

УДК 666.3 – 183.2: 001.8

Гуренко Л.П., Логвинков С.М., Семченко Г.Д., Каплун А.В.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ОГНЕУПОРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И ИХ СВОЙСТВ

Исследование направлено на совершенствование и построение новых математических моделей огнеупорных материалов с неоднородной зернистой структурой на основе вероятностно-геометрической концепции, построения структур композитов, образованных случайным распределением структурообразующих элементов в объеме моделируемой упаковки. Данный подход позволяет выделять и исследовать комплекс взаимозависимости между структурными параметрами и связанными с ними физическими характеристиками и эксплуатационными свойствами. При моделировании структурных и структурно-чувствительных параметров и зависимостей для исследуемых материалов выявлена и обоснована достаточность использования при моделировании структурообразующего элемента сферической формы.

Авторами разработана энергосберегающая технология получения огнеупорных материалов для изготовления изделий сложной конфигурации многофункционального назначения, шаров – наполнителей, эксплуатируемых в высокотемпературных теплообменниках, из самотвердеющих масс по золь-гель технологии с применением гидролизованного этилсиликата (в водной кислой среде без органических растворителей) и различных огнеупорных наполнителей [1]. Параметры разработанной технологии и свойства получаемых материалов служили базовой основой построения моделей. С применением ЭВМ решалась проблема оптимизации состава огнеупорных масс по технологическим, физико-химическим и эксплуатационным характеристикам. Многочисленность параметров, определяющих стабильность технологического процесса и свойства литых огнеупорных изделий, потребовали применения математических методов планирования экспериментов по оптимизации составов огнеупорных композиций и их свойств [2-4]. ЭВМ использовали для построения эквипотенциальных сечений поверхности отклика и для оптимизации параметров на двумерных проекциях поверхностей отклика, описываемых уравнениями регрессии. Эту задачу решали, используя широко распространенный для планирования метод полного факторного эксперимента (ПФЭ) [5-8].

Выполнена оптимизация состава корундовых огнеупоров в зависимости от вида наполнителя (из числа исследованных) и состава связки (из области оптимальности) [1,9-10], обеспечивающих получение изделий удовлетворяющих техническим требованиям [11] и обладающих оптимальным сочетанием свойств. При этом эксперимент строился в соответствии с матрицей ПФЭ для каждого типа наполнителя отдельно. Применение более сложных математических моделей не осуществлялось из-за необходимости ограничения объема экспериментальных данных.

В качестве параметров оптимизации  $U_{\text{п}}$  были приняты:

- предел прочности при сжатии;
- открытая пористость;
- линейная усадка в обжиге.

В качестве переменных приняты содержания исходных компонентов связки в масс. %:

- $X_1$  – содержание этилсиликата – 32;
- $X_2$  – содержание концентрированной соляной кислоты.

Значения переменных  $X_1$  и  $X_2$  в каждой точке планов экспериментов стабилизировали тщательным дозированием с погрешностью  $X_i$  не более  $\pm 0,005 X_i$ . Значения

параметров оптимизации также определяли с возможно большей точностью по усредненным данным серии экспериментов (не менее 5). Планируемая погрешность определения  $Y_1, Y_2, Y_3$  – не превышала 2 %.

Проверка коэффициентов уравнений регрессии на значимость по критерию Кохрена показала, что почти во всех полученных уравнениях коэффициенты незначимы. Это явилось следствием сильного сужения интервалов варьирования переменных. Поскольку в данной работе не ставилась задача поиска локальных экстремумов по каждому параметру  $Y_n$ , то все уравнения использованы в расчетах в полном виде, со всеми коэффициентами.

Аналитическая зависимость параметров оптимизации от принятых переменных рассматривалась в виде линейной модели с учетом возможного взаимодействия переменных. Уравнение регрессии имело следующий вид:

$$Y_n = v_0 + v_1X_1 + v_2X_2 + v_{12}X_1X_2$$

Переменные варьировали в пределах области более широкой, чем [1]:

$$60 \leq X_1 \leq 90$$

$$0.3 \leq X_2 \leq 0.8$$

В связи со значительной шириной области варьирования переменных и явно нелинейными частными зависимостями.  $Y_i = f(X_i)$  для каждого параметра оптимизации, с целью повышения адекватности математических моделей, их строили кусочно-непрерывными функциями, рассчитывая уравнения отдельных моделей для двух неодинаковых областей изменения  $X_1$ :

