

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 соответствии с их влиянием на износостойкость покрытий.

Таблица 1. Матрица рангов

Эксперты (m = 5)	Факторы R = 13												
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
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-м 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 χ^2 . Расчетное значение χ^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: $f = 12$; $\alpha = 0,05$; $\chi^2 = 21,0$. $\chi^2_{\alpha, f} = 21 < \chi^2 = 54$, 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-

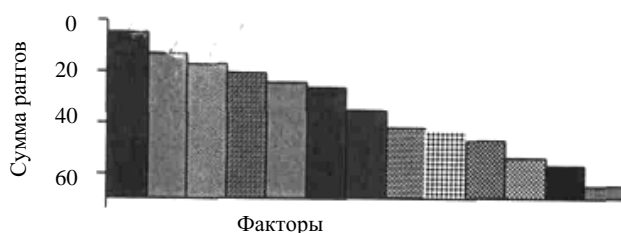


Рисунок 1. Диаграмма рангов

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 трудоемко (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 генерирующие 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:

