

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Смиловенко О. О., Жилинский О. В., Жорник В. И.,
Лактюшина Т. В.*, Хоружая Ю. С.

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
*ИТМО НАН Беларуси,
Минск, Беларусь*

В связи с непрерывным развитием техники появляются все новые типы машин, при этом требования к их качеству постоянно возрастают, однако проблема поддержания устойчивой работоспособности машины актуальна как для существующего парка, так и для создающихся сегодня машин. Особенно важной становится эта задача в условиях сложившейся экономической нестабильности, когда соотношение «цена – качество» является практически главной характеристикой машины, а недостаточная надежность и частые отказы, и, следовательно, возрастающие расходы на ремонт и восстановление работоспособности, делают эксплуатацию машины экономически нецелесообразной. Таким образом, проблема прогнозирования надежности машин и разработки способов управления надежностью и качеством, начиная со стадии проектирования, и далее – при эксплуатации машины, является актуальной.

Рассмотрим более подробно структуру жизненного цикла сложной технической системы. Под жизненным циклом ТС понимается структура процесса ее разработки, производства и эксплуатации, охватывающего время от возникновения идеи создания системы до снятия ее с эксплуатации. Жизненный цикл, как правило, включает следующие стадии (фазы):

I. Формирование требований к системе и разработку технического задания (ТЗ).

II. Проектирование.

III. Изготовление, испытания и доводку опытных образцов технической системы.

IV. Серийное производство.

V. Эксплуатацию и целевое применение.

На всех стадиях жизненного цикла системы присутствует необходимость решения задачи оценки качества ее функционирования. На стадиях I и II – это задачи, связанные с синтезом системы с заданными свойствами, прогнозированием параметров и характеристик будущей системы, сравнением альтернативных вариантов системы с целью найти наиболее соответствующий поставленным целям. На стадиях III и IV необходима оценка выполнения системой ее функций и выбор рациональных параметров. На стадии V – эксплуатации системы – задача оценки качества функционирования присутствует в виде диагностирования состояния технической системы и управления ее параметрами с целью обеспечения работоспособности и надежности [1]. Процедура оценки качества функционирования технической системы с использованием метода статистического моделирования изложена ниже [2].

Пусть выбранный критерий работоспособности K (выходной параметр) зависит от ряда «внутренних» параметров системы

$$K = K(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad (1)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – конструктивные и эксплуатационно-технологические параметры, каждый из которых для конкретной системы в фиксированный момент времени может принимать любые значения из определенного для него интервала. Эти параметры обра-

зуют n -мерный многогранник объемом V , длина каждой из граней которого равна длине интервала соответствующего параметра в присущей ему размерности. Точки внутри данного многогранника характеризуют состояние системы по данному критерию при различных сочетаниях значений параметров.

Для реализации метода статистического моделирования в пространстве возможных изменений параметров выбираем N точек, для каждой из которых с помощью зависимости (1) находим значения критерия K . Значения критерия K располагаем в ряд по принципу возрастания. По полученной выборке значений строим кривую плотности распределения критерия $f(x)$. Таким образом, вводится понятие вероятностного критерия. Для каждого интервала Δ значений критерия K можно определить соответствующую вероятность $P = R \{ K \in \Delta \}$.

Большинство современных технических систем имеют в своем составе подвижные соединения деталей, образующие узлы трения различного типа. Развитие техники связано с повышением скоростей и нагрузок в узлах трения. Это обуславливает возрастающие требования к триботехническим и технологическим свойствам применяемых материалов. Выполнение этих требований возможно путем нанесения твердых износостойких покрытий. Среди разнообразных способов нанесения покрытий наибольшее распространение в промышленности получил метод электролитического осаждения металлов и сплавов. Хотя технологий 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 [3].

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. Однако 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 прогнозирование свойств электролитического покрытия деталей подвески, в частности, цилиндра противодействия гидромоторизатора 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.

Исследование проводилось методом многомерного проектного синтеза на математической модели, содержащей уравнения, восстанавливающие взаимосвязи показателей качества хромовых покрытий с технологическими параметрами процесса их гальванического осаждения [4].

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

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

$$K_3 = 0,00152P_2P_3K_2,$$

где $K_1(H_v)$ – микротвердость хромового покрытия, кг/мм^2 ; $K_2(W)$ – выход металла по току, %; $K_3(h)$ – толщина покрытия, $\mu\text{м}$; P_1 – температура электролита, $^{\circ}\text{C}$; P_2 – плотность тока, А/дм^2 ; P_3 – время осаждения, мин.

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 $K_1 - K_3$. Сформировано трехмерное виртуальное пространство управляющих параметров объекта, ограниченное диапазонами максимально возможных изменений – технологических режимов независимых случайных величин $P_1 - P_3$:

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

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. 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: $H_v = 760 - 840 \text{ кг/мм}^2$; $W = 9 - 25\%$; $h = 10 - 50 \mu\text{м}$. Решение проводилось компьютерным методом многомерного проектного синтеза. Отличительными чертами этого метода являются полная формализация постановки и решения задачи и реализация стохастических подходов при системном виртуальном синтезе технически оптимального варианта гальванического процесса получения хромовых покрытий с заданными свойствами. Результаты решения приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Технически оптимальные технологические параметры процесса

№ п/п	Параметр	Номинал	Разрешенные поля отклонений
1	Температура электролита, $^{\circ}\text{C}$	35,3	$\pm 3,2$
2	Плотность тока, А/дм^2	21,9	$\pm 1,1$
3	Время осаждения, мин	26,7	$\pm 2,5$

Таблица 2. Значения показателей качества технически оптимального варианта

№ 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), $\mu\text{м}$	15±25	19,5	15,2	25,0

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. Следует отметить, что такой объем информации не может предоставить ни один из методов синтеза, предлагаемых традиционной теорией и практикой проектирования [5].

