

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Д. С. Соловьев*, И. А. Соловьева**, А. А. Арзамасцев*

*Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина

**Тамбовский государственный технический университет

Поступила в редакцию 05.06.2019 г.

Аннотация. В работе рассматривается проблема поиска оптимальных условий протекания электролиза для улучшения показателей композиционных электрохимических покрытий. Для решения данной проблемы предлагаются алгоритмы построения экспериментальной модели и ее оптимизации. С целью хранения информации по решаемой проблеме разработана даталогическая модель базы данных. Реализация моделирования и оптимизации показателей композиционных электрохимических покрытий предлагается осуществлять в разработанном авторами программном обеспечении, для которого демонстрируется интерфейс и описываются основные возможности. Приводятся результаты поиска оптимальных по Парето условий электролиза (плотности тока и кислотности электролита) для улучшения микротвердости и сцепляемости композиционного электрохимического покрытия на примере $Ni - MoS_2$.

Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия, обработка экспериментальных данных, алгоритм, моделирование, оптимизация, область Парето, база данных, интерфейс, программное обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ.

АНАЛИЗ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ

Научно-технический прогресс и развитие новых отраслей промышленности невозможны без создания материалов, которые по химическим и физико-механическим свойствам значительно превосходят традиционные. Значительный вклад в решение данной проблемы вносит применение развивающегося класса композиционных материалов, в том числе на основе электрохимических металлических покрытий, в составе которых находятся наполнители различной природы в виде дисперсных частиц и порошков, металлизированных этими покрытиями [1, 2]. Так в работе [3] приводится регрессионная модель получения композиционных электрохимических покрытий (КЭП) для инертных частиц с металлами. Построение экспериментальной

модели для прогнозирования количества включений частиц КЭП в зависимости от перемешивания электролита и плотности тока обсуждается в работе [4]. Работа [5] посвящена исследованиям особенностей коррозии композиционных никелевых покрытий в сернокислой среде. В работе [6] изучается воздействие параметров импульсного электролиза (частоты, скважности и амплитуды) на твердость и износостойкость никель-алюминиевого КЭП. Исследованию влияния плотности тока на магнитные свойства КЭП $CoMnP$ посвящена работа [7]. В работе [8] описываются результаты математического моделирования нанесения КЭП наночастиц электрокорунда Al_2O_3 различной дисперсности. Коррозионная стойкость и микротвердость никелевых КЭП в зависимости от концентрации частиц в дисперсной фазе рассмотрены в работе [9]. В работе [10] производится оценка значений кинетических параметров электрохимических реакций на показатели КЭП $Bi - Pb$. Следует отметить, что для раз-

© Соловьев Д. С., Соловьева И. А., Арзамасцев А. А., 2019

ных КЭП существуют свои области определения режимов электролиза, при которых возможно получение данного покрытия, например, некоторые покрытия возможно получить только в кислой среде, другие же – только в щелочной. Однако в настоящее время не разработана общая математическая модель, связывающая значения показателей КЭП (твердость, внутреннее напряжение, переходное сопротивление, жаропрочность и т. д.) с режимами электролиза, что объясняется уникальными свойствами основной и дисперсной фаз. Экспериментальные модели остаются единственным способом моделирования и оптимизации показателей КЭП. В связи с вышесказанным разработка соответствующего программного обеспечения для моделирования и оптимизации показателей КЭП представляется весьма актуальной и своевременной задачей.

Целью работы является создание программного обеспечения для моделирования и оптимизации показателей КЭП.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Алгоритмы построения экспериментальной модели и оптимизации показателей КЭП

Изменение условий X (X_1 – плотность тока, X_2 – кислотность электролита, X_3 – состав электролита, X_4 – температура электролита, ...) электролиза определяет количество дисперсных включений в покрытие и, как следствие, существенно влияет на показатели КЭП. В связи с тем, что отсутствует общая закономерность изменения показателей КЭП от регулирования режимов электролиза, для оптимизации их значений возникает необходимость в обработке экспериментальных данных. Причем аппроксимирующая функция должна строиться для показателей КЭП как от совокупности координат вектора X .

Задача аппроксимации экспериментальных данных зависимости m -го показателя КЭП от координат вектора X звучит следующим образом.

Найти функцию $\Psi_m(X)$, при которой выполняется условие [11]:

$$\delta_m = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_m} \frac{(Y_{im} - \Psi_m(X_{im}))^2}{Y_{im}^2}}}{N_m} \cdot 100\% < \varepsilon_m, \quad (1)$$

где X_{im} , Y_{im} – экспериментальные данные, представленные в виде табличных значений зависимости m -го показателя Y_{im} от входных координат X_{im} ($i = 1 \dots N$);

δ_m – средняя квадратичная ошибка, %;

ε_m – точность, определяющая совпадение экспериментальных данных с m -й получаемой функциональной зависимостью, %;

m – индекс показателя КЭП ($m = 1 \dots M$);

N_m – количество экспериментов, проведенных для получения m -го показателя КЭП.

При решении задачи (1) необходимо определить начальный вид аппроксимирующей функциональной зависимости $\Psi_m(X)$. Для этого воспользуемся подходом, аналогичным методу Ритца [12], и представим $\Psi_m(X)$ в следующем виде:

$$\Psi_m(X) = a_{0m} + \sum_{j=1}^{k_m} a_{jm} \varphi_{jm}(X), \quad (2)$$

где φ_{jm} – произвольные функции, определенные на области изменения координат X ;

a_{jm} – постоянные коэффициенты ($j = 1 \dots k_m$);

k_m – количество функций, участвующие в формировании m -й функциональной зависимости ($k_m = 1 \dots P$);

P – максимальное количество возможных функций φ_{jm} .

