

УДК. 621.793.74

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Кадырметов А.М., Горюшкин В.А., Бухтояров В.Н.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Email: kadyrmetov.a@mail.ru

Аннотация: В статье производится оптимизация технологических режимов процесса плазменного нанесения покрытий.

Ключевые слова: плазменное напыление, технологические режимы, оптимизация.

OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL MODES
OF PLASMA SPRAY COATING

Kadyrmetov A.M., Goryushkin V.A., Buhtoyarov V.N.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State
University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov"

Summary: The article is devoted to optimization of technological modes of plasma coating process.

Keywords: plasma spraying, technological modes, optimization.

Для нахождения оптимальных технологических режимов, при восстановлении коленчатых валов двигателей, необходимо проводить предварительные опыты на цилиндрических образцах по напылению покрытий. После того как найдены оптимальные технологические режимы уже проводится нанесение покрытий на реальные детали [1, 2].

Параметром оптимизации является относительная износостойкость покрытия, как одна из основных характеристик долговечности. На нее влияет большое количество факторов, включающих управляемые технологические параметры (мощность дуг плазмотрона, дистанция напыления, параметры модуляции и др.), теплофизические свойства плазмы, покрытия, материала подложки и т.д. Поэтому она представляет собой сложный объект исследования. Изучение износостойкости связано с решением целого ряда прямых и косвенных

задач, в том числе: 1) обобщение входных параметров в безразмерные комплексы; 2) планирование и проведение эксперимента на объекте исследования; 3) построение регрессионной модели, описывающей величину изменения износа при изменении входных параметров; 4) решение задачи оптимизации методом Гаусса-Зайделя [3].

Для оценки влияния входных факторов процесса напыления на износостойкость покрытий мы использовали теорию подобия и методы анализа размерностей величин. Использование теории подобия при планировании эксперимента позволяет уменьшить трудоемкость проведения опытов за счет обобщения входных параметров в безразмерные комплексы.

Для уменьшения количества входных факторов (табл. 1) примем во внимание, что во всех экспериментах процесс напыления осуществляется одним плазмотроном при одинаковом химическом составе плазмообразующего газа, материала подложки и покрытия.

Таблица 1 – Технологические параметры процесса напыления с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой и их размерности в СИ

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Размерность в СИ
1	Суммарная мощность дуг плазмотрона	N_0	Вт	L^2MT^{-3}
2	Скорость вращения детали	n	об/с	T^{-1}
3	Шаг витков	H	м	L
4	Амплитуда мощности импульсов	A	Вт	L^2MT^{-3}
5	Длительность импульса	τ	с	T
6	Частота модуляции	ν	Гц	T^{-1}
7	Дистанция напыления	L	м	L

Таким образом, с учетом сделанных ограничений относительная износостойкость нанесенного покрытия может быть представлена в виде:

$$y = f(N, \nu, n, \tau, A, H, L), \quad (1)$$

Функция (1) содержит семь аргументов. Следовательно, в соответствии с теорией подобия из аргументов (1) могут быть составлены четыре линейно независимых безразмерных комбинации $\Pi_1 - \Pi_4$ (табл. 2), а сама функция (1) представлена в виде:

$$y = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4), \quad (2)$$

Выбор конкретного варианта безразмерных параметров $\Pi_1 - \Pi_4$, являющихся критериями подобия процесса, производился из анализа их физического смысла. В качестве данных критериев были выбраны следующие безразмерные комбинации: $\Pi_1 = H / L$ – безразмерный шаг; $\Pi_2 = v / n$ – безразмерный критерий подобия, характеризующий число импульсов, приходящихся на один оборот вала; $\Pi_3 = N_\delta / A$ – комплекс, характеризующий тепловое подобие приращения мощности плазмотрона; $\Pi_4 = n \cdot \tau$ – комплекс, характеризующий временное подобие перемещения плазмотрона в окружном направлении.

Неизвестная функция отклика (2) определялась методом планирования эксперимента.

Скорости вращения детали и перемещение плазмотрона определялась технологическими возможностями оборудования и составляли соответственно: $n = 0,2 \dots 2,0$ об/с; $H = 0,002 \dots 0,006$ м. Уровни варьирования остальных технологических параметров выбирались на основании априорной информации и соответствовали следующим значениям: $N_\delta = 5 \dots 7$ кВт; $v = 25 \dots 325$ Гц, $\tau = 100 \dots 250$ мкс, $A = 4,5 \dots 22$ кВт, $L = 0,015 \dots 0,020$ м [4].

