

Таким образом, оптимальные конструктивные параметры ВЧ сеточного электрода: ширина пластин – 4 мм, расстояние между пластинами – 3 мм, толщина пластин – 0,5 мм, материал пластин – молибден. Электрод такой конструкции, в основном, использовался при разработке технологии высокоточной размерной обработки и ионной регулики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Габович, М.Д. Плазменные источники ионов / М.Д. Габович. – Киев: Наук думка, 1964.
2. Волчков, В.И. Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов / В.И. Волчков. – М.: ЦНИИ информ., 1983.
3. Миллер, В.Т. Технология изготовления прецизионных оптических элементов / В.Т. Миллер. – М.: ЦНИИ информ, 1986.

УДК 621.762

Петюшик Т.Е.

### **МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПАП-2 И SBA-15**

*БНТУ, г. Минск*

*Разработана матрица планирования эксперимента при определении зависимости прочности материала от соотношения объемов его компонентов и размеров частиц наполнителя.*

Интенсификация работ по созданию любых объектов новой техники требует сокращения времени проведения экспериментальных научных исследований при обеспечении высокой достоверности получаемых результатов.

Основной и первоначальной задачей работы было определение оптимального соотношения объемов алюминиевой пудры ПАП-2 и сорбента SBA-15 для получения материала с максимальными прочностью и коэффициентом проницаемости. Экспериментально этот процесс не эффективен: занимает много времени и требует большого расхода материала. Для решения этих проблем применяли метод планирования эксперимента.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Здесь существенно следующее:

- стремление к минимизации общего числа опытов;
- одновременное варьирование всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам – алгоритмам;
- использование математического аппарата, формализующего многие действия экспериментатора;
- выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

На первой стадии планирования необходимо определить отклик и факторы эксперимента. Отклик – выходная переменная, характеризующая систему, изучаемую в эксперименте, фактор – величина, характеризующая то или иное свойство объекта. В работе откликом является прочность, а факторами – соотношение объемов порошков и размер частиц SBA-15.

Чтобы иметь возможность построить стандартную ортогональную план-матрицу эксперимента необходимо применить кодирование факторов: перевод натуральных факторов (размер частиц SBA-15 и соотношение объемов порошков) в безразмерные величины. Для перевода натуральных величин в кодовые  $x_i$  заполняют таблицу кодирования переменных на двух уровнях (таблица 1). В каче-

стве нулевого уровня факторов выбираем центр интервала, в котором предполагаем вести эксперимент.

Таблица 1 – Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Факторы	
	Соотношение SBA-15/ПАП-2, %	Размер SBA-15, мкм
Нулевой уровень $x_i=0$	50	45
Интервал варьирования $\delta_i$	49	55
Нижний уровень $x_i= -1$	1	10
Верхний уровень $x_i= +1$	99	100
Кодовое обозначение	$x_1$	$x_2$

Выбор интервала варьирования обусловлен тем, что он должен быть достаточно мал для получения линейного уравнения, но, вместе с тем, достаточно велик, чтобы не получить ошибочного вывода о незначимом влиянии какого-либо из факторов.

Связь между кодовым и натуральным выражением фактора задается формулой (1) [1].

$$x_i = \frac{X_i - x_{i_0}}{\delta_i} \quad (1)$$

где  $X_i$  – натуральное значение фактора,  $x_{i_0}$  – значение  $i$ -го фактора на нулевом уровне,  $\delta_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

В общем виде зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид

$$N = pk, \quad (2)$$

где  $N$  – число опытов;  $p$  – число уровней факторов;  $k$  – число факторов.

Условия эксперимента удобно записывать в виде таблицы, которую называют матрицей планирования эксперимента.

Приведенный план эксперимента представляет собой расширенную матрицу, так как введен столбец  $x_1 \cdot x_2$ , поз-

воляющий оценить коэффициент регрессии при взаимодействии факторов.

Задачей измерения является не только определение значения самой измеряемой величины, но и также и оценка погрешности, допущенной при измерении.

Таблица 2 – Матрица планирования

№ опыта	1	2	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	Прочность, МПа			
				у <sub>1</sub>	у <sub>2</sub>	у <sub>3</sub>	у <sub>ср</sub>
1	1	1	+	2	2	2	2
2	1	1	-	4	2	3	3
3	1	1	-	1	1	1	1
4	1	1	+	1	1	1	1
0				,5	,2	,8	,5

При одинаковом числе параллельных опытов на каждом сочетании уровней факторов необходимо оценить воспроизводимость процесса, который проверяется по критерию Кохнера, или Фишера.

$$G = \frac{s_{u_{\max}}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)}, \quad (3)$$

где

$$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{u_p} - y_{u_{cp}})^2}{m - 1}, \quad (4)$$

$p=1,2$ ;  $m$  – число параллельных опытов;  $s_{U_{\max}}^2$  – наибольшая из дисперсий в строчках плана;  $G_{(0.05; f_n; f_u)}$  – табличное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости;  $f_n=n$  – число независимых оценок дисперсии;  $f_u=m-1$  – число степеней свободы каждой оценки.