В качестве произвольных функций φ_{jm} рекомендуется использование следующих:

- линейные ($a_{1m}X_1$, $a_{2m}X_1 \cdot X_2$ и т. д.);
- степенные ($a_{3m}X_1^2 \cdot X_2$, $a_{4m}X_2^2 \cdot X_3^3$ и т. д.);
- экспоненциальные ($a_{5m}e^{X_1}$, $a_{6m}e^{X_1 \cdot X_2}$ и т. д.);
- логарифмические ($a_{7m} \ln(X_1)$, $a_{8m} \ln(X_1 + X_2)$, $a_{9m} \ln(X_1 + X_2 + X_3)$ и т. д.);
- обратно тригонометрические ($a_{10m} \arctan(X_1)$, $a_{11m} \arctan(X_1 + X_2)$ и т. д.);
- обратно пропорциональные ($a_{12m}/(1 - 1/X_1)$, $a_{13m}/(1 - 1/(X_1 + X_2))$ и т. д.).

Применение в составе (2) тригонометрических функций \sin и \cos не рекомендуется

виду вероятности возникновения значительного количества локальных экстремумов.

Тогда решение задачи аппроксимации данных сводится к тому, что задается начальное значение k_m (обычно равное единице) и подбираются постоянные коэффициенты a_{jm} в функции (2) таким образом, чтобы выражение (1) достигало минимального значения. Поиск коэффициентов a_{jm} предлагается осуществлять методом тяжелого шарика, использующего информацию о вторых производных, что позволяет ускорить процесс нахождения неизвестных значений. Если условие (1) не выполняется и $k_m < P$, то количество постоянных коэффициентов увеличивается на единицу ($k_m = k_m + 1$) и отыскивается новый вид функции (2).

Далее возникает необходимость решения многокритериальной задачи нахождения оптимального значения совокупности различных показателей КЭП [13]:

$$\vec{F}(X) = (\Psi_1(X) \dots \Psi_M(X)) \rightarrow \text{extr}, \quad (3)$$

при ограничениях на область определения координат вектора X :

$$X_{h_{\min}} \leq X_h \leq X_{h_{\max}}, \quad (4)$$

где \vec{F} – векторная запись показателей КЭП;

h – индекс координаты вектора X ($h = 1 \dots H$);

H – количество координат вектора X ;

M – количество показателей КЭП.

В связи с тем, что найденные функциональные зависимости для различных показателей КЭП отличны, возникает необходимость построения области Парето, формулировка поиска которой звучит следующим образом.

Найти область не доминирующих решений для M показателей КЭП при уравнениях связи (2) и ограничениях (4).

К наиболее распространенным методам решения многокритериальных задач относятся:

- метод сверток;
- метод главного критерия;
- максиминные методы;
- метод целевого программирования.

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Так решение, найден-

ное методом главного критерия, может не быть оптимальным по Парето. Максиминный метод является непригодным для ситуации, когда для одного из показателей КЭП желательно получить минимум, а для другого – максимум, поскольку второй показатель необходимо взять с отрицательным знаком, что недопустимо для данного метода. Применение метода целевого программирования затрудняется заданием целей для каждого показателя КЭП, отталкивающегося от его неизвестного экстремального значения. Наиболее предпочтительным методом для решения поставленной задачи, по мнению авторов, является метод свертки.

В связи с тем, что каждая оптимальная по Парето точка является экстремальной для некоторой свертки, задающей линейный порядок в пространстве отдельных показателей КЭП, для отыскания такой точки необходимо задать вид свертки и найти ее экстремум. Предлагается использовать аддитивную форму свертки показателей вида:

$$\Omega(\vec{\lambda}) = \sum_{m=1}^M \lambda_m \bar{\Psi}_m(X) \rightarrow \max, \quad (5)$$

где $\bar{\Psi}_m$ – нормированное значение m -го показателя КЭП;

$\vec{\lambda}$ – векторная запись весовых коэффициентов для M показателей КЭП, которые подчиняются условиям:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M \lambda_m = 1 \\ \lambda_1 \dots \lambda_M > 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Для получения одного оптимального значения свертки (5) необходимо присутствие лица принимающего решение (ЛПР). В данном случае ЛПР должен задать λ_m , после чего алгоритмом нелинейной оптимизации осуществляется поиск максимума свертки (5). В качестве алгоритма нелинейной оптимизации можно использовать метод Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно, который является разновидностью квазиньютоновских методов и аппроксимирует гессиан функции.

1.2. Даталогическая модель базы данных разрабатываемого программного обеспечения

Для работы создаваемого программного обеспечения необходимо наличие следующих баз данных (БД) [14, 15]: проектов; композиций; электролитов; аппроксимирующих функций для табличных данных. БД композиций состоит из пяти таблиц: «Композиции»; «Металлов основной фазы КЭП»; «Дисперсная фаза»; «Свойства»; «Экспериментальные данные». БД электролитов содержит две таблицы: «Электролиты»; «Компоненты электролита». БД аппроксимирующих функций содержит только одну таблицу, имя которой совпадает с именем БД. БД проектов содержит табличную информацию, описывающую «Готовые проекты» и «Список свойств с оптимальными значениями».

Связь между рассмотренными таблицами осуществляется с помощью первичных и вторичных ключей.

