

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЖИДКОСТНОГО БОРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2021 Хаймович И.Н.^{1,2}, Лищенко Р.И.¹.

^{1,2}Самарский университет государственного управления

«Международный институт рынка», г. Самара, Россия

²Самарский университет, г. Самара, Россия

В статье моделируется процесс жидкостного борирования цементированной железной металлокерамики. Целью этой химико-термической обработки является повышение поверхностной твердости и износостойкости металлокерамических изделий, изготовленных из порошка и использующихся главным образом в инструментальной оснастке. Предварительная цементация проводится с целью повышения общего комплекса свойств.

Ключевые слова: математическая модель, зависимость, эксперимент, дисперсия, жидкотекучесть, информационные технологии.

Математическая модель – это приближенное описание какого-либо класса явлений или объектов на языке математики. Основная цель моделирования – исследовать эти объекты и предсказать результаты будущих наблюдений [1-6].

Математическое моделирование, а в последние годы и часто сопровождающий его компьютерный эксперимент незаменимы в тех случаях, когда натуральный эксперимент невозможен или затруднен по тем или иным причинам [7-10]. Например, многие современные технологии проводятся в условиях, в которых человек не способен непосредственно контролировать каж-

дый этап. К таким технологическим процессам относятся процессы жидкотекучести металлов. Зависимой переменной (y) служила характеристика износа образцов, определяющаяся на машине Шкода-Савина по стандартной методике. Было решено варьировать факторы на двух уровнях. Значение факторов на основном, верхнем и нижнем уровнях, а также интервалы варьирования приведены в таблице 1, также там указаны данные эксперимента, причем для факторов X1, X2 и X3 записан полный факторный эксперимент, а $x_4 = x_1x_2x_3$, $x_5 = -x_1x_3$, $x_6 = -x_2x_3$. Исходные данные можно увидеть в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные

Факторы		Тем- ра, °С	Кол-во СК10,%	Размер гранул СК10, мм	Кол-во В ₂ О ₃ ,%	Кол-во NaCl,%	Время насы- щения, ч	Износ, мм ³	
Основной уро- вень (X ₁₀)		1000	20	0,50	25	15	3		
Интервал варьи- рования (ΔX _i)		50	10	0,25	25	5	1		
Верхний уро- вень (x _i =1)		1050	30	0,75	50	20	4		
Нижний уро- вень (x _i =-1)		950	10	0,25	0	10	2		
Код		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	y	
№ опыта	Поря- док реали- зации	+	+	+	+	-	-	0,60	
		-	+	+	-	+	-	0,55	
1	6	+	-	+	-	-	+	0,80	
2	2	-	-	+	+	+	+	0,85	
3	5	+	+	-	-	+	+	0,60	
4	1	-	+	-	+	-	+	0,95	
5	7	+	-	-	+	+	-	1,50	
6	8	-	-	-	-	-	-	1,00	
7	3								
8	4								
Опы- ты в центре плана	1	0	0	0	0	0	0	ȳ ₀ = 0,85	0,90
	2	0	0	0	0	0	0		0,80
	3	0	0	0	0	0	0		0,80
	4	0	0	0	0	0	0		0,90

Запишем результаты определения жидкотекучести во всех опытах. Для каждого опыта по формуле расчета дисперсии для неравномерного дублирования опытов:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{ug} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (1)$$

где y_{ug} – результат g -го повторения u -го опыта; \bar{y}_u – среднее арифметическое значение всех n_u дублей u -го опыта; f_u – число степеней свободы при определении u -й построчной дисперсии.

Формула для нахождения числа степеней свободы:

$$f_u = n_u - 1. \quad (2)$$

Для нашего случая получаем:

$$f_4 = 4 - 1 = 3.$$

Рассчитаем построчную дисперсию $S_{y_u}^2$ по формуле 1:

$$S_{y_u}^2 = 0,607.$$

Соответственно $S_y = 0,078$.

В качестве факторов выбрали температуру борирования (X_1); количество силикокальция марки СК10, который вводили в расплав $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{NaCl}$ сверх 100% (X_2); размер гранул силикокальция (X_3); количество B_2O_3 (X_4).

