

ВЫБОР РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ХРОМИРОВАНИЯ ПО ЗАДАНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ МНОГОМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА

Смиловенко О.О., Жилинский О.В., Жорник В.И., Лактюшина Т.В.*,
Штемплюк Р.Г.** (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
*ИТМО НАН Беларуси, ** НП ЗАО «Синта», г.Минск, Беларусь)

The decision of the multi criteria task arising at research and designing of multiparametrical nonlinear stochastic technological system «a chromum covering» with given properties for the cylinder of a suspension bracket of the supersize automobile is offered. This the completely formalized method allows in a mode of synthesis to find technically optimum meanings of parameters of technological process, at which observance the requirements of the given properties of a covering are carried out.

Среди разнообразных способов нанесения покрытий наибольшее распространение в промышленности получил метод электролитического осаждения металлов и сплавов. Хотя технологии осаждения качественных покрытий для повышения износо- и коррозионной стойкости деталей, электропроводности, паяемости, магнитных свойств и др. разработаны уже достаточно давно, резервы, связанные с улучшением этих функциональных характеристик, практически не исчерпаны [1].

Качественный смысл задачи создания любого покрытия всегда один и тот же: необходимо так выбрать параметры состава электролита и режимов технологии, чтобы в условиях производства устойчиво получать покрытие с заданными свойствами.

Функционирование технологических систем по производству материалов происходит в условиях случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Случайность параметров технологической системы порождает случайность характеристик материала. Качество хромового покрытия зависит от химического состава электролита и режимов осаждения, каждый из этих параметров, в свою очередь, зависит от ряда факторов, обладающих стохастичностью. Химический состав электролита является случайной величиной, например, вследствие того, что имеются ошибки концентрации при приготовлении химических растворов. В процессе гальванического осаждения применяются различные поверхностно-активные вещества, характеристики которых не являются идентичными. Температура в зоне катода не может быть определена и установлена с высокой степенью точности, что также приводит к дрейфу этого параметра. Время выдержки детали в гальванической ванне в настоящее время определяется чаще всего экспериментальным путем, часто без учета взаимовлияния факторов, таких как химический состав ванны. На свойства получаемого хромового покрытия влияет также предварительная подготовка поверхности, как механическая обработка, так и химическая – обезжиривание, травление и т.д. Таким образом, параметры технологического процесса получения хромового покрытия не являются детерминированными, а имеют определенный интервал изменения, значения в котором располагаются случайным образом.

Целью настоящего исследования является выбор режимов процесса электролитического хромирования деталей подвески, в частности, цилиндра противодействия гидроамортизатора большегрузного автомобиля БелАЗ. К таким деталям предъявляются повышенные требования по точности изготовления и

износостойкости. В качестве упрочняющего покрытия выбрано хромирование, позволяющее получить на поверхности тонкий, но достаточно твердый слой.

Для постановки задачи и построения алгоритма её решения технологическая система представлена как область в абстрактном многомерном пространстве. Среда проектирования формируется как система из двух подсистем: 1) многомерное пространство управляющих параметров и 2) многомерное пространство критериев (характеристики материала и показатели качества технологической системы). Функциональные связи между подсистемами реализованы посредством алгоритмов прямого и обратного отображения [2].

Для описания технологической системы используется полная математическая модель, включающая причинно-следственную и теоретико-множественную подмодели объекта. Причинно-следственная подмодель технологической системы:

$$\begin{aligned} K_1 &= f_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \\ K_2 &= f_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \\ &\dots\dots\dots, \\ K_j &= f_j(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \\ &\dots\dots\dots, \\ K_m &= f_m(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \end{aligned}$$

где K_j – значения характеристик материала и показателей качества системы;
 $j = 1, m$; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – номинальные значения управляющих параметров.

Теоретико-множественная подмодель системы:

$$\begin{aligned} \Pi &= \{ \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) : (\alpha_i^* \leq \alpha_i \leq \alpha_i^{**}), i = \overline{1, n} \}, \\ Q &= \{ b = (b_1, b_2, \dots, b_m) : (b_j^* \leq b_j \leq b_j^{**}), j = \overline{1, m} \}, \\ F &: \Pi \rightarrow Q_1 \subset Q, \end{aligned}$$

где Π – n -мерное пространство управляющих параметров; α – набор управляющих параметров системы; α_i – номинальное значение i -го параметра; $\alpha_i^*, \alpha_i^{**}$ – соответственно нижнее и верхнее значения i -го управляющего параметра; Q – m -мерное множество критериев (показателей качества материала и технологической системы); b – набор критериев; b_j – номинальное значение j -го критерия; b_j^*, b_j^{**} – соответственно нижнее и верхнее значения j -го критерия; F – отображение, переводящее n -мерное множество параметров Π в m -мерное множество критериев $Q_1 \subset Q$.