В связи с тем, что у одной композиции может существовать несколько определяющих ее свойств, связь между таблицей «Композиции» и таблицей «Свойства», содержащей данные зависимости свойств КЭП от режимов электролиза, является связью типа «один ко многим» и осуществляется через поле «Композиция». Таблицы «Металлы основной фазы КЭП» и «Дисперсная фаза» связаны с таблицей «Композиции» посредством ключа «Композиция» с типом связи «один ко многим». В свою очередь для каждого свойства существует более одного эксперимента, записываемого в таблицу «Экспериментальные данные», отображающей зависимости показателей КЭП от входных координат вектора X , поэтому между данными таблицами задана связь «один ко многим», реализованная через поле «Свойство».

При аппроксимации экспериментальных данных заполняется таблица «Аппроксимирующие функции», связь между которой и таблицей «Экспериментальные данные» имеет тип «один ко многим» и осуществляется через поле «Эксперимент».

Таблица «Список свойств с оптимальными значениями» содержит информацию о полученных значениях свойств (минимальные или максимальные) при оптимальных значениях условий электролиза. Данная таблица связана с таблицей «Свойства» через связь «один ко многим» и осуществляется через поле «Свойство». Рассматриваемая таблица также имеет связь «один ко многим» с таблицей «Готовые проекты» в связи с тем, что для композиции рассматриваются несколько свойств, выступающих в качестве локальных критериев, а соединяются данные таблицы с помощью поля «Номер».

Даталогическая модель БД, включающая в себя все рассмотренные БД, представлена на рис. 1.

1.3. Описание возможностей программного обеспечения

На рис. 2 представлен интерфейс программного обеспечения для моделирования и оптимизации показателей КЭП [16]. Данный интерфейс реализует диалоговое окно «меню», в котором содержатся необходимые пункты для вызова соответствующих подсистем.

Пункт «Ввод исходных данных» выводит на экран диалог, в котором необходимо указать соответствующие условия электролиза: электролит, композицию, свойство, для которого необходимо получить аппроксимирующую функцию по экспериментальным данным (рис. 3). В пункте «Данные эксперимента» предоставляется возможность задания экспериментального поведения исследуемого показателя КЭП в табличном виде.

В пункте «Работа с данными» доступны операции по заданию точности аппроксимации функции и просмотру полученного результата, а также заданию вида экстремума, который будет иметь данная аппроксимирующая функция (минимум или максимум) (рис. 4). После получения аппроксимирующей функции вся информация о ее структуре и значениях неизвестных коэффициентов сохраняется в таблице «Аппроксимирующие функции». Для оптимизации показателей

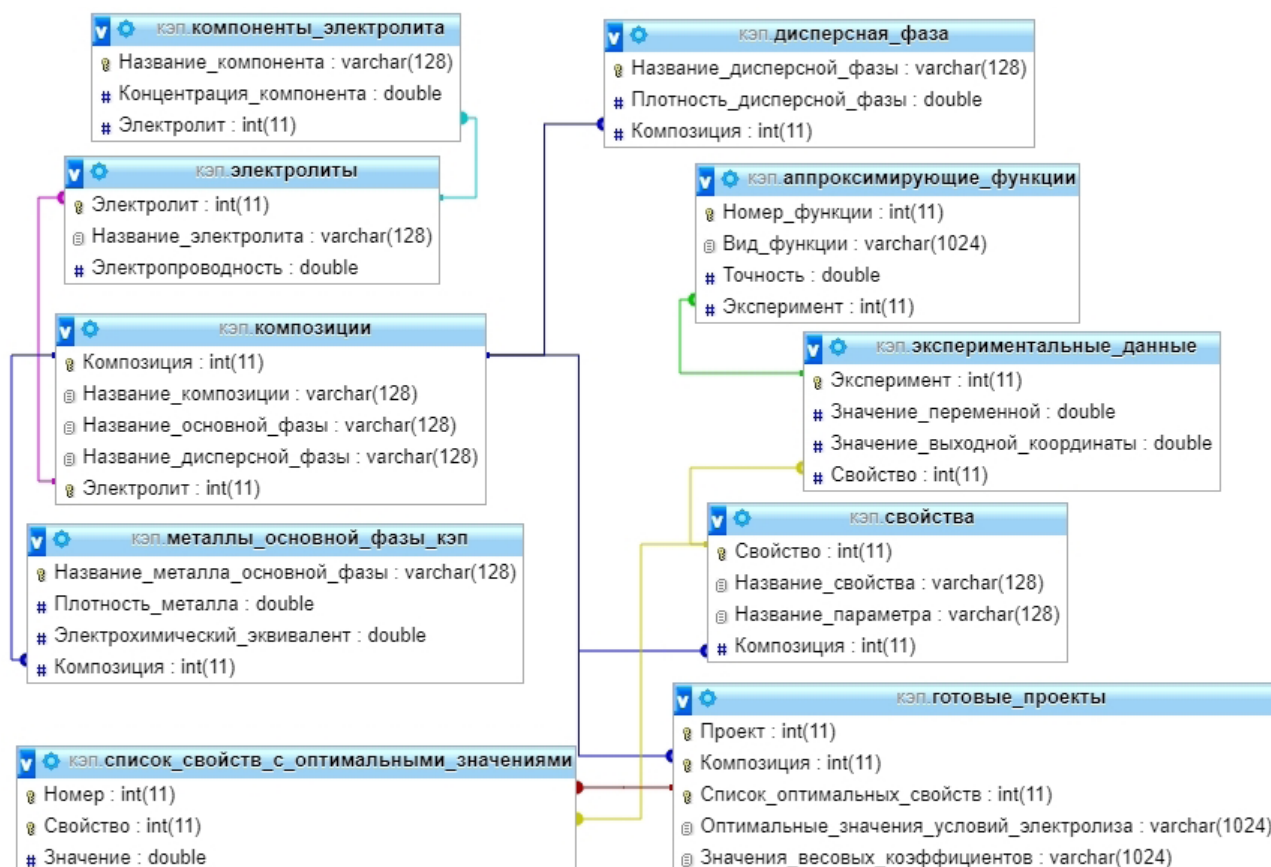


Рис. 1. Дatalogическая модель БД для разрабатываемого программного обеспечения

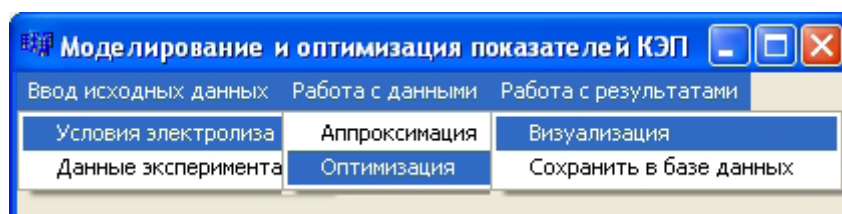


Рис. 2. Интефейс диалогового окна «меню» программного обеспечения

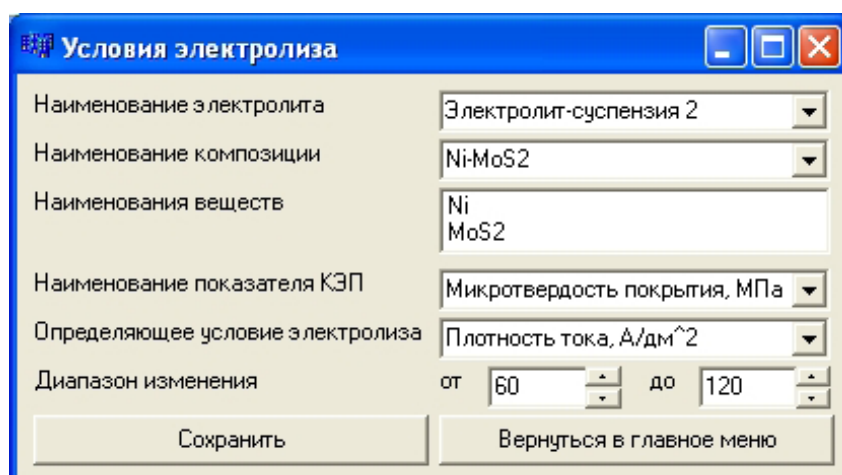


Рис. 3. Интефейс для ввода условий электролиза

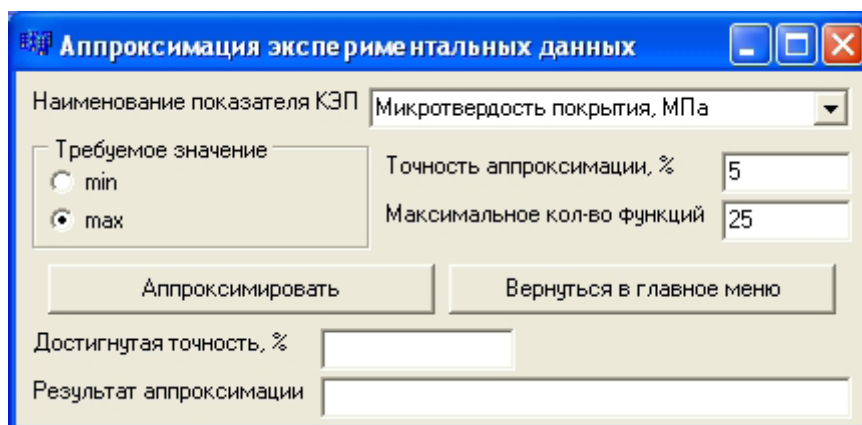


Рис. 4. Интерфейс для аппроксимации экспериментальных данных

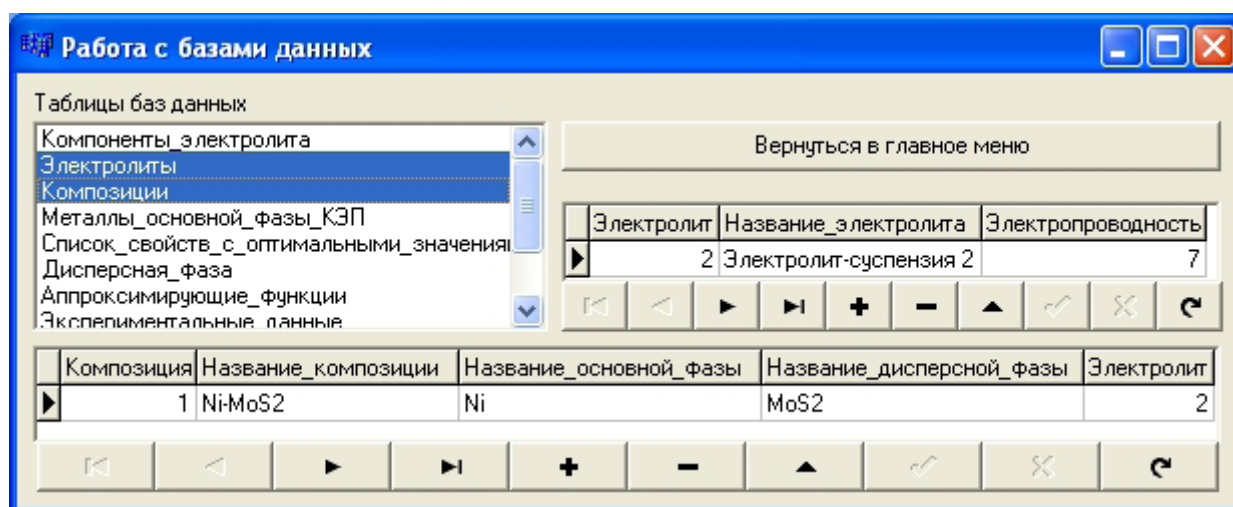


Рис. 5. Интерфейс для работы с таблицами БД

КЭП согласно аддитивной свертке (5) ЛПР предоставляется возможность ввода весовых коэффициентов, после чего результаты оптимизации (оптимальные условия электролиза, значения показателей) выводятся на экран.

Пункт «Работа с результатами» позволяет визуализировать полученные результаты: построить графики аппроксимирующих функций для показателей КЭП, графики аддитивного критерия и области Парето в координатах входных переменных и координатах, определяемых показателями КЭП. Вызов подсистемы для работы с таблицами БД осуществляется посредством одноименного меню (рис. 5).

Подсистема работы с БД предназначена для хранения, добавления и редактирования информации о проектах, композициях, электролитах, аппроксимирующих функциях для табличных данных.

1.4. Численный эксперимент

Рассмотрим получение КЭП $Ni - MoS_2$ из электролита-суспензии для никелирования следующего состава, kg/m^3 : $NiSO_4 - 167...233$, $MgSO_4 - 10...20$, $CH_2O_2 - 60...80$. Концентрация дисперсной фазы MoS_2 в ванне $50 kg/m^3$.

Вектор изменения условий электролиза X состоит из $H = 2$ компонентов: X_1 – плотность тока, A/dm^2 ; X_2 – кислотность электролита. Ограничения на область определения координат вектора X : $60 \leq X_1 \leq 120$; $1,4 \leq X_2 \leq 2,2$.

Количество улучшаемых показателей КЭП $M = 2$: $\Psi_1(X)$ – микротвердость покрытия, МПа; $\Psi_2(X)$ – сцепляемость покрытия, МПа. По данным показателям требуется достигнуть максимального значения.

