

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЯЕМЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Ю.О. Шевцов, М.В. Радченко, С.А. Маньковский, С.Г. Уварова, Т.Б. Радченко

В статье по результатам регрессионного анализа получены оптимальные режимы сверхзвуковой газопорошковой наплавки применительно к панелям котлов с «кипящим слоем», обеспечивающие получение качественных защитных покрытий.

Ключевые слова: математическое моделирование, регрессионный анализ, метод наименьших квадратов, сверхзвуковая газопорошковая наплавка, котлы с «кипящим слоем».

Проблема износа поверхностей деталей, работающих в агрессивных условиях эксплуатации в различных отраслях промышленности теплоэнергетика, сельское хозяйство и т. д.), в настоящее время является актуальной. Так, например, в теплоэнергетике проблема абразивного износа в высокотемпературной области проявляется на участках трубных элементов теплоэнергетических установок с «кипящим слоем». Решить данную проблему можно путем создания защитных покрытий на поверхностях наиболее подверженных износу. Анализ способов создания защитных покрытий показал, что сверхзвуковая газопорошковая наплавка является одним из перспективных способов. Для наиболее эффективного создания качественных защитных покрытий необходимо соблюдение и оптимальное сочетание технологических параметров режима наплавки, что определялось с помощью математического моделирования.

В качестве базового метода для математического моделирования процессов получения защитных покрытий был выбран метод наименьших квадратов, позволяющий с определенной степенью достоверности строить математические модели на основе экспериментальных данных.

В качестве факторов (переменных) использовались: скорость наплавки V_n , дистанция наплавки L_n , расход порошка G_p , расход газов Q . Изучаемой величиной (откликом)

являлась относительная износостойкость ε , как один из главных показателей качества покрытий. В качестве эталона при определении износостойкости использовали сталь 45 в закаленном виде.

Обозначим скорость наплавки V_n (м/ч) – X_1 , дистанцию наплавки

L_n (м) – X_2 , расход порошка G_p (кг/ч) – X_3 , расход газа Q (м³/ч) – X_4 , относительную износостойкость ε – Y . Матрица планирования приведена в таблице 1. В данной матрице параметром оптимизации служила относительная износостойкость.

Было выбрано минимальное число параллельных опытов – два. Для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями, была проведена рандомизация опытов, заключающаяся в выборе случайной последовательности при постановке опытов. Данную операцию производили в соответствии с таблицей случайных чисел. Общее число опытов в данном случае – шестнадцать. С помощью таблицы случайных чисел получена последовательность: 15, 13, 10, 5, 14, 4, 6, 1, 7, 8, 3, 2, 9, 12, 11, 16. Порядок проведения и результаты опытов пред-

ставлены в таблице 2 (здесь y' и y'' – результаты параллельных опытов, $\bar{y}$ – их среднее значение).

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

	Факторы			
	V_n (м/ч)	L_n (м)	G_p (кг/ч)	Q (м ³ /ч)
Основной уровень	7,5	0,025	3	2,9
Интервал варьирования (ΔX_i)	1,5	0,005	1	0,9
Верхний уровень (+1)	9	0,03	4	3,8
Нижний уровень (-1)	6	0,02	2	2,0

Код	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Опыт 1	–	–	–	–
Опыт 2	+	–	+	–
Опыт 3	–	–	+	+
Опыт 4	–	+	–	+
Опыт 5	+	+	–	–
Опыт 6	+	–	–	+
Опыт 7	–	+	+	–
Опыт 8	+	+	+	+

Таблица 2

Порядок проведения и результаты опытов

№ опыта	№ парал- лельного	Порядок проведения двух повторных опытов	y'	y''	$\bar{y}$
1	опыта	8, 13	1,89	1,95	1,92
2	10	3, 12	2,50	2,83	2,665
3	11	11, 15	4,29	4,35	4,32
4	12	6, 14	3,65	3,82	3,735
5	13	2, 4	3,12	2,96	3,04
6	14	5, 7	3,59	3,67	3,63
7	15	1, 9	3,26	3,19	3,225
8	16	10, 16	2,84	2,63	2,735

Дисперсия среднего арифметического высчитывается по формуле (1):

$$s_{(\bar{y})}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{Nn(n-1)}. \quad (1)$$

Результаты вычисления приведены в таблице 3.

Табличное значение критерия для восьми разных опытов и числа степеней свободы $n-1=1$ равно 0,679 (уровень значимости 0,05).

Таблица 3

Дисперсия среднего арифметического

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
s_i^2	0,01	0,34	0,01	0,09	0,08	0,02	0,02	0,13

Проверка однородности дисперсий производится с помощью критерия Кохрена, вычисляемого по формуле (2):

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2}. \quad (2)$$

$$G = \frac{0,34}{0,01+0,34+0,01+0,09+0,08+0,02+0,02+0,13} = 0,4857$$

Экспериментальная величина критерия Кохрена не превышает табличного значения, гипотеза об однородности дисперсий принимается. Дисперсия воспроизводимости равна

$$S_{\{\bar{y}\}}^2 = \sum_{i=1}^N s_i^2 / 8 = 0,7 / 8 = 0,09.$$

Число степеней свободы этой дисперсии $N(n-1)=8$, где N – количество

опытов, n – количество параллельных опытов.