Запишем интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях.

В данном случае можно построить модель:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < l \leq 4} b_{ijl} x_i x_j x_l + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4$$

Для расчета коэффициентов этой модели приведена расширенная матрица планирования (см. таблицу 1) и результаты опытов (средние из трех). Коэффициенты подсчитываем по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, i = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

где x_{iu} – элементы матрицы условий эксперимента, y_u – элементы матрицы результатов опыта.

Их значения оказались следующими:

$$b_0 = 0,86; b_1 = 0,02; b_2 = -0,18;$$

$$b_3 = -0,16; b_4 = 0,12; b_5 = 0,02;$$

$$b_6 = -0,06;$$

Итак, после реализации полного факторного эксперимента получаем следующее уравнение регрессии:

$$y = 0,86 + 0,2x_1 - 0,2x_2 - 0,15x_3 + 0,12x_4 + 0,12x_5 + 0,02x_6 - 0,06x_7.$$

Поскольку в данном случае опыты не дублировали, дисперсии оценок коэффициентов считали по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{nN}, \quad (4)$$

где n – число дублей.

Получаем $S_{b_i}^2 = 0,034$.

Соответственно среднеквадратичная ошибка $S_{b_i} = 0,18$.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_1 = 3$ табличное значение t -критерия $t_{0,05; 3} = 3,18$. По формуле рассчитываем доверительный интервал:

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} S_{b_i}, \quad (5)$$

где t – критерий Стьюдента.

В итоге подсчитаем доверительный интервал коэффициентов регрессии для нашего примера: $\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,02 = 0,064$.

Коэффициенты, абсолютная величина которых равна доверительному интервалу или больше его, следует признать статистически значимыми. Статистически незначимые коэффициенты (в данном случае b_1, b_3, b_6) из модели можно исключить. Значит в данном случае $k' = 4$.

Итак, после реализации полного факторного эксперимента получаем следующее уравнение регрессии:

Таблица 2 - Сравнение экспериментальных и расчетных значений

Номер опыта	$U_{\text{эксп}}$	$U_{\text{расч}}$	$ \Delta y $	Δy
1	0,6	0,64	0,04	0,0016
2	0,55	0,4	0,15	0,0225
3	0,8	0,66	0,14	0,0196
4	0,85	0,9	0,05	0,0025
5	0,6	0,61	0,01	0,0001
6	0,95	0,85	0,1	0,0100
7	1,5	1,31	0,19	0,0361
8	1	1,07	0,07	0,0049
Σ				0,0973

$$y=0,86-0,2x_2-0,15x_3+0,12x_4 \quad (6)$$

Прежде всего проверили адекватность модели по F-критерию. Расчетное значение износа ($y_{расч}$), определенное по полученному уравнению, указано в таблице 2.

Поскольку модель включает $k'=4$ коэффициента, число степеней свободы находим по формуле:

$$f_2 = N - k' \quad (7)$$

Поскольку дублирование опытов было равномерным, используем формулу для расчета дисперсии неадекватности следующего вида:

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum(y_{расч} - y_{эксп})^2}{f_2} \quad (8)$$

$$S_{неад}^2 = \frac{0,04^2 + 0,05^2 + 0,14^2 + 0,05^2 + 0,01^2 + 0,1^2 + 0,19^2 + 0,07^2}{0,075} = 0,04$$

Следовательно, дисперсия неадекватности $S_{неад}^2 = \frac{0,0973}{4} = 0,0243$.

Гипотезу об адекватности модели проверим по критерию Фишера. Его расчетное значение считается по следующей формуле:

$$F_{f_2;f_1}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (9)$$

где S_y^2 - дисперсия опыта;

$$F_{f_2;f_1}^{расч} = \frac{0,04}{0,075} = 0,2.$$

При уровне значимости $\alpha=0,05$ табличное значение F-критерия

$F_{f_2;f_1}^{расч} = 0,2$. Т.к. $F^{расч} < F^{табл}$, гипотеза об при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Проверили так же гипотезу об адекватности модели по t-критерию.

