

Гарипов В.С.

Аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов ОГУ.

Представляет: доктор технических наук С.И. Богодухов

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В статье рассмотрено влияние различных технологических параметров процесса нанесения ионно-плазменных покрытий на износостойкость твердосплавного режущего инструмента. В результате использования математического моделирования для сложных систем получено уравнение регрессии, позволяющее определить износостойкость ионно-плазменных покрытий при заданных технологических параметрах конденсации.

Для изучения технологического процесса нанесения ионно-плазменных покрытий возможно использование моделирования для сложных систем – это экспериментальное определение физических и математических моделей, обладающих определенным приближением к реальным процессам. При помощи моделирования можно воспроизвести изменения в состоянии системы, их оптимизацию и прогнозирование.

Задача построения математической модели технологических процессов нанесения ионно-плазменных покрытий с помощью методов планирования эксперимента требует количественной формулировки цели исследования. Такой количественной характеристикой является параметр оптимизации, который представляет реакцию от воздействия изучаемых факторов на исследуемый процесс.

Параметр оптимизации необходимо выбирать с учетом комплекса требований, он должен быть:

- универсальным и всесторонне отражать свойства процесса;
- характеризовать количественную сторону процесса, иметь числовую оценку;
- эффективным как с точки зрения достижения цели, так и в статистическом смысле;
- простым, с ясным физическим смыслом.

В качестве параметров оптимизации при изучении технологических процессов нанесения ионно-плазменных покрытий могут быть: твердость; микротвердость; напряжение изгиба; износостойкость и другие. При анализе требований предъявляемых к параметру оптимизации наиболее оптимальным, удовлетворяющим большинству требований, является износостойкость.

Осаждение покрытий проводилось на трехкатодной плазменной установке ННВ-6.6-И1, износостойкость определялась склерометрическими методами.

На основании процесса нанесения покрытий отобраны 13 технологических факторов, которые определяют свойства покрытий:

$X_1 = P_{кон}$  – парциальное давление реакционно-го газа, Па;

$X_2 = t_{кон}$  – температура деталей при конденсации покрытий, °С;

$X_3 = U_{оп}$  – опорное напряжение при конденсации покрытий, В;

$X_4 = I_k$  – сила тока дуги на катоде, А;

$X_5 = U_{и.о.}$  – величина тока при ионной очистке, В;

$X_6 = \tau_{и.о.}$  – время ионной очистки плазмой тлеющего разряда, мин;

$X_7 = \tau_k$  – время осаждения покрытий, мин;

$X_8 = h_n$  – толщина покрытия, мкм;

$X_9 = R_a$  – шероховатость деталей до нанесения покрытий, мкм;

$X_{10} = I_{фок.к.}$  – сила тока фокусирующей катушки, А;

$X_{11} = I_{ст.к.}$  – сила тока стабилизирующей катушки, А;

$X_{12} = V_d$  – скорость вращения деталей, об/мин;

$X_{13} = P_{и.о.}$  – давление в реакционной камере при ионной очистке, Па.

Разработана матрица рангов (таблица 1), включающая тринадцать факторов, их размерность и интервалы варьирования, которые ранжировались в соответствие с их влиянием на износостойкость покрытий.

Таблица 1. Матрица рангов

Эксперты (m = 5)	Факторы R = 13												
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>
1	1	2	3	4	5	7	6	10	9	11	12	13	8
2	1	2	5	6	3	6	4	9	7	10	11	13	8
3	1	2	4	6	3	7	5	9	8	10	11	13	12
4	1	2	3	4	7	8	5	6	10	11	12	13	9
5	1	5	2	6	3	7	4	9	8	12	11	13	10
$\sum_{j=1}^m$	5	13	17	26	21	35	24	43	42	54	57	65	47
$\cdot_i$	-29	-21	-17	-8	-13	1	-11	9	8	20	23	31	13
$(\cdot_i)^2$	841	441	289	64	169	1	121	81	64	400	529	961	169

Математическая обработка результатов ранжирования проводилась по формулам [1, 2].

Средняя сумма рангов:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k}, \quad (1)$$

где:  $m$  – число экспериментов;

$a_{ij}$  – ранг  $i$ -го фактора в  $j$ -ом ряду.

Разность между суммой рангов  $i$ -го фактора и средней суммой рангов:

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k} = \sum_{j=1}^m a_{ij} - T, \quad (2)$$

Сумма квадратов разностей:

$$S = \sum_{i=1}^k (\Delta_i)^2, \quad (3)$$

Коэффициент конкордации:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)}, \quad (4)$$

$T = 34,5$ ;  $S = 4095,5$ ;  $W = 0,9$ .

