

А.С.Шамшур, канд. техн. наук,
Н.Г.Сагателян, Х.Д.Мюллер(БПИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования износостойкости напыленных и оплавленных самофлюсующихся твердых сплавов (ПГ-СР4, ПГ-СР3 и ПГ-СР2) производились при трении скольжения в условиях циркулярного смазывания (масло М-8) с охлаждением масла. Одновременно испытывались три образца. Среднее значение износа трех образцов бралось как результат одного опыта. Общая площадь трения образцов составляла 48 мм². Из них три устанавливались в специальную качалку под углом 120° относительно друг друга. Такая конструкция державки обеспечивала равномерное распределение усилия прижима образцов. В качестве контртела были выбраны дисковые образцы из серого чугуна СЧ24-44.

За эталон износа был взят износ образцов из стали 45, закаленных до твердости НРС 46-48. Испытания образцов, упрочненных самофлюсующимися твердыми сплавами, и из стали 45 производились в идентичных условиях. Весовой износ их (\dot{I}) был взят за $5 \cdot 10^5$ оборотов шпинделя машины трения МФТ-1.

С целью сокращения числа опытов и более точного математического описания поверхности отклика в широком диапазоне относительных скоростей скольжения и давлений в месте контакта применялось ортогональное центральное композиционное планирование (ЦКП).

Математическая модель уравнения с учетом эффекта взаимодействия независимых переменных и ошибки эксперимента была представлена в виде полинома второй степени

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2.$$

Для реализации модели проводился полный факторный эксперимент с добавлением опытов в звездных точках и в центре плана.

Условия планирования приведены в табл. 1, а матрица ортогонального ЦКП для двух факторов - в табл. 2.

Проверка воспроизводимости опытов, определение коэффициентов регрессии и проверка их значимости, а также определение адекватности полученного уравнения регрессии производилось согласно методике [1]:

1. Определялась дисперсия для каждого опыта

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2,$$

где k - число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях. В нашем случае $k = 5$; j - номер опыта; i - номер фактора; Y_{ji} - результаты параллельных опытов; \bar{Y}_j - среднее арифметическое отклика.

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, N).$$

Воспроизводимость опытов проверялась по расчетным значениям критерия Кохрена

$$G_p < G.$$

Расчетные значения критерия Кохрена определялись

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2},$$

где $\max S_j^2$ - наибольшая из оценок дисперсий; $\sum_{j=1}^N S_j^2$ - сумма всех оценок дисперсий.

Таблица 1

Условия планирования

Условия планирования	v , м/с	$P \cdot 10^5$, Па
Кодовое обозначение	X_1	X_2
Верхний уровень	3,92	2,5
Нижний уровень	0,78	0,5
Основной уровень	2,35	1,5
Интервал варьирования	1,57	1,0

Таблица 2

Матрица ортогонального ЦКП для двух факторов

Система опытов	Номер опыта	X_1		X_2		X_1	X_2
		X_1	X_2	X_1	X_2		
Полный факторный эксперимент	1	-1	-1	+1	+0,33	+0,33	
	2	-1	+1	-1	+0,33	+0,33	
	3	+1	-1	-1	+0,33	+0,33	
	4	+1	+1	+1	+0,33	+0,33	
Опыты в звездных точках	5	-1	0	0	+0,33	-0,67	
	6	+1	0	0	+0,33	-0,67	
	7	0	-1	0	-0,67	+0,33	
	8	0	+1	0	-0,67	+0,33	
Опыты в центре плана	9	0	0	0	-0,67	-0,67	

При доверительной вероятности $P = 0,95$, $k = 5$, $N = 9$, $G = 0,358$ [1].

Для определения погрешности эксперимента производилось вычисление оценки дисперсии воспроизводимости

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2.$$

Коэффициенты регрессии при ортогональном ЦКП рассчитывались по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j - \frac{b_{11}}{N} \sum_{j=1}^N X_{j1}^2 - \frac{b_{22}}{N} \sum_{j=1}^N X_{j2}^2;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{j=1}^N X_{j1} Y_j}{\sum_{j=1}^N (X_{j1})^2}; \quad b_2 = \frac{\sum_{j=1}^N X_{j2} Y_j}{\sum_{j=1}^N (X_{j2})^2};$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{j1} X_{j2} Y_j}{\sum_{j=1}^N (X_{j1} X_{j2})^2}; \quad b_{11} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{j1}^* Y_j}{\sum_{j=1}^N (X_{j1}^*)^2};$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{j2}^* Y_j}{\sum_{j=1}^N (X_{j2}^*)^2}; \quad X_{ji}^* = X_{ji}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji}^2.$$

Значимость коэффициентов регрессии проверялась уравнением $|b| \geq S_b t$,

где S_b - оценка дисперсии; t - значение критерия Стьюдента применительно к нашим опытам, $t = 2,78$ [1].