Для процесса электролитического хромирования большое значение имеет вопрос повышения производительности, которое напрямую связано со снижением временных затрат на получение хромового покрытия требуемой толщины с заданными физико-механическими свойствами. При решении задачи в такой трактовке исходное пространство поиска было уменьшено за счет снижения верхнего предела по времени:

$$P_3 (\tau, \text{мин}) = 10 \div 17 \text{ мин};$$

и найден технически оптимальный вариант процесса, обеспечивающий максимальную производительность при сохранении заданного уровня его качества. Результат расчета представлен в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Технически оптимальные технологические параметры, обеспечивающие максимальную производительность процесса

N п/п	Параметр	Номинал	Разрешенные поля отклонений
1	Температура электролита, °С	35,5	±2,4
2	Плотность тока, А/дм ²	22,6	±1,0
3	Время осаждения, мин	15,9	±1,1

Таблица 4. Значения показателей качества технически оптимального варианта, обеспечивающего максимальную производительность процесса

N п/п	Показатель качества	Значения показателей			
		Техническое задание	Проект		
			Номинальное	Нижнее	Верхнее
1	Микротвердость (H_v), кг/мм ²	760÷840	794,0	760,2	820,4
2	Выход металла по току (W), %	9÷25	22,1	20,1	24,2
3	Толщина покрытия (h), мкм	10÷50	12,0	10,0	14,4

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 рис. 1,а показана топология виртуального пространства параметров в случае, когда требования на показатели качества заданы следующим образом $H_v = 760\text{--}840$ кг/мм²; $W = 9\text{--}25$ %; $h = 10\text{--}50$ мкм.

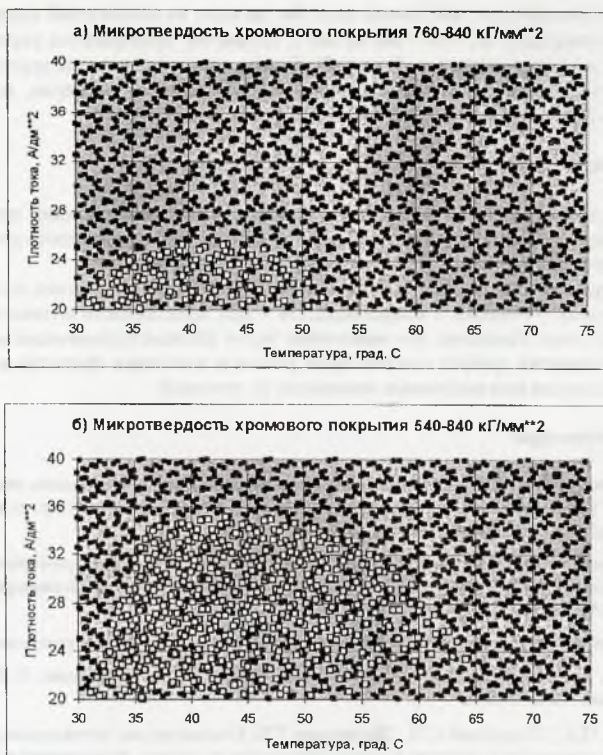


Рис. 1. Топология пространства управляющих параметров технологической системы «процесс электролитического нанесения хромистых покрытий»

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.

Если меняются требования хотя бы на один из показателей качества (например, микротвердость $H_v = 540-840 \text{ кг/мм}^2$), топология пространства управляющих параметров заметно изменяется (рис. 1,б). Теперь в нем содержится другое количество областей устойчивости, которые отличаются по форме и размерам, однако общие принципы формирования топологии сохраняется.

Выводы

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

В результате проведенных исследований определены показатели качества хромового покрытия – толщина и микротвердость – при экономически оптимальном выходе металла по току. Показано, что назначение более жестких ограничений на показатели качества покрытия требует стабилизации режимов нанесения покрытия в более узких пределах допуска при выбранных номиналах их значений.

Список литературы

1. Смиловенко О.О. Разработка метода оценки качества функционирования технической системы // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. науч. тр. междунар. конф. (Донецк, 9-13 сент.2002 г.). - Донецк, 2002. - С. 112-117.
2. Жилинский О.В., Кузьмич К.К., Смиловенко О.О. Вероятностные критерии в задачах оптимизации и выбора параметров технических устройств: Оперативно-информ. материалы / ИНДМАШ АН БССР. - Минск, 1987. - 40 с.
3. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Металловедение покрытий. - М.: Металлургия, 1982, 250с.
4. Гибкие автоматизированные гальванические линии. Под ред. Зубченко В.Л. М.:Машиностроение. 1989. – 442 с.
5. 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.

УДК 539.376

О ПОСТРОЕНИИ КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

Кадашевич Ю. И., Помыткин С. П.

*Санкт-Петербургский государственный технологический университет
растительных полимеров, Санкт-Петербург
sppom@vindex.ru*

В работах [1–2] приведен обобщенный критерий разрушения, осуществляющий учет влияния скорости деформирования и позволяющий с единых позиций описать как кратковременную, так и длительную прочность металлов. В основу подхода была заложена идея В.В.Новожилова [3] о влиянии на прочность разрыхления материалов в процессе нагруже-