Набор управляющих параметров $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ представляет собой комплекс, состоящий из режимов технологии. Управляющие параметры являются независимыми переменными величинами, каждая из которых варьируется в своем диапазоне:

$$\alpha_i^* \leq \alpha_i \leq \alpha_i^{**}, i = \overline{1, n}$$

Диапазоны изменения $D_i = [\alpha_i^*, \alpha_i^{**}]$ назначаются разработчиком и могут, например, соответствовать диапазонам варьирования параметров при натурном эксперименте. Множество $D = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$ представляет собой n -мерную априорно допустимую область значений вектора управляющих параметров $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, которая, как правило, является ограниченным гиперпараллелепипедом в n -мерном пространстве Π управляющих параметров. Каждой точке этого пространства соответствует конкретное сочетание параметров технологической системы. Набор

критериев b_1, b_2, \dots, b_m , представляет собой комплекс свойств материала и показателей качества технологического процесса получения материала. Каждый из критериев зависит от управляющих параметров и поэтому они являются взаимозависимыми. При определенных условиях можно найти обратное отображение F^{-1} переводящее m -мерное множество требуемых значений критериев (заданные свойства материала) в n -мерную область Π_0 в пространстве параметров Π . В области Π_0 с вероятностью, равной единице, выполняются требования по уровню свойств материала. Область $\Pi_0 \subset \Pi$ является областью устойчивости в пределах которой существует материал с заданными свойствами. Все варианты технологической системы, принадлежащие области устойчивости, эквивалентны.

В задаче проектирования качество материала оценивается набором взаимозависимых характеристик b_1, b_2, \dots, b_m , $j=1, \overline{m}$, которые определяются функциональным назначением деталей, на которые наносится хромовое покрытие. В качестве выходных показателей работоспособности покрытия могут быть выбраны такие характеристики (обозначаемые b_m) как твердость, прочность, трещиностойкость, жаростойкость, толщина покрытия, его шероховатость, электрические и магнитные свойства, обрабатываемость и т.д. Таким образом, одной из характерных особенностей системы «хромовое покрытие» является многокритериальность. Многокритериальность означает, что степень совершенства системы, качество ее функционирования зависят от нескольких выходных характеристик (показателей качества). Поэтому при проектировании системы надо учитывать вклад каждой из этих характеристик, приобретающих таким образом ранг критериев. В этом случае проектирование всегда происходит в условиях ряда ограничений, не позволяющих придавать всем показателям качества желаемые значения, т.к. увеличение одних неизбежно влечет за собой уменьшение других. Поэтому можно считать, что существует наиболее благоприятное соотношение между характеристиками, при котором степень совершенства системы при заданных ограничениях будет максимальной. Численные значения характеристик в этом случае считаются оптимальными. Ограничения и связи между показателями качества технологической системы приводят к необходимости идти на компромисс и выбирать для каждого показателя не максимально возможные в принципе значения, а значения, при которых и другие показатели будут иметь приемлемую величину.

В результате решения многокритериальной проектной задачи получают технически оптимальный вариант технологической системы, обеспечивающий получение материала с заданными свойствами. Для этого варианта кроме номинальных значений управляющих параметров, определяются максимально допустимые диапазоны изменения параметров при заданном наборе свойств материала. Схема проектирования технологической системы представлена комплексом проектных процедур: разработка технического задания; разработка плана натурального эксперимента; выполнение натурального эксперимента; разработка математической модели технологической системы; анализ реализуемости технического задания; оптимизация пространства управляющих параметров системы; выбор технически оптимального варианта технологической системы; построение дискретных и макроструктурных портретов пространства состояний

Исследование проводилось методом многомерного проектного синтеза на математической модели, содержащей уравнения, восстанавливающие взаимосвязи показателей качества хромовых покрытий с технологическими параметрами процесса их гальванического осаждения [3]:

$$K_1 = 270,07 + 36,93P_1 - 3,92P_2 - 0,50P_1^2 - 0,45P_2^2 + 0,20P_1P_2;$$

$$K_2=53,75-1,5P_1+0,42P_2+0,011P_1^2-0,002P_2^2-0,0009P_1P_2;$$

$$K_3=0,00152P_2P_3K_2;$$

где $K_1(H_v)$ – микротвердость хромового покрытия кГ/мм^2 ;

$K_2(w)$ – выход металла по току, %;

$K_3(h)$ – толщина покрытия, мкм ;

P_1 – температура электролита, $^{\circ}\text{C}$;

P_2 – плотность тока, А/дм^2 ;

P_3 – время осаждения, мин.

