

УДК 621.9.048.6

Д.Н. МАЛЕЕВ, В.Х. АЛЬ-ТИББИ, Д.А. ЧИЛИКИН**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИКРОТВЕРДОСТИ**

Исследуется влияние акустических параметров (амплитуда ультразвуковых колебаний A , частота ультразвуковых колебаний f и угол между осью волновода и направлением вектора продольно-крутильных колебаний α) процесса электроакустического напыления защитных покрытий на качество покрытия (микротвердость). На базе проведенных исследований предложена математическая модель зависимости микротвердости покрытия от акустических параметров процесса и проверена адекватность полученной модели.

Ключевые слова: акустические параметры, амплитуда ультразвуковых колебаний, частота ультразвуковых колебаний, продольно-крутильные колебания, математическая модель, адекватность модели.

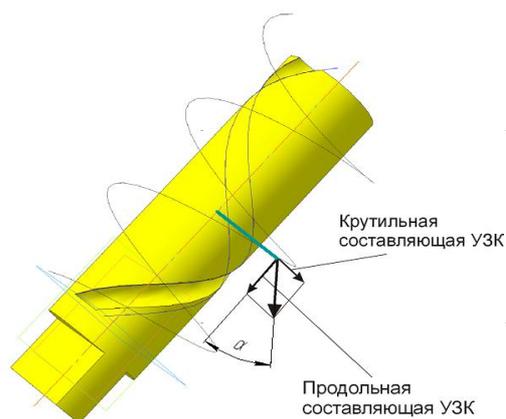
Введение. Одним из перспективных методов нанесения токопроводящих износостойких защитных покрытий является метод электроакустического напыления – ЭЛАН [1,2]. Задача формирования качественного покрытия с высокими требованиями к шероховатости и микротвердости поверхностного слоя в процессе ЭЛАН является одной из важнейших при дальнейшем развитии этого метода для поверхностно-упрочняющей обработки деталей машин и формообразующего инструмента. Многовариативность выбора параметров процесса и их несомненное влияние на физико-механические свойства покрытия, необходимость исследования физической картины процесса требует проведения статистических исследований с целью обоснования режимов обработки и оптимизации показателей качества покрытия. Комплекс таких параметров существенно влияет на износостойкость и долговечность деталей машин и на другие их эксплуатационные характеристики. В задачу исследований входило изучение влияния акустических параметров процесса ЭЛАН на качество наносимого покрытия.

Методика исследований и некоторые априорные сведения. Исследование процесса ЭЛАН, безусловно, требует изучения влияния не только акустических, но и электрических параметров процесса на качество покрытия. Тем не менее, такая задача является слишком объемной в рамках одного исследования, поэтому в данной работе мы решили сосредоточиться для начала только на акустических параметрах процесса. Напряжение разрядного импульса как электрический параметр не претерпело изменений. По результатам предыдущих исследований [3,4] было выявлено, что удовлетворительную шероховатость покрытия (сопоставимую по классу с шероховатостью обрабатываемой поверхности) можно получить при работе на следующих усредненных по величине режимах: напряжение разрядного импульса $U=32$ В (при напылении твердого сплава ВК6М на сталь 45), емкость разрядного конденсатора $C=12000$ мкФ, частота подачи импульсов $f_r = 20$ кГц. При этом скорость перемещения электрода составляла $V = 0,04$ м/мин.

Для разработки математической модели процесса был применен полнофакторный эксперимент (ПФЭ), позволяющий получить математическую модель, выбрать контролируемые параметры и определить движение по градиенту, т.е. направление, при движении по которому параметр оптимизации уменьшается или увеличивается быстрее, чем в любом другом направлении. Были запланированы три вида статистических исследований, в каждом из которых фиксировалось три важнейшие характеристики качества покрытия: отношение микротвердости покрытия к микротвердости подложки $H_{\text{мп}}/H_{\text{мм}}$, шероховатость покрытия R_a , мкм, толщина покрытия H , мкм.