Количество экспериментов, проведенных для получения каждого показателя КЭП, со-

впадает и составляет $N_1 = N_2 = 12$. Экспериментальные данные зависимости микротвердости покрытия Y_1 и сцепляемости покрытия Y_2 от плотности тока и кислотности электролита представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные зависимости микротвердости и сцепляемости покрытия

| i | X_1 | X_2 | Y_1 | Y_2 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 60 | 1,4 | 2500 | 82 |
| 2 | 60 | 1,8 | 3000 | 88 |
| 3 | 60 | 2,2 | 3968 | 75 |
| 4 | 80 | 1,4 | 3025 | 81 |
| 5 | 80 | 1,8 | 3500 | 89 |
| 6 | 80 | 2,2 | 3650 | 75 |
| 7 | 100 | 1,4 | 4050 | 88 |
| 8 | 100 | 1,8 | 4075 | 85 |
| 9 | 100 | 2,2 | 4000 | 70 |
| 10 | 120 | 1,4 | 3600 | 85 |
| 11 | 120 | 1,8 | 3800 | 70 |
| 12 | 120 | 2,2 | 3955 | 65 |

Точность, определяющая совпадение экспериментальных данных каждой из получаемых функциональных зависимостей $\Psi_1(X)$ и $\Psi_2(X)$, одинаковая и составляет $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 5\%$. Максимальное количество возможных функций, участвующих в формировании каждой из функциональных зависимостей $\Psi_1(X)$ и $\Psi_2(X)$, составляет $P = 25$.

Аддитивная свертка показателей КЭП в задаче оптимизации (5) примет вид:

$$\Omega(\vec{\lambda}) = \lambda_1 \bar{\Psi}_1(X) + (1 - \lambda_1) \bar{\Psi}_2(X) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где вектор весовых коэффициентов $\vec{\lambda}$ подчиняется условиям:

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \\ \lambda_2 = 1 - \lambda_1 \\ \lambda_1, \lambda_2 > 0 \end{cases}$$

При отыскании области Парето ЛПР задает для коэффициента λ_1 диапазон изменения $0,1 \dots 0,9$ с шагом $0,2$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате аппроксимации экспериментальных данных получены следующие функциональные зависимости для микротвердости и сцепляемости КЭП $Ni - MoS_2$:

$$\begin{aligned} \Psi_1(X) = & -175,11302 + 9,83532X_1 - \\ & - 421,50718X_2 - 35,95075X_1X_2 + \\ & + 1,10560X_1^2 + 2021,80791X_2^2 + \\ & + 0,65904X_1^2X_2 - 31,57929X_1X_2^2 - \\ & - 0,00909X_1^3 + 135,46324X_2^3 - \\ & - 0,00016X_1^3X_2 - 0,50206X_1X_2^3 + \\ & + 0,00012X_1^3X_2^2 - 0,00104X_1^2X_2^3 + \\ & + 0,00003X_1^3X_2^3 - 96,89927 \ln(X_1 + 1) + \\ & + 300,45097 \ln(X_2 + 1) - \\ & - 256,73554 \left(1 - \frac{1}{X_1 + X_2 + 1} \right) + \\ & + 1,92713 \arctan(X_1 + X_2) - \\ & - 9,74677 \ln(X_1 + X_2 + 1) + \\ & + 39,82546 \left(1 - \frac{1}{X_1 + 1} \right) + \\ & + 267,96519 \left(1 - \frac{1}{X_2 + 1} \right) + 11,00959X_2^4, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_2(X) = & -133,99022 + 1,97606X_1 + \\ & + 162,23267X_2 - 0,90722X_1X_2 - \\ & - 0,00012X_1^2 - 6,28041X_2^2 - \\ & - 0,00764X_1^2X_2 + 0,19988X_1X_2^2 + \\ & + 0,00005X_1^3 - 16,06784X_2^3 - \\ & - 0,00004X_1^3X_2 + 0,07632X_1X_2^3 + \\ & + 0,00002X_1^3X_2^2 - 0,00001X_1^2X_2^3 - \\ & - 0,03790 \ln(X_1 + 1) + 0,27042 \ln(X_2 + 1) - \\ & - 0,26040 \left(1 - \frac{1}{X_1 + X_2 + 1} \right) - \\ & - 0,00008 \arctan(X_1 + X_2) + \\ & + 0,00551 \ln(X_1 + X_2 + 1) - \end{aligned}$$

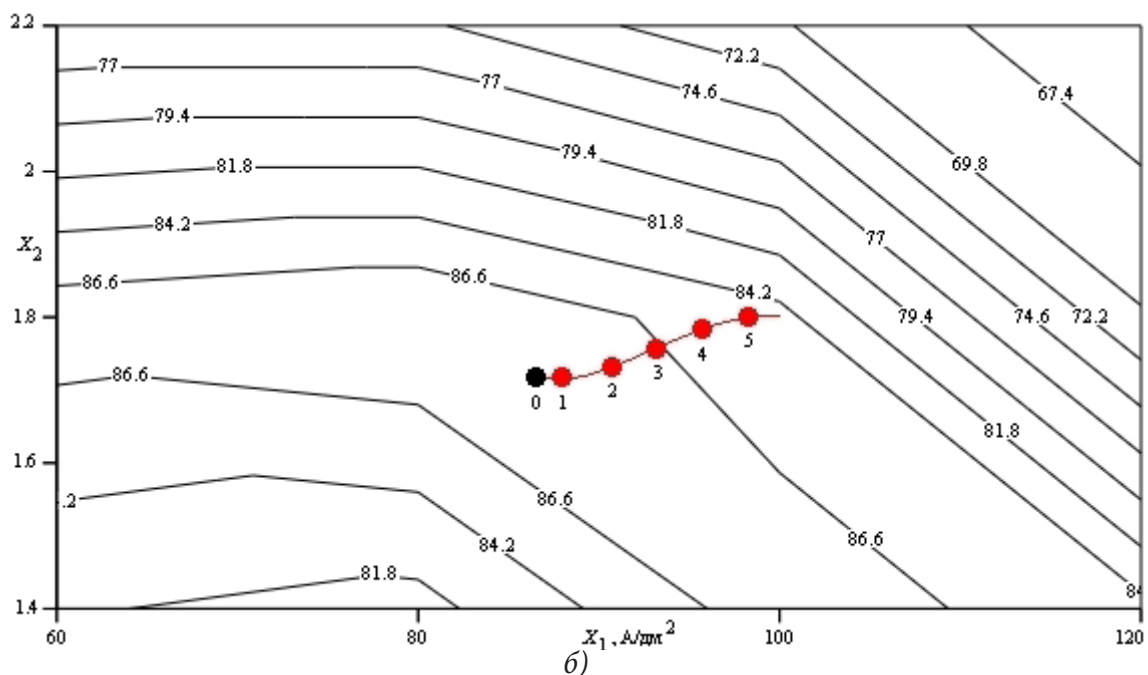
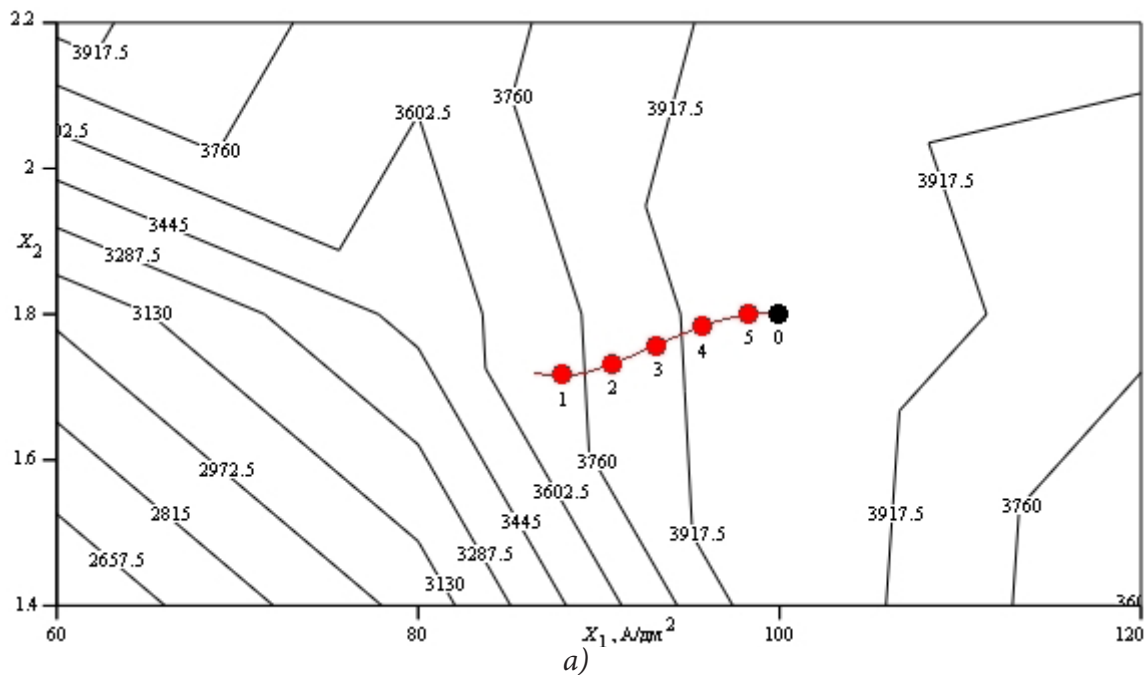
$$\begin{aligned}
 & -0,02371\left(1-\frac{1}{X_1+1}\right)+ \\
 & +0,35477\left(1-\frac{1}{X_2+1}\right)-0,01543X_2^4- \\
 & -0,00040X_2^5.
 \end{aligned}$$