Процесс считается воспроизводимым, если выполняется неравенство (3). При этом дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта) определяется по формуле (5)

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n} \quad (5)$$

В нашем случае процесс воспроизводим, так как значение критерия Кохрена  $G = 0,274$ , а табличное  $G_{(0,05; f_n; f_u)} = 0,7679$ .

При этом дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта)  $s_y^2 = 0,72$ .

Коэффициенты регрессии рассчитывают по формулам (6-8).

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_{u.ср}}{n} \quad (6)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{i_u} * y_{u.ср}}{n} \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{i_u} * x_{j_u} * y_{u.ср}}{n} \quad (8)$$

Рассчитанные коэффициенты регрессии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии

	Коэф. регрессии	
1	$b_0$	10,125
2	$b_1$	-7,875
3	$b_2$	-2,375
4	$b_{1.2}$	1,625

Полученное уравнение регрессии

$$Y=10,125-7,875x_1-2,375x_2+1,625x_1x_2 \quad (9)$$

Проверка адекватности линейной модели выполняется с помощью критерия Фишера. Адекватность обоснована, если выполняется неравенство (10).

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}, \quad (10)$$

где

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (y_{u,cp} - y_u)^2}{n - r - 1}, \quad (11)$$

$y_u$  – расчетное значение отклика в  $u$ -м опыте;  $F_{(0,05; f_{ad}; f_u)}$  – критерий Фишера при 5%-ном уровне значимости;  $f_{ad}=n-r-1=4-2-1=1$  – число степеней свободы дисперсии адекватности;  $f_u=4$  – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости.  $F_{(0,05; 1; 4)}=7,7086$ .

В нашем случае модель адекватна, так как  $S_{ad}^2=0$ , а, следовательно, и  $F=0$ .

По данным таблиц 1 и 2 с помощью формулы (1) уравнения (9) приведем к натуральным переменным.

$$\sigma = 10,125 - 7,875r - 2,375\omega + 1,625r\omega, \quad (12)$$

Уравнение (12) отражает зависимость прочности образцов ( $\sigma$ ) от размера частиц (SBA-15 $r$ ) и от соотношения компонентов ( $\omega$ ). Графически полученная зависимость представлена на рисунке 1.

Из графика видно, что максимальная прочность полученного материала достигается при соотношении SBA-15/ПАП-2 равном 1/10, а размер частиц SBA-15 в выбранном интервале размеров на прочность влияния практически не оказывает. Определение оптимального размера частиц SBA-15 в составе композиционного материала должно осуществляться

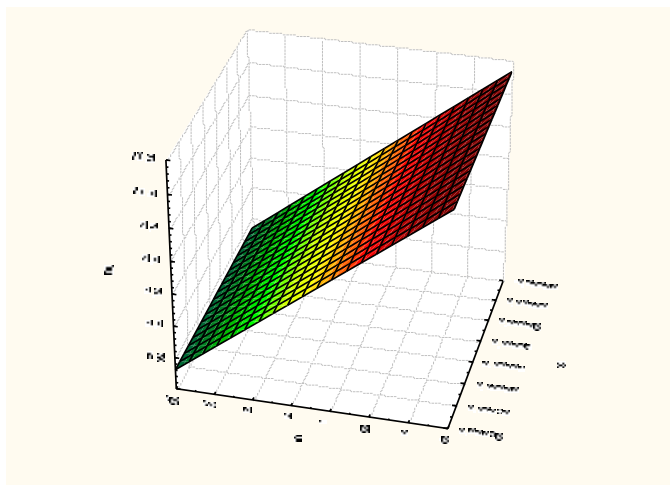


Рисунок 1 – Зависимость прочности от размера частиц SBA и соотношения объемов порошков

для другого выходного параметра: например, сорбционной емкости материала.

Таким образом, матрица планирования сокращает временные и материальные затраты на исследования, и при этом дает возможность проведения детального анализа возможных результатов.

УДК 543.25

Плигина А.А.

**ОПЕРАТИВНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ  
КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ  
МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

*БГТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: ассистент Болвако А.К.*

*The method of inversion voltamperometry was used to investigate electrochemical behavior of microconcentrations of  $Zn^{2+}$ ,*