В данном случае $b_0=0,86$; $\bar{y}_0 = 0,85$; $S_y=0,6075$, $N=8$. Поэтому расчетное значение t-критерия по формуле:

$$t^{расч} = \frac{|0,86-0,85|\sqrt{8}}{0,075} = 0,2.$$

Выполняется условие $t^{расч} < t^{табл}$, гипотеза об адекватности моделей не отвергается и по t-критерию.

Методом крутого восхождения было решено пытаться повысить износостойкость борированного покрытия. Меняли только факторы, эффекты которых оказались статистически значимыми. Остальные факторы поддерживали на основном уровне.

Порядок реализации мысленных опытов рассчитали по следующим зависимостям:

$$b_i \Delta_i(2ф.) = -0,181 * 10 = -1,81$$

$$b_i \Delta_i(3ф.) = -0,156 * 0,25 = -0,039$$

$$b_i \Delta_i(4ф.) = 0,119 * 25 = 2,975.$$

Для фактора X_4 был выбран шаг в $5^\circ C$ ($\Delta_4=5$). Шаги для факторов X_2 и X_3 установили из пропорций:

$$\Delta b_2 = \frac{b_2 \Delta X_2 \Delta_4}{b_4 \Delta X_4} = \frac{1,85 * 5}{2,975} = 3\%;$$

$$\Delta b_3 = \frac{b_3 \Delta X_3 \Delta_4}{b_4 \Delta X_4} = \frac{0,039 * 5}{2,975} = 0,05 \text{ мм.}$$

Поскольку в данном случае требовалось найти возможно меньшее значение износа, знаки шагов выбрали обратными знакам соответствующих коэффициентов.

При назначении условий мысленных опытов учитывали, что при задержании в ванне силикокальция больше 50% расплав становится высоковязким и нетехнологичным.

Вывод: в данной работе было рассмотрено математическое моделирование материалов на основе планирования экспериментов с использованием факторных планов.

Чтобы получить наименьшей износ образцов, за которые мы приняли зависимую переменную «у», определявшие все на машине типа Шкода – Савина по стандартной методике, следует выбрать температуры борирования 1000° , количество силикокальция СК10 38%, размер его гранул 0,85 мм, количество NaCl 15%, время насыщения 3 часа. В результате выбор таких факторов предлагает минимальный износ, равный $0,33 \text{ мм}^2$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хаймович И.Н., Демьяненко Е.Г. Математическое моделирование материалов и процессов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 82 с.
2. Ерисов Я., Хаймович И., Кузин А., Смелов В. Interface quality indices of Al–10Si–Mg aluminum alloy and Cr18–Ni10–Ti stainless-steel bimetal fabricated via selective laser melting. - 2021. – 172 с.
3. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение, 2008. – 304 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров – М.: Наука, 2004. – 832 с.
5. Мальцев М.В. Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 487 с.
6. Материалы в машиностроении.– М.: Машиностроение, 1998. – Т. 3. – 446 с.
7. Харламов А., Уваров А. Deform – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением // САПР и графика. – 2003. – № 6.
8. Промтов А.И. Компьютерные технологии в науке, технике и образовании. – Иркутск: Изд-во Иркутского государственного ун-та, 2000. – 426 с.
9. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
10. Хаймович И.Н. Автоматизация проектирования объектов заготовительно-штамповочного производства компрессорных лопаток авиационных двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 2014. - № 2. - С. 44-48.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON RESISTANCE AGAINST HIGH-TEMPERATURE OXIDATION OF NIOBIUM-BASED ALLOYS USING INFORMATION TECHNOLOGIES

© 2021 Irina N. Khaimovich^{1,2}, Roman I. Lischenko²

¹Samara University of Public Administration
“International Market Institute“, Samara, Russia

²Samara University, Samara, Russia

The article studies the process of liquid boration of cemented iron cermets. The purpose of this chemical-thermal treatment is to increase the surface hardness and wear resistance of metal-ceramic products made from powder and used mainly in tooling. Preliminary cementation is carried out in order to increase the overall set of properties.

Keywords: mathematical model, dependence, experiment, dispersion, fluidity, information technology.