Исследование проводится при электролитическом осаждении в стандартном электролите.

Выбор технически оптимального варианта технологии осуществлен в результате решения обратной многокритериальной задачи в следующей постановке: определить номинальные значения технологических параметров $P_1 - P_3$ и максимально допустимые отклонения от номиналов, обеспечивающие выполнение требований по показателям качества $K_1 - K_3$.

В соответствии с процедурной моделью метода многомерного проектного синтеза сформировано трехмерное виртуальное пространство управляющих параметров объекта, ограниченное диапазонами максимально возможных изменений - технологических режимов независимых случайных величин $P_1 - P_3$:

$$P_1=(30 \div 75) ^{\circ}\text{C}; P_2=(20 \div 40) \%; P_3=(10 \div 30) \text{ мин.} \quad (1)$$

Пределы варьирования технологических параметров заданы разработчиком априори в предположении наличия в сформированном пространстве некоторого множества вариантов процесса электролитического осаждения хромового покрытия и, соответственно, вариантов покрытия с требуемыми свойствами.

Минимизация размеров пространства управляющих параметров, являющаяся следующей обязательной процедурой метода многомерного проектного синтеза, осуществлялась по признакам, характеризующим свойства покрытия и показатели процесса его получения. При этом из всего множества вариантов процесса были отобраны те, которые отвечают требованиям на показатели $K_1 - K_3$, в соответствии с которыми: микротвердость хромового покрытия, его толщина и выход металла по току должны находиться в следующих пределах:

$$H_v = 760 - 840 \text{ кГ/мм}^2; W = 15 - 25 \%; h = 20-40 \text{ мкм.} \quad (2)$$

Требования на показатели качества назначены исходя из технических требований на цилиндр противодавления, где указана толщина покрытия и твердость 60-63 HRC, что соответствует 760-800 единиц микротвердости по Викерсу. Показатель выхода металла по току отражает экономическую характеристику технологического процесса.

Решение проводилось компьютерным методом многомерного проектного синтеза. Отличительными чертами этого метода являются полная формализация постановки и решения обратной многокритериальной задачи и реализация стохастических подходов при системном виртуальном синтезе технически оптимального варианта гальванического процесса получения хромовых покрытий с заданными свойствами.

Результаты решения приведены в Таблицах 1 и 2.

Предоставляя разработчику сведения не только о номинальных значениях технологических параметров, но и о максимально допустимых отклонениях от

номиналов, метод тем самым четко определяет границы действия компенсаторных механизмов, способных обеспечить 100%-ную воспроизводимость свойств хромового покрытия при реализации технически оптимального варианта процесса.

Таблица 1. Технически оптимальные технологические параметры процесса осаждения хромового покрытия из электролита стандартного состава

N п/п	Параметр	Номинал	Разрешенные поля отклонений
1	Температура электролита, °С	35,3	±3,2
2	Плотность тока, А/дм ²	21,9	±1,1
3	Время осаждения, мин	26,7	±2,5

Таблица 2 . Значения показателей качества технически оптимального варианта

N п/п	Показатель качества	Значения показателей			
		Техническое задание	Проект		
			Номинальное	Нижнее	Верхнее
1	Микротвердость (H _v), кг/мм ²	760÷840	804,3	762,0	834,1
2	Выход металла по току (W), %	15÷25	22,0	19,4	24,8
3	Толщина покрытия (h), мкм	20÷40	19,5	15,2	25,0

Описание состояния и поведения технологии электролитического осаждения в терминах управляющих технологических параметров и их функций, представляющих собой заданные свойства покрытия и системные показатели качества, позволило выявить ведущие механизмы, определяющие физическую осуществимость и возможность практического освоения технически оптимального варианта. Речь идет о процессах образования диссипативных структур в многомерном виртуальном пространстве управляющих параметров, инициируемых случайным характером этих параметров, каждый из которых имеет свой диапазон возможных значений.