С учетом найденных диапазонов изменения технологических параметров процесса были заданы уровни и интервалы варьирования безразмерных параметров процесса, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Уровни и интервалы варьирования безразмерных параметров процесса нанесения покрытий ПГ-СР4

№ п/п	Безразмерные параметры процесса	Кодированное обозначение	Интер-вал варьирования	Уровни		
				нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)
1	$\Pi_1 = H/L$	X_1	0,1	0,2	0,3	0,4
2	$\Pi_2 = v/n$	X_2	150	150	300	450
3	$\Pi_3 = N_\delta/A$	X_3	0,3	0,4	0,7	1,0
4	$\Pi_4 = n \cdot \tau$	X_4	0,00014	0,00016	0,0003	0,00044

Для проведения исследований нами был составлен полный факторный план второго порядка типа 2^4 .

В соответствии с разработанной методикой нами были поставлены эксперименты для нахождения оптимальных технологических режимов процесса нанесения покрытия.

После статистической обработки результатов полученных экспериментальных данных построено уравнение регрессии:

$$y = 0,86969 - 0,00021X_1 + 0,00729X_2 - 0,01104X_3 + 0,09563X_4 + 0,02344X_1X_2 + 0,01281X_1X_3 - 0,00156X_1X_4 + 0,00906X_2X_3 + 0,00219X_2X_4 + 0,02281X_3X_4 - 0,0612X_1^2 - 0,05248X_2^2 - 0,06996X_3^2 - 0,08373X_4^2 \quad (3)$$

Однако уравнение (3) неудобно для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому мы его преобразовали по формулам перехода от кодированных значений (X_1, X_2, X_3, X_4) к натуральным значениям комплексов (P_1, P_2, P_3, P_4):

$$\begin{aligned} X_1 &= [P_1 - P_1(0)] / \Delta P_1; & X_2 &= [P_2 - P_2(0)] / \Delta P_2; \\ X_3 &= [P_3 - P_3(0)] / \Delta P_3; & X_4 &= [P_4 - P_4(0)] / \Delta P_4 \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_1(0), P_2(0), P_3(0), P_4(0)$ – натуральные значения комплексов на основных уровнях; $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4$ – значения интервалов варьирования.

Таким образом, уравнение (3) с учетом соотношений (4) можно представить следующим выражением:

$$\begin{aligned} y &= 33,0936 + 3,23789P_1 + 0,00025P_2 + 0,57743P_3 + 10948979651,7P_4 + \\ &0,00156P_1P_2 + 0,427P_1P_3 - 111,42857P_1P_4 + 0,00061P_2P_3 + \\ &+ 0,10429P_2P_4 + 543,09524P_3P_4 - 6,121P_1^2 + 0,000002P_2^2 - 0,77733P_3^2 - \\ &- 4271938,77P_4^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) используем для поиска оптимальных технологических режимов методом Гаусса-Зайделя. Вычисления проведенные на ЭВМ, дали следующие результаты: $P_1 = 0,4$; $P_2 = 150$; $P_3 = 1$; $P_4 = 0,00019$. С учетом определений комплексов $P_1 - P_4$, это дает систему из четырех уравнений для определения оптимальных технологических режимов. Поскольку количество неизвестных параметров на три больше числа уравнений в системе, то для однозначного решения системы необходимо задать значения любых шести параметров. В нашем случае в качестве доопределяемых параметров были выбраны шаг витков (H); мощность плазмотрона (N_δ); дистанция напыления (L). Решение системы уравнений при $n = 1,3$ об/с; $N = 6$ кВт; $L = 0,015$ м приводит к следующим оптимальным технологическим параметрам процесса: шаг витков $H = 0,006$ м; частота модуляции $\nu = 65$ Гц; длительность им пульса $\tau = 146$ мкс; мощность импульса $A = 6$ кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кадырметов, А. М. Разработка технологии воздушно-плазменного напыления с модуляцией тока дуги плазматрона на детали лесных машин [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. М. Кадырметов / Воронежская гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 1994. – 16 с.

2 Бухтояров, В. Н. Технология восстановления цилиндрических поверхностей валов плазменным напылением с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой (на примере коленчатого вала) [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / В. Н. Бухтояров / Воронежская гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2003. – 16 с.

3 Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А. А. Спиридонов – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

4 Кадырметов, А. М. Технологические перспективы и возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов, С. И. Сушков, В. О. Никонов // Строительные и дорожные машины. – 2013 г. – № 7. – С. 25-32.