Для расчета оценок дисперсий использовались формулы:

$$S_{b_0}^2 = \frac{S_y^2}{N} + \frac{nb_{ii}^2}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji}^2; \quad S_{b_1}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{j1})^2};$$

$$S_{b_2}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{j2})^2}; \quad S_{b_{12}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{j1} X_{j2})^2};$$

$$S_{b_{11}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{j1}^*)^2}; \quad S_{b_{22}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{j2}^*)^2}.$$

Проверка адекватности уравнения регрессии производилась с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{\max(S_{ад}^2, S_y^2)}{\min(S_{ад}^2, S_y^2)} \leq F,$$

где

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N - B} (Y_j^э - Y_j^p)^2,$$

где N - число опытов; B - число коэффициентов регрессии искомого уравнения, включая и свободный член; $Y_j^э$, Y_j^p - экспериментальное и расчетное значения функции отклика в j -м опыте.

Значение критерия Фишера (F) для числа степеней свободы $f_{ад} = N - B = 9 - 6 = 3$ при доверительной вероятности $P = 0,95$ равно 6,59 [1].

Вычисленные коэффициенты регрессии приведены в табл. 3.

Проверка значимости коэффициентов регрессии показала, что для сплавов ПГ-СР3 и ПГ-СР4 коэффициенты регрессии b_{12} являются незначительными и их можно исключить из уравнения. Для остальных исследуемых материалов все коэффициенты регрессии значимы.

Таким образом, искомые уравнения регрессии в обычной форме будут иметь следующий вид:

для сплава ПГ-СР4

$$Y = 2,7117 + 1,8136 X_1 + 1,855 X_2 + 0,8923 X_1^2 + 1,1723 X_2^2;$$

для сплава ПГ-СР3

$$Y = 3,3760 + 3,151 X_1 + 2,5617 X_2 + 1,985 X_1^2 + 1,397 X_2^2;$$

для сплава ПГ-СР2

Таблица 3

Значение коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии и их значимость	Испытуемый материал			
	ПГ-СР4	ПГ-СР3	ПГ-СР2	Сталь 45
b_0	2,7117	3,3760	2,8646	5,4388
b_1	1,8136	3,1510	7,0583	7,1550
b_2	1,855	2,5617	10,2790	13,8903
b_{12}	0,142	0,2145	6,0245	6,2090
b_{11}	0,8923	1,9850	6,7390	8,4596
b_{22}	1,1723	1,3970	8,505	9,7116

Результаты проверки адекватности регрессии

Критерий Фишера	Испытуемый материал			
	ПГ-СР4	ПГ-СР3	ПГ-СР2	Сталь 45
F_p	2,476	6,39	6,5476	2,246
F	6,59	6,59	6,59	6,59

$$Y = 2,8646 + 7,0583 X_1 + 10,279 X_2 + 6,045 X_1 X_2 + 6,739 X_1^2 + 8,505 X_2^2;$$

для стали 45

$$Y = 5,4389 + 7,155 X_1 + 13,8903 X_2 + 6,209 X_1 X_2 + 8,4596 X_1^2 + 9,7116 X_2^2.$$

Результаты проверки адекватности приведены в табл. 4.

Следовательно, полученные в общем виде уравнения регрессии достаточно хорошо описывают поверхность отклика. Используя характеристику плана эксперимента и подставляя вместо X_1 и X_2 следующие зависимости $X_1 = \frac{v - 2,35}{1,57}$ и $X_2 = \frac{P - 1,5}{1}$, получаем окончательный вид уравнения:

для сплава ПГ-СР4

$$\dot{I} = 1,851 - 0,546v - 1,662P + 0,362v^2 + 1,172P^2;$$

для сплава ПГ-СР3

$$\dot{I} = 2,425 - 1,797v - 1,629P + 0,805v^2 + 1,397P^2;$$

для сплава ПГ-СР2

$$\dot{I} = 24,784 - 14,165v - 24,292P + 3,837vP + 2,734v^2 + 8,505P^2;$$

для стали 45

$$\dot{I} = 28,639 - 17,055v - 24,538P + 3,955vP + 3,432v^2 + 9,712P^2.$$

Применение ортогонального ЦКП в данных исследованиях показало, что экспериментальные и расчетные значения величин износа для различных скоростей скольжения и давлений в месте контакта отличаются незначительно. Следовательно, метод ортогонального ЦКП позволяет не только существенно сократить затраты времени на проведение исследований по износу материалов, а и отобразить влияние на износ как факторов, так и их взаимодействия.

Л и т е р а т у р а

1. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. - Л., 1975. - 48 с.