Величина коэффициента конкордации существенно отличается от нуля и меньше единицы, что свидетельствует о неодинаковом ранжировании факторов. Значимость коэффициента конкордации оценивается по критерию  $\chi^2$ . Расчетное значение  $\chi^2$  определяется по формуле:

$$\chi^2 = \frac{12S}{mk(k+1)}, \quad (5)$$

Тогда:  $\chi^2 = 54$ .

При заданном числе степеней свободы  $f = k - 1$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , табличное значение  $\chi^2_{\alpha, f}$  будет меньше расчетного. Табличные значения:  $f = 12$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $\chi^2 = 21,0$ .  $\chi^2_{\alpha, f} = 21 < \chi^2 = 54$ , то можно с 95%-ной доверительной вероятностью утверждать, что коэффициент конкордации значительно отличается от нуля, поэтому степень влияния факторов на параметр оптимизации согласуется с коэффициентом конкордации  $W = 0,9$ . По полученным результатам, на рисунке 1, приведена диаграмма рангов.

Из приведенной диаграммы следует, что распределение факторов соответствует экспоненциальному убыванию. Поэтому не значи-

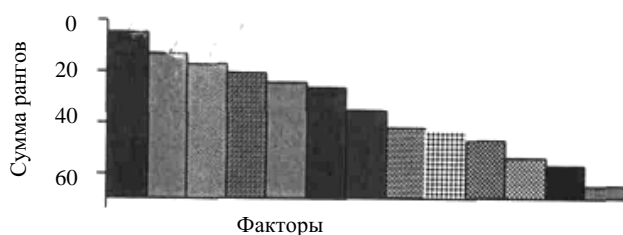


Рисунок 1. Диаграмма рангов

мые факторы можно исключить. Значимыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на износостойкость покрытий, являются:  $X_1$ ;  $X_2$ ;  $X_3$ ;  $X_4$ ;  $X_5$ ;  $X_7$ .

На основании проведенной работы использовался метод математического планирования [3, 4]. Учитывая, что построение матрицы планирования полного факторного эксперимента достаточно трудоемкое (число опытов  $N = 2^6 = 64$ ), использовалась дробная реплика ( $n - 3$ ) с числом опытов  $N = 2^{6-3} = 8$ . В таблице 2 приводятся используемые технологические параметры и интервалы варьирования, оказывающие основное влияние на износостойкость покрытий.

Гипотеза о достаточности для получения адекватного описания процесса линейной модели более вероятна на начальных этапах экспериментального исследования, когда естественно предположить наличие достаточно большого расстояния до поверхности отклика и равномерной пологости поверхности отклика в пределах диапазона изменения факторов оптимизации. Уравнение, которое можно получить по результатам реализации дробной реплики полного факторного эксперимента, является частью бесконечного степенного ряда, которым может быть представлена любая непрерывная функция. Предыдущий член ряда будет иметь коэффициент, по модулю меньший, чем следующий член ряда. Учитывая это обстоятельство, можно предположить, что из всех оценок факторов оценка эффекта взаимодействия наивысшего порядка с большой вероятностью будет незначительно отличаться от нуля.

Строим матрицу планирования, используя рабочие столбцы:  $X_1X_2X_3$ ;  $X_1X_2$ ;  $X_1X_3$  дробной реплики для планирования и оценки линейных эффектов четвертого, пятого и седьмого факторов, таблица 3.

Анализируем условия смешивания с тем, чтобы в максимальной степени разделить оценки эффектов взаимодействия факторов оптимизации.

Определяем генерирующие контрасты:

$$X_4 = X_1X_2X_3; X_5 = X_1X_2; X_7 = X_1X_3$$

Рассчитываем определяющие контрасты, умножая оба генерирующего соотношения на обозначение столбца дополнительного фактора:

$$1 = X_1X_2X_3X_4; 1 = X_1X_2X_5; 1 = X_1X_3X_7.$$

Определим условия смешивания оценок, умножая определяющий контраст на обозначение расчетного столбца интересующего фактора, при этом не учитываем взаимодействия факторов не выше двойных:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \beta_1 + \beta_{25} + \beta_{37}; \\
 b_2 &= \beta_2 + \beta_{47} + \beta_{15}; \\
 b_3 &= \beta_3 + \beta_{45} + \beta_{17}; \\
 b_4 &= \beta_{35} + \beta_{27}; \\
 b_5 &= \beta_{12} + \beta_{34}; \\
 b_7 &= \beta_{13} + \beta_{24}.
 \end{aligned}$$

Уравнение регрессии примет вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_7 X_7 + b_{12} X_{12} + b_{13} X_{13} + b_{14} X_{14} + b_{15} X_{15} + b_{17} X_{17} + b_{23} X_{23} + b_{24} X_{24} + b_{25} X_{25} + b_{27} X_{27} + b_{34} X_{34} + b_{35} X_{35} + b_{37} X_{37} + b_{45} X_{45} + b_{47} X_{47} + b_{57} X_{57}.$$

Преобразуем матрицу планирования, заменив кодированные значения факторов на именованные величины, в рабочую матрицу. В соответствие с рабочей матрицей проводился эксперимент, таблица 4.