Расчетная матрица и оценки коэффициентов регрессии, вычисляемые по формулам 3 и 4, представлены в таблице 4:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ji}}{N}; \quad (3)$$

$$b_{uj} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ui} x_{ji}}{N}. \quad (4)$$

Дисперсия определения коэффициентов регрессии:

$$S_{\{b_j\}}^2 = S_{\{\bar{y}\}}^2 / N = 0,09 / 8 = 0,0112.$$

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЯЕМЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Таблица 4

Расчетная матрица и коэффициенты регрессии

Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂ =X ₃ X ₄	X ₁ X ₃ =X ₂ X ₄	X ₁ X ₄ =X ₂ X ₃	b_{ij}
1	+	-	-	-	-	+	+	+	$b_0 = -0,2812$
2	+	+	-	+	-	-	+	-	$b_1 = -0,2725$
3	+	-	-	+	+	+	-	-	$b_2 = -0,0775$
4	+	-	+	-	+	-	+	-	$b_3 = -0,0325$
5	+	+	+	-	-	+	-	-	$b_4 = -0,0250$
6	+	+	-	-	+	-	-	+	$b_{12} = -0,0250$
7	+	-	+	+	-	-	-	+	$b_{13} = 0,0187$
8	+	+	+	+	+	+	+	+	$b_{14} = 3,1587$

Производим расчет остаточной суммы квадратов, его результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5

Расчет остаточной суммы квадратов

Номер опыта	$\bar{y}$	$\hat{y}$	$\Delta y = \hat{y} - \bar{y}$	$(\Delta y)^2$
1	1,92	2,2234	0,3034	0,0921
2	2,665	-2,7987	0,1337	0,0179
3	4,32	-4,2047	-0,1153	0,0133
4	3,735	-3,2957	-0,4393	0,1930
5	3,04	-3,7129	0,6729	0,4529
6	3,63	2,2587	-0,3713	0,1379
7	3,225	3,0713	-0,1537	0,0236
8	2,735	2,4637	-0,2713	0,0736

Рассчитаем дисперсию адекватности по формуле (5):

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta y)^2}{f}, \quad (5)$$

где f – число степеней свободы дисперсии адекватности.

$$f = N - (k + 1) = 8 - (4 + 1) = 3.$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{0,0921 + 0,0179 + 0,0133 + 0,1930 + 0,4529 + 0,1379 + 0,0236 + 0,0736}{3} = 0,3348$$

Критерий Фишера вычисляем по формуле:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{(y)}^2}, \quad (6)$$

$$F = \frac{0,3348}{0,09} = 3,7196.$$

Табличное значение критерия Фишера для числа степеней свободы числителя 3 и знаменателя 8 равно 4,1. Экспе-

риментальная величина критерия Фишера не превышает табличное значение, модель адекватна.

Оцениваем значимость коэффициентов регрессии. Величина критерия Стьюдента для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы, с которыми определялась дисперсия воспроизводимости

$S_{\{\bar{y}\}}^2$, равно 8, равна 2,306. Отсюда доверительный интервал

ШЕВЦОВ Ю.О., РАДЧЕНКО М.В., МАНЬКОВСКИЙ С.А., УВАРОВА С.Г., РАДЧЕНКО Т.Б.

$$\Delta \Delta b_j = \pm 2,306 \cdot 0,09 = 0,20754.$$

Абсолютные величины коэффициентов регрессии, большие доверительного интервала, являются значимыми.

Отбросив статистически незначимые коэффициенты, строим математическую модель:

$$Y = -0,2812 - 0,2725X_1 + 3,1587X_1X_4.$$

В результате оптимизации было выявлено, что максимальной износостойкостью обладают слои, наплавленные на режимах при следующих параметрах:

дистанция наплавки 0,025–0,03 м; расход порошка 2,5–3 кг/ч; скорость наплавки 5–7 м/ч; расход газа 2,0–3,5 м³/ч.

В результате произведенных расчетов была определена степень влияния технологических параметров процесса на один из основных показателей качества защитных покрытий – относительную износостойкость. Так, уравнение математической модели при исследовании этого процесса приобретает вид (7):

$$\varepsilon = -0,2812 - 0,2725 V_n + 3,1587 V_n Q. \quad (7)$$

Таблица 6

Результаты расчетов

	Факторы				Параметр оптимизации
	V_n , (м/ч)	L_n , (м)	G_n , (кг/ч)	Q , (м³/ч)	ε
код	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
b_i	0,7575	0,6312	0,275	0,5987	
$b_i \times X_i$	7,575	0,06312	0,275	0,5987	
Шаг	+0,5	+0,002	+0,05	-0,5	
X_{i0}	5	0,02	4	3,6	5,42
Мысленный опыт	5,5	0,022	4,05	3,55	5,03
Реализованный опыт 1	6	0,024	4,1	3,5	4,64
Реализованный опыт 4	6,5	0,026	4,15	3,45	4,38
Реализованный опыт 2	7	0,028	4,2	3,4	4,02
Мысленный опыт	7,5	0,03	4,25	3,35	3,45
Реализованный опыт 3	8	0,32	4,3	3,3	2,68

По результатам оптимизации получены технологические режимы газопорошковой наплавки применительно к панелям котлов с «кипящим слоем», обеспечивающие получение качественных защитных покрытий.

Шевцов Ю.О., Радченко М.В., зав. кафедрой, проф., **Маньковский С.А., Уварова С.Г., Радченко Т.Б.**, д.т.н., проф., кафедра «Автоматизированный электропривод и электротехнология» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3852) 36-72-23