Возможность получения покрытия с заданными свойствами и выполнение требований к уровню воспроизводимости этих свойств определяются топологией виртуального пространства управляющих параметров, то есть конфигурацией, расположением и объемом диссипативных структур.

Графические представления, поясняющие сказанное, выполнены в виде дискретных (точечных) портретов трехмерного пространства управляющих параметров, сформированного по условиям (1). На рисунке 1 показана топология виртуального пространства параметров.

Точки в объеме представляют множество возможных вариантов процесса, которые определены наборами значений технологических режимов и соответствующими им наборами значений показателей качества. Варианты технологии, обеспечивающие получение хромового покрытия с заданными свойствами, обозначены светлыми точками. Они группируются в объемы, внутри которых изменение

технологических режимов не приводит к ухудшению качества покрытия. Все требования по уровню заданных свойств покрытия выполняются с вероятностью равной единице. Это области устойчивости, а объемы, где вероятность выполнения требований меньше единицы, – области неустойчивости.

При исследовании гальванического процесса нанесения хромового покрытия как многопараметрической стохастической и нелинейной технологической системы, было установлено, что параллелепипед управляющих параметров содержит большое число областей устойчивости и неустойчивости. Фрагментацию пространства технологических режимов определяет набор показателей качества и конкретные требования, предъявляемые к их уровню.

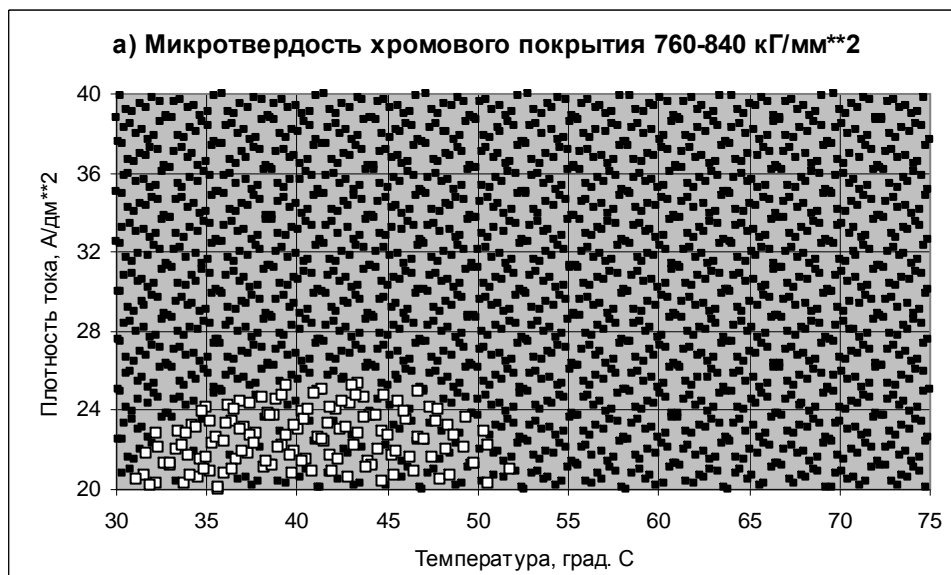


Рис. 1. Топология пространства управляющих параметров технологической системы «процесс электролитического нанесения хромовых покрытий»

Выводы. Предложено решение многокритериальных задач, возникающих при исследовании и проектировании многопараметрической нелинейной стохастической технологической системы «хромовое покрытие» с заданными свойствами.

Реализацию процедур системно-оптимизационного нераздельного проектирования системы «хромовое покрытие» предложено осуществлять на основе использования метода решения обратной многокритериальной задачи. Этот полностью формализованный метод позволяет в режиме синтеза находить технически оптимальные значения параметров технологического процесса, при соблюдении которых выполняются требования на свойства покрытия.

Список литературы: 1. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Металловедение покрытий. - М.: Металлургия, 1982, 250с. 2. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов. 23–28 августа 2004 г. Томск, Россия. – Физическая мезомеханика. – Т. 7. Спец. выпуск. Ч. 1. – С. 3–11. 3. Гибкие автоматизированные гальванические линии. Под ред. Зубченко В.Л. М.: Машиностроение. 1989. – 442 с.

Сдано в редакцию 23.05.07