В качестве параметра оптимизации y_1 , было взято отношение $H_{\text{мп}}/H_{\text{мм}}$, которое вычислялось после замеров на микротвердомере модели ПМТ-3, в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-73.

В качестве переменных (факторов) были выбраны следующие акустические параметры ЭЛАН (рисунок): x_1 - амплитуда ультразвуковых колебаний A (мкм), x_2 - частота ультразвуковых колебаний f (кГц), x_3 - угол между осью волновода и направлением вектора продольно-крутильных колебаний α (градусов).



Схематическое изображение угла α между осью волновода и направлением вектора продольно-крутильных колебаний

Для описания процесса была выбрана линейная модель уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

где y – параметр оптимизации; b_i – параметры модели; x_i – факторы процесса ЭЛАН; i – номер параметра оптимизации, $i = 1, 2, 3$.

Границы изменения факторов x_1, x_2, x_3 определены из установочных исследований [3,4] и соответствуют данным, приведенным в табл.1.

Таблица 1

Значения исследуемых факторов

Уровни	Факторы		
	A , мкм	f , кГц	α , град
Верхний	17	22,8	82
Нижний	4	16	10
Основной	10,5	19,4	46
Интервал варьирования	6,5	3,4	36
Кодовое обозначение	x_1	x_2	x_3

Планирование и проведение эксперимента. Был построен план матрицы планирования полнофакторного эксперимента типа 2^3 , где 3 - число факторов. Кроме того, для обеспечения расчетов ввели фиктивную переменную x_0 , которая принимает во всех опытах значения +1, а также графы взаимодействия факторов [5]. Данные сведены в табл.2.

Таблица 2

Матрица планирования ПФЭ 2^3

Номер точки плана	Значения факторов				Комбинации произведений факторов			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Перед реализацией плана эксперимента опыты, предусмотренные матрицей, проводились в случайной последовательности. Порядок реализации опытов, выбранный по таблице равномерно-распределенных случайных чисел, представлен в табл.3.

Таблица 3

Рандомизация опытов

Порядок реализации	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Серия 1	1	6	5	8	2	7	4	3
Серия 2	4	2	7	5	3	1	6	8
Серия 3	2	7	4	3	1	8	5	6
Серия 4	8	1	6	7	5	2	4	3
Серия 5	3	8	1	6	4	5	2	7

Нужное значение факторов устанавливали поочередно в каждой точке плана матрицы в порядке реализации текущей серии эксперимента в соответствии с матрицей планирования и поддерживали эти значения постоянными в течение опыта. Параметр оптимизации $y_1\left(\frac{H_{\mu\Pi}}{H_{\mu M}}\right)$ фиксировали по окончании опыта и заносили в табл.4.

Таблица 4

Результаты измерений параметра $y_1\left(\frac{H_{\mu\Pi}}{H_{\mu M}}\right)$

Номер опыта	Результаты эксперимента в сериях			
	Y11	Y12	Y13	Y14
1	1.79	1.91	1.73	1.86
2	1.61	1.54	1.58	1.46
3	1.77	1.81	1.79	1.84
4	1.42	1.69	1.39	1.64
5	1.58	1.41	1.60	1.42
6	1.32	1.17	1.24	1.21
7	1.49	1.27	1.41	1.35
8	1.34	1.17	1.28	1.21

Последующая обработка экспериментальных данных проводилась на ЭВМ, для чего была реализована программа в среде математического программирования Math Cad.

Исследование зависимости $\frac{H_{\mu\Pi}}{H_{\mu M}} = f(A, v, \alpha)$. Воспроизводимость измерений проверяли путем подсчета среднего показателя параметра оптимизации процесса при реализации параллельных наблюдений, также была рассчитана выборочная дисперсия воспроизводимости параллельных наблюдений для каждой точки плана матрицы. Однородность дисперсий проверили по критерию Кохрена.

