А $^{-1} \cdot$ ч $^{-1}$; выход по току $\eta=0.97$; коэффициент истирания $\xi=40\%$; количество электронов, учас-

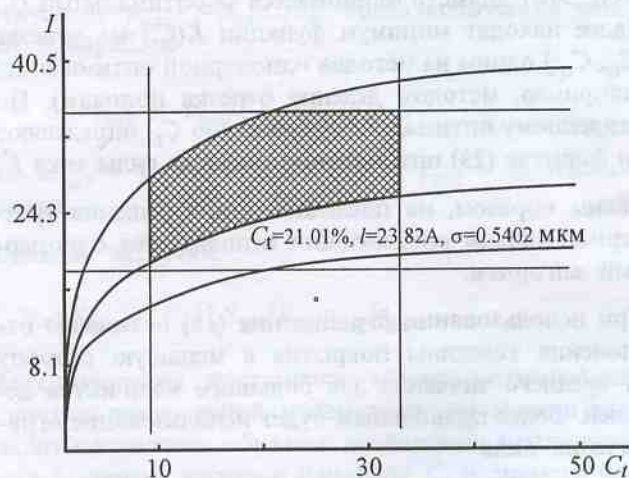


Рис. 4. Решение задачи оптимизации режима работы барабанного электролизера для ограничения $10 \leq M \leq 40$ кг.

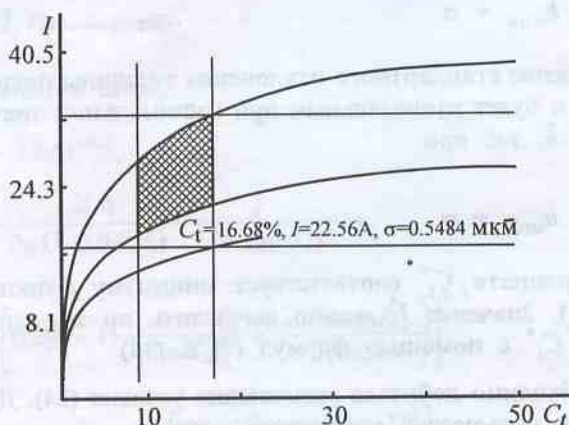


Рис. 5. Решение задачи оптимизации режима работы барабанного электролизера для ограничения $10 \leq M \leq 20$ кг.

твующих в электролизе, $z = 2$; плотность тока обмена $i_0 = 0.001 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$; удельная электрическая проводимость $\chi = 0.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$; температура электролита $T = 313 \text{ К}$; плотность металла $\rho_m = 8.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Производится никелирование деталей площадью $S_{\text{дет}} = 6 \text{ см}^2$ и объемом $V_{\text{дет}} = 1 \text{ см}^3$. Плотность материала детали $\rho_{\text{дет}} = 7.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, насыпная плотность $\rho_{\text{нас}} = 5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, время нанесения покрытия $\Delta t = 30$ мин. Минимальная допустимая толщина покрытия $h_{\text{мин}} = 8 \text{ мкм}$. Ограничение на массу загрузки $10 \leq M \leq 40 \text{ кг}$, ограничение на плотность тока $1.5 < i < 3 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$.

В результате решения получен следующий результат (рис. 4): степень загрузки барабана $C_t = 21.01\%$, сила тока $I = 23.82 \text{ А}$, стандартное отклонение $\sigma = 0.5402 \text{ мкм}$, средняя толщина покрытия $\bar{h} = 8.5402 \text{ мкм}$, площадь загрузки $S = 1.927 \text{ м}^2$, масса загрузки $M = 25.06 \text{ кг}$, плотность тока $i = 2.004 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$, ограничения на силу тока $17.84 < I < 35.67 \text{ А}$.

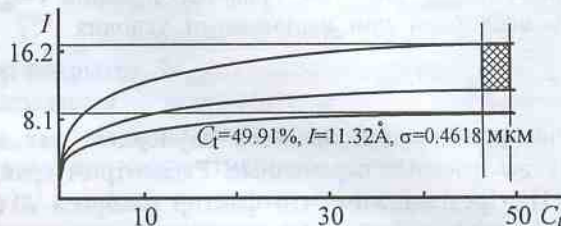


Рис. 6. Решение задачи оптимизации на этапе проектирования барабанного электролизера.

При изменении ограничения на массу загрузки ($10 \leq M \leq 20 \text{ кг}$) получен следующий результат (рис. 5): степень загрузки барабана $C_t = 16.68\%$, сила тока $I = 22.56 \text{ А}$, стандартное отклонение $\sigma = 0.5484 \text{ мкм}$, средняя толщина покрытия $\bar{h} = 8.5484 \text{ мкм}$, площадь загрузки $S = 1.531 \text{ м}^2$, масса загрузки $M = 19.91 \text{ кг}$, плотность тока $i = 2.006 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$, ограничения на силу тока $16.87 < I < 33.75 \text{ А}$.

В результате решения задачи на этапе проектирования барабанного электролизера, когда кроме технологических ведется поиск конструктивных параметров, получен следующий результат (рис. 6): диаметр барабана $D = 9.5 \text{ см}$, степень загрузки барабана $C_t = 49.91\%$, сила тока $I = 11.32 \text{ А}$, стандартное отклонение $\sigma = 0.4618 \text{ мкм}$, средняя толщина покрытия $\bar{h} = 8.4618 \text{ мкм}$, площадь загрузки $S = 0.8163 \text{ м}^2$, масса загрузки $M = 10.61 \text{ кг}$, плотность тока $i = 1.985 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$, ограничения на силу тока: $8.55 < I < 17.1 \text{ А}$.

Выводы

Поставлена и решена задача оптимизации барабанного электролизера с точки зрения критерия стандартного отклонения толщины покрытия на деталях от среднего значения. Осуществлен анализ области определения оптимизационной задачи. Разработан алгоритм поиска оптимальных параметров барабанного электролизера.

Список литературы

- [1] Craig S.E., Harr R.E., Mathiessen P. // Plating. 1974. N 12. P. 1101-1110.
- [2] Журавлев Б.Л., Кайдриков Р.А., Нуриев Н.К. и др. // Прикладная электрохимия. Казань, 1987. С. 61-64.
- [3] Першин В.Ф. // Хим. и нефт. машиностроение. 1986. № 12. С. 15-16.
- [4] Першин В.Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990. 168 с.
- [5] Андреев И.Н., Ившин Я.В., Кайдриков Р.А. и др. // Прикладная электрохимия. Казань, 1980. С. 66-67.
- [6] Лобанов С. Практические советы гальванику. Л.: Машиностроение, 1983. 248 с.