$$A - 60 \leq X_1 \leq 80$$

$$B - 80 \leq X_1 \leq 90 \quad 0.3 \leq X_2 \leq 0.8$$

Отсутствие скачков на стыке областей обеспечивалось соответствующим составлением матриц планов эксперимента. Оптимизацию составов огнеупоров выполняли наложением эквипотенциальных сечений поверхностей отклика с улучшением параметров на двумерных проекциях поверхностей отклика, описываемых уравнениями регрессии. Для построения эквипотенциальных сечений поверхности отклика использована ЭВМ. Методика построения кусочно-непрерывных моделей, построения и наложения эквипотенциальных сечений поверхности отклика изложена в [1].

В табл. 1 приведены коэффициенты уравнений регрессии в кодированных переменных, для всех интервалов варьирования, где обозначения соответствуют:  $Y_1$  – предел прочности при сжатии, кг/см<sup>2</sup>,  $Y_2$  – открытая пористость, %,  $Y_3$  – линейная усадка в обжиге, %. Величина коэффициентов соответствует относительной «силе» влияния переменных на параметры оптимизации. Кодирование переменных сделано по общему правилу для линейных планов типа  $2^n$ :  $\min X = -1$ ;  $\max X = +1$  в каждом частном интервале. Полученные уравнения регрессии были решены на ЭВМ относительно каждого  $Y_n$  с шагом: по  $X_1 \pm 0,00825$  и по  $X_2 \pm 0,00825$ .

Область существования оптимальных составов определяли по графическим данным, учитывая следующие требования к огнеупору: предел прочности при сжатии – не менее 3000 кг/см<sup>2</sup>; открытая пористость – не более 8,5 %; свойства не должны изменяться более чем на 10 % при изменении содержания компонентов связки до  $\pm 2$  %, что обосновало требование обеспечить технологичность состава масс и изделий.

Проекция эквипотенциальных сечений поверхностей отклика  $Y_1 = f(X_1X_2)$ ,  $Y_2 = f(X_1X_2)$ ,  $Y_3 = f(X_1X_2)$  строили на основе результатов расчетов, представленных в табл. 2,3 в зависимости от типа наполнителя. Совмещение приведенных рельефных планов проекций эквипотенциальных сечений позволяет определить область составов обладающих оптимальным сочетанием свойств.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнений регрессии  $Y_n = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2$

Обозначение типа наполнителя	Параметр оптимизации, $Y_{II}$	Интервал варьирования переменной $X_1$	Коэффициенты			
			$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$
ПК	$Y_1$	A	2938,0	+62,0	238,0	262,0
		B	2887,0	-112,0	512,0	12,0
	$Y_2$	A	18,05	-0,20	-1,05	0,70
		B	15,0	-2,90	1,55	1,90
	$Y_3$	A	8,7	0,60	0,25	0,35
		B	7,9	-1,50	1,40	0,65
РК	$Y_1$	A	3438,0	538,0	488,0	488,0
		B	4288,0	313,0	863,0	-113,0
	$Y_2$	A	20,2	-1,10	-1,60	-0,10
		B	11,2	-7,95	-0,45	1,25
	$Y_3$	A	8,8	0,30	0,45	0,25
		B	8,8	-0,30	1,50	0,80
БКИ	$Y_1$	A	2263	188	238	63,0
		B	2638	238	238	-63,0
	$Y_2$	A	18,85	0,85	-0,60	-1,30
		B	19,25	0,05	-3,80	-1,90
	$Y_3$	A	6,8	-0,2	0,35	0,25
		B	5,7	-0,9	1,0	0,45

Эта область является общей для всех планов  $Y_1 = f(X_{12})$  для каждого вида наполнителя. Видно, что область оптимальных составов с наполнителем БКИ чрезвычайно узка. Использование боя корундовых изделий для изготовления шаров-наполнителей высокотемпературных теплообменников – нереально. Огнеупоры из масс с наполнителем РК обладают удовлетворительными свойствами в достаточно широкой области составов. Однако, плавленные порошки РК (с добавкой 5 %  $TiO_2$ ) дефицитны. Кроме того, известно [12,13], что добавка двуокиси титана снижает температуру начала деформации под нагрузкой огнеупоров из корунда. Это не приемлемо для изделий, эксплуатируемых в высокотемпературных теплообменниках.