Определили значимые коэффициенты регрессии и их значения с использованием критерия Стьюдента. Расчетные значения коэффициентов представлены в табл.5. В математическую модель процесса включили только значимые коэффициенты. Получили уравнение регрессии в виде

$$Y = 1.50625 - 0.11437 \cdot X1 - 0.16437 \cdot X3. \tag{2}$$

Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициент	Значение	t - критерий	Значимость
b_0	1,50625	96,55	Да
b_1	-0,11437	7,275	Да
b_2	-0,02062	1,28	Нет
b_3	-0,16437	10,51	Да
b_{12}	0,02125	1,35	Нет
b_{13}	0,015	1	Нет
b_{23}	-0,00625	0,4	Нет
b_{123}	0,01312	0,83	Нет

Проверка адекватности модели. Адекватность модели проверили по формуле Фишера. Табличное значение $F = 2,62$ (при принятом количестве степеней свободы и уровне значимости). Поскольку $F_{расч} < F_{табл}$, то гипотеза адекватности принимается. Были найдены коэффициенты уравнения регрессии в действительных значениях. После простейших преобразований получили:

$$\frac{H_{\mu\Pi}}{H_{\mu M}} = 1,901 - 0,017A - 0,0046\alpha .$$

Так как в уравнении регрессии все коэффициенты, стоящие при x_2 , незначимые, то данный фактор можно не учитывать. Фактор x_1 (амплитуда ультразвуковых колебаний A (мкм)) оказывает большее влияние на показатель параметра оптимизации по сравнению с фактором x_3 (угол между осью волновода и направлением вектора продольно-крутильных колебаний α (градусов)). Это следует учитывать при контроле процесса. Следовательно, на микротвердость покрытия наибольшее влияние оказывает амплитуда ультразвуковых колебаний. Существенен также параметр угла наклона вектора продольно-крутильных колебаний. Частота колебаний влияет незначительно. Знаки коэффициентов уравнения регрессии отрицательны, что говорит о том, что увеличение микротвердости можно достичь уменьшением параметров A и α .

Методика оптимизации. Оптимизация проводилась методом крутого восхождения и начиналась от основных уравнений значимых факторов $x_{1осн}$ и $x_{3осн}$. Факторы изменялись пропорционально величинам коэффициентов регрессии с учетом их знаков. План крутого восхождения учтен при расчете в среде математического программирования Math Cad.

С целью проверки полученной модели оценили показатель параметра оптимизации по полученному уравнению регрессии, используя рассчитанные значения факторов в плане крутого восхождения. Это необходимо не для предсказания выхода процесса, а для определения направления движения. Данные "мысленных опытов" представлены в табл.6.

Таблица 6

"Мысленный эксперимент" для уравнения $\frac{H_{\mu\Pi}}{H_{\mu M}} = 1,901 - 0,017A - 0,0046\alpha$

Номер шага крутого восхождения	A , мкм	α^0	«Мысленное значение» $H_{\mu\Pi} / H_{\mu M}$
1	9.5	38.2	1.558
2	8.6	31.4	1.605
3	7.7	24.6	1.652
4	6.8	17.2	1.702
5	5.9	10	1.751
6	5.07	2.8	1.8
7	4.24	4.4	1.846

Полученный "выход" показывает, что направление движения выбрано верно - микротвердость покрытия возрастает. Вместе с тем показано, что нет необходимости в проведении опытов 1-3, так как эффект варьирования параметров в указанных областях незначителен.

Реализация оптимальных режимов для микротвердости покрытия. В соответствии с планом крутого восхождения были проведены дополнительные эксперименты по вышеуказанной методике. Результаты экспериментов представлены в табл.7. Приведенные данные показывают, что экстремальное значение параметр $H_{\mu T} / H_{\mu M}$ принимает в точке 5 при следующих оптимальных режимах: $A = 5,9$ мкм, $\alpha = 10^\circ$.