После проведения эксперимента по определению износа рассчитывались коэффициенты регрессии.

Свободный член уравнения:

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N X_0 Y_U}{N}, \tag{6}$$

Оценка линейных коэффициентов регрессии:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} Y_U}{N}, \tag{7}$$

Определяем коэффициенты регрессии парных взаимодействий факторов оптимизации:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} Y_U}{N}, \tag{8}$$

где:  $X_{iU}$  – значение i-го фактора в U-ом опыте;  $X_{jU}$  – значение j-го фактора в U-том опыте; N – число опытов.

После расчета коэффициентов уравнения регрессии и оценки их значимости получаем уравнение:

$$Y = 24,2 + 12,1 P_{кон} + 26,8 t_{кон} + 2,4 U_{оп} + 8,6 I_{к} + 6,4 U_{и.о} - 2,6 t_{к} + 8,2 P_{кон} t_{кон} - 2,8 P_{кон} U_{оп} + 8,4 P_{кон} I_{к} - 6,2 t_{кон} U_{оп} + 4,8 t_{кон} I_{к} + 2,8 U_{оп} I_{к} - 2,8 I_{к} U_{и.о}.$$

Анализ данного уравнения показывает:

1. При увеличении температуры деталей, парциального давления реакционного газа и ве-

Таблица 2. Факторы оптимизации и интервалы варьирования

Факторы	$\gamma_{ни}$	$\gamma_{ли}$	$\gamma_{ви}$	$\bullet \gamma_{и}$
Давление осаждения в камере – $X_1$ , мм. рт. ст.	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5,05 \cdot 10^{-3}$	$4,95 \cdot 10^{-3}$
Температура конденсации – $X_2$ , °С	350	150	250	100
Опорное напряжение на подложке в процессе конденсации – $X_3$ , В	250	60	155	95
Сила тока дуги – $X_4$ , А	100	40	70	30
Напряжение выпрямителя – $X_5$ , В	1200	600	900	300
Время осаждения покрытия – $X_7$ , мин	120	30	75	45

Таблица 3. Дробная матрица планирования эксперимента

№ оп.	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_7$	$X_1$	$X_1$	$X_1$	$X_1$	$X_2$	$X_2$	$X_2$	$X_2$	$X_3$	$X_3$	$X_3$	$X_4$	$X_4$	$X_4$	$X_5$	$X_5$	$X_7$	$X_7$	$X_7$	$X_7$	$Y$
	1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
2	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	
3	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	
4	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-	-		
5	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-		
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-		
7	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+		
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		

Таблица 4. Рабочая матрица планирования эксперимента

№ опыта	$P_{кон}$ , мм. рт. ст.	$t_{кон}$ , °С	$U_{оп}$ , В	$U_{и.б.}$ , В	$I_{к}$ , А	$t_{кон}$ , мин	Износ, мкм
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_7$	$Y$
1	$10^{-3}$	150	60	600	100	120	11,2
2	$10^{-2}$	150	60	1200	40	30	3,4
3	$10^{-4}$	-	60	1200	40	120	6,2
4	$10^{-2}$	-	60	600	100	30	10,8
5	$10^{-1}$	150	250	1200	100	120	5,6
6	$10^{-2}$	150	250	600	40	30	10,4
7	$10^{-1}$	-	250	600	40	120	12,6
8	$10^{-2}$	-	250	1200	100	30	16,4

личины тока при ионной очистке возрастает износостойкость покрытий, причем наибольшее влияние оказывает температура деталей;

2. С уменьшением времени конденсации покрытий также незначительно возрастает износостойкость.

3. Наряду с линейными эффектами значимыми оказались также и эффекты взаимодействия.

По полученному уравнению регрессии можно рассчитать ориентировочное значение износостойкости ионно-плазменных покрытий при заданных технологических параметрах конденсации.

**Список использованной литературы:**

1. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. / Пер. с англ. М.: Мир, 1983. – 958 с.
2. Бротский Л.И., Бротский В.З. Свойства геометрических планов. / В кн. Регрессивные эксперименты. М.: Изд. МГУ, 1987. – С. 85-102
3. Налимов В.В., Голиков Т.И. Логические основы планирования экспериментов. М.: Металлургия, 1980. – 152 с.
4. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Металлургия, 1981. – 312 с.