Таблица 2 – Проекция эквипотенциальных сечений поверхностей отклика  $Y_1 = f(X_1X_2)$ ,  $Y_2 = f(X_1X_2)$ ,  $Y_3 = f(X_1X_2)$

Исходное содержание этил-силиката –32, вес. %	Исходное содержание концентрированной соляной кислоты, вес. %.	Соответствие эквилиний следующим значениям $Y_n$ для наполнителя типа БКИ		
		$Y_1 \pm 11,933$	$Y_2 \pm 0,112$	$Y_3 \pm 0,038$
$X_1$	$X_2$			
		1900	13,693	3,418
		2033	14,938	3,838
		2167	16,184	4,258
		2300	17,629	4,679
		2433	18,675	5,099
		2566	19,920	5,520
		2700	21,166	5,940
		2833	22,411	6,360
		2966	23,657	6,781
		3100	24,903	7,201

Таким образом, наиболее перспективным из исследованных являются огнеупоры из масс с электроплавленным корундом ПК в качестве наполнителя, приготовленного на этилсиликатных связках, состав которых находится в границах оптимальности полученных совмещением областей, определяемых приведенными результатами (табл. 2,3).

Таблица 3 – Проекция эквивалентных сечений поверхностей отклика  $Y_1 = f(X_1X_2)$ ,  $Y_2 = f(X_1X_2)$ ,  $Y_3 = f(X_1X_2)$

Исходное содержание этилсиликата –32, вес. %	Исходное содержание концентрированной соляной кислоты, вес. %	Соответствие эквивалентных значений $Y_n$ для наполнителя типа ПК		
		$X_1$	$X_2$	
		$Y_1 \pm 12,509$	$Y_2 \pm 0,111$	$Y_3 \pm 0,057$
		2250	8,890	4,458
		2389	10,124	5,085
		2528	11,359	5,713
		2666	12,593	6,341
		2805	13,828	6,969
		2944	15,062	7,596
		3083	16,297	8,224
		3222	17,531	8,852
		3360	18,766	9,480
		3500	20,000	10,108

Литература

1. Гуренко Л.П., Логвинков С.М., Семченко Г.Д., Гуренко М.С.. Оптимизация составов этилсиликатных связок для получения огнеупорных материалов //Інтегровані технології та енергозбереження.– №2. – 2003. – С. 80-84.
2. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КОЦАРЕНКО В.А., САТАРИН А.В.. Компьютерные технологии в инженерной химии.–Харьков: НТУ «ХПИ», –2001.–392 с.
3. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., БАБАК Т.Г., КОЦАРЕНКО В.А., ПОНОМАРЕНКО Е.Д., САТАРИН А.В. Компьютерные технологии в инженерной химии.–Харьков: НТУ «ХПИ»,–2002.– 364 с.
4. Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.–Харьков: НТУ «ХПИ»,–2001.–392 с.
5. Бондарь А.Г. Математическое планирование в химической технологии. –К.: Выща школа,– 1973.– 280 с.
6. Закгейм Ю.А. Введение в моделирование химико-технологических процессов.– М.: Химия, – 1993.– 224 с.
7. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.. Статистические методы планирования и обработки экспериментов.– М.: МХТИ им. Д.И.Менделеева,–1992.– 152 с.
8. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. –К.: «Техника»,– 1975.– 168 с.
9. Гуренко Л.П., Семченко Г.Д., Гуренко М.С. Дисперсна система на основі електрокорунду та кремнійполімерного зв'язуючого. // Збірник «Фізика конденсованих високомолекулярних систем» / Наук. записки Рівненського педінституту. –Вип.3,– 1997.–С. 227-230.
10. Гуренко Л.П., Моцаренко В.А., Гуренко М.С. Определение состава самотвердеющих масс для их эффективного уплотнения // Тр. 6 междунар. конф. «Теория и практика процессов измельчения, разделения, смешения и уплотнения». –Одесса: ОГМАУ, –1998.– С. 98-103.
11. Шашков С.А., Телегин Г.П.. Требования к материалам для высокотемпературного оборудования МГДЭС -500. – Изд. ИВТ АН СССР, М. 1978.– 52 с.
12. Кабакова И.И., Дегтярева Э.В., Кайнарский И.С. Особо плотные корундовые огнеупоры // Огнеупоры, № 1, 1971, С. 30-36.
13. Дегтярева Э.В., Кайнарский И.С., Кабакова И.И. Структура и ползучесть корундовых огнеупоров // Огнеупоры, № 4, 1971, С. 35-43.