Среднеквадратичные ошибки для полученных функций составили $\delta_1 = 3,76\%$ и $\delta_2 = 4,6\%$ соответственно. Количество функций, участвующих в формировании получен-

ных функциональных зависимостей $\Psi_1(X)$ и $\Psi_2(X)$, одинаковое и составляет $k_1 = k_2 = 22$.

При решении задачи оптимизации (7) для изменения значения коэффициента λ_1 в диапазоне $0,1 \dots 0,9$ с шагом $0,2$ были получены следующие значения показателей микротвердости и сцепляемости КЭП (рис. 6), формирующие область Парето.

Оптимальные условия электролиза для максимизации микротвердости КЭП без учета его сцепляемости: $X_1 = 100 \text{ А/дм}^2$; $X_2 = 1,8$;



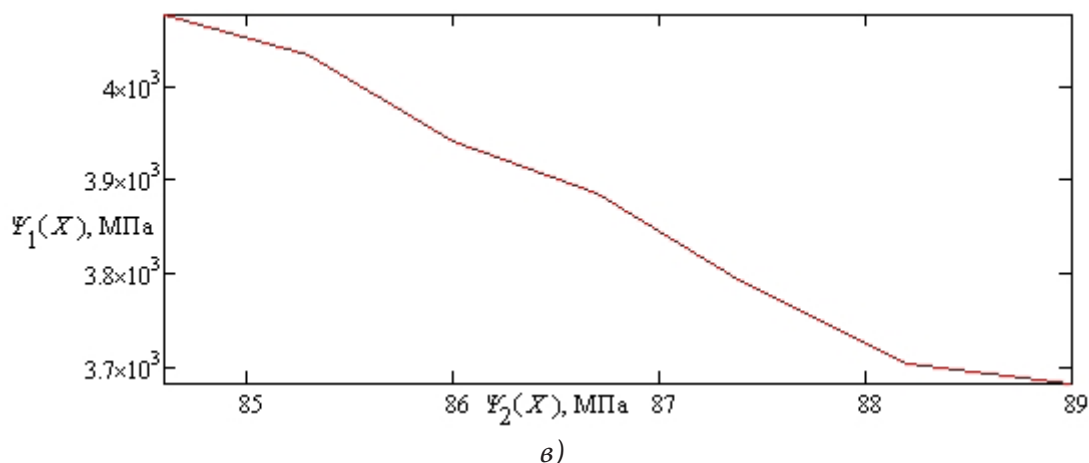


Рис. 6. Изолинии показателей КЭП $\Psi_1(X)$ (а) и $\Psi_2(X)$ (б) в координатах вектора X : 0 – максимум; 1, 2, 3, 4, 5 – значения, соответствующие λ_1 в диапазоне 0,1...0,9 с шагом 0,2. Область Парето, в случае, когда координатами выступают показатели КЭП (в)

$\Psi_1(X) = 4075$ МПа. Оптимальные условия электролиза для максимизации сцепляемости КЭП без учета его микротвердости: $X_1 = 86,5$ А/дм²; $X_2 = 1,73$; $\Psi_2(X) = 90$ МПа.

Рассмотрим несколько оптимальных точек из области Парето. При $\lambda_1 = 0,2$ достигаются следующие оптимальные условия электролиза и показатели КЭП: $X_1 = 89,7$ А/дм²; $X_2 = 1,74$; $\Psi_1(X) = 3987,2$ МПа; $\Psi_2(X) = 85,6$ МПа. Значение $\lambda_1 = 0,5$ дает следующие результаты: $X_1 = 93,33$ А/дм²; $X_2 = 1,766$; $\Psi_1(X) = 3885,4$ МПа; $\Psi_2(X) = 86,7$ МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подбор оптимальных условий электролиза позволяет регулировать физико-механические и химические свойства КЭП. Ввиду отсутствия в настоящее время единой математической модели для описания влияния условий электролиза на показатели КЭП алгоритмы построения экспериментальной модели остаются единственным решением данной проблемы. Для улучшения показателей КЭП возникает необходимость решения задачи оптимизации, что требует разработки соответствующего программного обеспечения. Многообразие условий протекания электролиза, а также видов КЭП и их показателей, обусловило разработку баз данных для хранения результатов моделирования и оптимизации. В процессе работы программного обе-

спечения было выявлено, что ни один из рассматриваемых показателей на примере КЭП Ni – MoS₂ не может быть улучшен, без ухудшения другого показателя и наоборот.