Таблица 7

Результаты дополнительных экспериментов

Номер шага	A, мкм	α^0	$H_{\mu T} / H_{\mu M}$
3	7,7	24,6	1,91
4	6,8	17,2	2,08
5	5,9	10	2,15
6	5,07	2,8	2,03

Выводы. При постоянных параметрах напряжения разрядного импульса, емкости разрядного конденсатора и скорости перемещения электрода:

- 1) на микротвердость покрытия наибольшее влияние оказывает амплитуда ультразвуковых колебаний;
- 2) существенен также параметр угла наклона вектора продольно-крутильных колебаний;
- 3) частота колебаний влияет незначительно;
- 4) знаки коэффициентов уравнения регрессии отрицательны, т.е. увеличение микротвердости можно достичь уменьшением параметров A и α .

5) оптимальные значения акустических параметров ЭЛАН по критерию твердости: амплитуда ультразвуковых колебаний $A = 12$ мкм, частота ультразвуковых колебаний $f = 20$ кГц, угол между осью волновода и направлением вектора продольно-крутильных колебаний $\alpha = 45^\circ$.

Библиографический список

1. Минаков В.С. Электроакустическое напыление / В.С. Минаков, А.Н. Кочетов // СТИН. – 2003. – № 4. – С.32-35.
2. Аль-Тибби В.Х. Получение наноструктурных материалов методом электроакустического напыления: журнал / В.Х. Аль-Тибби, В.С. Минаков, Д.Д. Дымочкин // СТИН. – 2007. – № 4. – С.28-32.
3. Минаков В.С. Разработка комплексных механических и электро-физических процессов обработки на основе использования энергии трансформируемых ультразвуковых колебаний: дис...д-ра техн. наук: 05.03.01 / – Ростов н/Д, 1989. – 516 с.
4. Кочетов А.Н. Барьерно-дислокационный механизм упрочнения деталей машин методом электроакустического напыления: дис. ... к-та техн. наук: 05.03.01 / – Ростов н/Д, 1998. – 241 с.
5. Кохановский В.А. Организация планирования эксперимента / В.А. Кохановский, М.Х. Сергеева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008.

Материал поступил в редакцию 15.03.10.

D.N. MALEYEV, W.H. AL-TIBBI, D.A. CHILIKIN

OPTIMIZATION OF THE ELECTRO-ACOUSTIC SPUTTERING PROCESS BY THE MICROHARDNESS CRITERION

Influence of acoustic parameters (amplitude of ultrasonic oscillations A (mcm), frequency of ultrasonic oscillations (Khz), and a corner between the axis of the wave guide and the vector direction of longitudinal-twisting oscillations (degrees)) process of an electro-acoustic dusting of the protective coatings on quality of coating (micro hardness) is investigated. On the basis of the executed research the mathematical model of dependence of micro hardness of a coating from acoustic parameters of process is developed and adequacy of the received model is checked.

Keywords: acoustic parameters, amplitude of ultrasonic oscillations, frequency of ultrasonic oscillations, longitudinal-twisting oscillations, mathematical model, adequacy of the model.

МАЛЕЕВ Данил Николаевич (р. 1985), аспирант первого года обучения кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета. Окончил Донской государственный технический университет (2009).

Область научных интересов: ультразвуковые процессы и технологии.

Автор 7 публикаций.

danil_maleev@mail.ru

АЛЬ-ТИББИ Висам Хусамович (р. 1979), кандидат технических наук (2006), преподаватель кафедры «Автоматизация производственных процессов» ДГТУ. Окончил Донской государственный технический университет (2002).

Область научных интересов: ультразвуковые процессы и технологии.

Автор 20 публикаций.

nb1979@mail.ru

ЧИЛИКИН Денис Алексеевич (р. 1983), аспирант третьего года обучения кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета. Окончил Донской государственный технический университет (2007).

Область научных интересов: ультразвуковые процессы и технологии.

Автор 8 публикаций.

chilikinda@gmail.com