Разработанное программное обеспечение представляет интерес для исследователей и технологов, занимающихся вопросами изучения процессов нанесения КЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамбург, Ю. Д. Теория и практика электроосаждения металлов / Ю. Д. Гамбург, Дж. Зангари. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 438 с.
2. Целуйкин, В. Н. Электроосаждение композиционных покрытий на основе сплава цинк-никель в импульсном режиме / В. Н. Целуйкин, А. А. Корешкова // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 293–296.
3. Celis, J. P. A mathematical model for the electrolytic codeposition of particles with a Metal Matrix / J. P. Celis, J. R. Roos, C. Buelens // Journal of the Electrochemical Society. – 1987. – Vol. 134. – P. 1402–1408.
4. Hovestad, A. Electrochemical codeposition of inert particles in a metallic matrix / A. Hovestad, L. J. J. Janssen // Journal of Applied Electrochemistry. – 1995. – Vol. 25(6). – P. 519–527.

5. Медялене, В. В. Особенности коррозии композиционных никелевых покрытий в серноокислой среде / В. В. Медялене, К. К. Лейнартас, Э. Э. Юзялюнас // Защита металлов. – 1995. – Т. 31, № 1. – С. 98–100.
6. Bahrololoom, M. E. The influence of pulse plating parameters on the hardness and wear resistance of nickel-alumina composite coatings / M. E. Bahrololoom, R. Sani // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 192. – P. 154–163.
7. Krishnappa, M. R. M. Effects of current density on electrodeposited CoMnP thin films / M. R. M. Krishnappa, N. Rajasekaran, S. Ganesan, R.N. Emerson // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – Vol. 5. – P. 6–10.
8. Молчанов, Е. К. Математическое моделирование процесса совместного электрохимического осаждения в системе с вращающимся цилиндрическим электродом / Е. К. Молчанов // Математическое моделирование в естественных науках. – 2015. – Т. 1. – С. 282–286.
9. Композиционные электрохимические покрытия на основе никеля / Р. Е. Фомина [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 70–73.
10. Skitał, P. M. The investigation and modeling of two metals codeposition process / P. M. Skitał, P. T. Sanecki, D. Saletnik // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2016. – Vol. 778. – P. 89–97.
11. Григорьев, Ю. Д. Методы оптимального планирования эксперимента. Линейные модели. Учебное пособие / Ю. Д. Григорьев. – СПб. : Лань, 2015. – 320 с.
12. Ерохин, Б. Т. Численные методы: Учебное пособие / Б. Т. Ерохин. – СПб. : Лань КИТ, 2016. – 256 с.
13. Горелик, В. А. Исследование операций и методы оптимизации: Учебник / В. А. Горелик. – М.: Academia, 2018. – 384 с.
14. Проект базы данных по композиционным электрохимическим покрытиям с металлической матрицей хрома / Е. А. Водопьянова [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 8 (189). – С. 90–92.
15. Гриценко, С. А. Правила преобразования расширенной модели «сущность-связь» в реляционную модель данных при нисходящем проектировании баз данных / С. А. Гриценко, В. Ю. Храмов // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 114–125.
16. Мартин, Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / Р. Мартин. – СПб. : Питер, 2018. – 352 с.

Соловьев Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Математическое моделирование и информационные технологии», Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина.

E-mail: solovjevdenis@mail.ru

Соловьева Инна Александровна – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», Тамбовский государственный технический университет.

E-mail: good.win32@yandex.ru

Арзамасцев Александр Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Математическое моделирование и информационные технологии», Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина.

E-mail: arz_sci@mail.ru

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS INDICATORS

D. S. Solovjev*, I. A. Solovjeva, A. A. Arzamastsev***

**Tambov State University named after G. R. Derzhavin*

***Tambov State Technical University*

Annotation. The problem of searching the optimal conditions for electrolysis to improve the performance of composite electrochemical coatings is considered in the article. Algorithms for constructing an experimental model and its optimization are proposed to solve this problem. Database model is designed to store information on the problem being solved. The authors have developed software for the implementation of modeling and optimization of composite electrochemical coatings. The interface is demonstrated and the main features are described for the software. The search results for Pareto optimal electrolysis conditions (current density and electrolyte acidity) are given to improve the microhardness and adhesion of the composite electrochemical coating on the example of $Ni - MoS_2$.

Keywords: composite electrochemical coatings, experimental data processing, algorithm, modeling, optimization, Pareto region, database, interface, software.

Solovjev Denis Sergeevich – Ph.D., Associate Professor of the Department «Mathematical Modeling and Information Technologies», Tambov State University named after G. R. Derzhavin.
E-mail: solovjevdenis@mail.ru

Arzamastsev Alexander Anatolievich – Dr.Sc., Professor, Head of the Department «Mathematical Modeling and Information Technologies», Tambov State University named after G. R. Derzhavin.
E-mail: arz_sci@mail.ru

Solovjeva Inna Aleksandrovna – Ph.D. student of the department «Automated Decision Support Systems», Tambov State Technical University.
E-mail: good.win32@yandex.ru