

РАЗДЕЛ 2. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Формирование наименьшего значения шероховатости поверхности деталей машин на основе выбора оптимальных режимов размерной электрохимической обработки

Бавыкин О.Б., д.т.н. проф. Вячеслава О.Ф.
МГТУ «МАМИ»
Ray86@list.ru

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследования влияния параметров электрохимической обработки сплава 1201 на значения среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a и выбран оптимальный режим электрохимической обработки сплава 1201 на экспериментальной установке ЭУ5.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, шероховатость.

Размерная электрохимическая обработка (ЭХО) представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных процессов, управление которыми представляет сложную в техническом отношении задачу, заключающуюся в необходимости стабилизации большого количества технологических параметров ЭХО [1,2]. В связи с этим, ввиду постоянного возрастания требований к эксплуатационным характеристикам деталей по точности и качеству поверхности, актуальной является задача определения оптимальных режимов ЭХО с целью повышения эффективности технологии ЭХО деталей исходя из понимания ЭХО как синергетического процесса.

Для выбора оптимального режима ЭХО проведено исследование ЭХО алюминиевого сплава 1201 на базе экспериментальной установки ЭУ5 с использованием метода наименьших квадратов [3, 4].

В качестве параметров оптимизации определены следующие: растравливание по границам зёрен; микротвёрдость; шероховатость поверхности (по параметру R_a – среднему арифметическому отклонению профиля). Параметр R_a наилучшим образом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к отклику [3]. В качестве факторов, влияющих на параметр R_a , выбраны факторы, представленные в таблице 1. Выбранные факторы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к факторам в планировании эксперимента [5].

Таблица 1

Факторы, влияющие на параметр R_a

№ п/п	Название параметра	Размерность	Область определения	Точность
1.	Концентрация электролита	%	1 – 30	±0,5
2.	Температура электролита	Град.К.	288 – 333	±2
3.	Электропроводимость электролита	Ом ⁻¹ · м ⁻¹	0,043 · 10 ⁻⁶	±0,001
4.	Скорость прокачки электролита	м/с	0 – 0,9	±0,2
5.	Скорость подачи катода	м/с	10 ⁻⁴ – 2 · 10 ⁻³	±0,1
6.	Шероховатость подачи катод – инструмента	м · 10 ⁻⁶	1 – 0,014	±0,001
7.	Шероховатость анода – детали до ЭХО	м · 10 ⁻⁶	1 – 0,04	±0,001
8.	Химические свойства обрабатываемого материала	%	0,001 – 99,99	±0,0001
9.	Ионная природа электролита	Ом ⁻¹ · м ⁻¹	0,0437 · 10 ⁻⁶	±0,001
10.	Структура обрабатываемого материала	-	-	-

Длительность одного опыта определялась установлением стабильного межэлектродного зазора, равного 0,3 мм, в течение 10 с и составляла в общей сложности 30с. Количество параллельных опытов в точке и параллельных измерений не ограничивалось, однако, вследствие достаточно высокой воспроизводимости результатов эксперимента, количество параллельных экспериментов в точке было принято равным 2, а параллельных измерений - 3 с учётом возможности постановки 3-х опытов в точке в случае резкой расходимости результатов. В качестве рабочих электролитов из литературных данных были выбраны нитрат натрия; комбинированный электролит (нитратно-хлоридный).

Выбор матрицы планирования эксперимента производился в соответствии с количеством выбранных факторов и требованием минимизации числа опытов в эксперименте [6], в силу чего выбран ротатабельный план с центральной композицией (полный факторный эксперимент).

Проверка однородности дисперсий проводилась либо по критерию Фишера (для нитрата натрия, где количество параллельных опытов одинаково во всех точках и равно 2), либо по критерию Барлетта (для нитратно-хлоридного электролита, где количество параллельных опытов не одинаково во всех точках и колеблется от 2-х до 4-х). Подсчёт критериев показал, что для сплава 1201 при обработке в нитрате натрия соблюдается условие однородности дисперсий. В связи с тем, что формирование поверхности при физико-химических методах обработки осуществляется в специфических условиях функционирования динамических систем со множеством одновременно протекающих (синергетических) процессов, в качестве модели для проведения предварительных элементов был выбран план второго порядка (2^k) в виде полной квадратичной модели, содержащий, кроме основных эффектов j , все парные взаимодействия b_{ji} , т.е. всего $\frac{(R+1) \cdot (R+2)}{2}$ эффектов (1).

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^r b_i \cdot x_i + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^r b_i \cdot x_i^2 \quad (1)$$

Для выбранного числа факторов, равного b , уравнение приобретает вид (2):

$$y(x) = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i \cdot x_i + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^6 b_i \cdot x_i^2 \quad (2)$$

Такая модель, позволяющая вносить влияние двух и более переменных, между которыми существует характерная связь, представляет собой уравнение регрессии (y – случайная величина). Регрессионная модель аппроксимирует совокупность экспериментальных данных, а также позволяет исследовать природу взаимосвязи взаимодействующих между собой переменных (факторов). Согласно проведенному анализу чувствительных факторов, выбраны 6 факторов, включённых в реальный эксперимент, варьируемых на трёх (-1; 0; +1) уровнях. Статистический анализ уравнения и расчёт коэффициентов регрессии производят с помощью стандартной программы на компьютере PIV (2,4Mhz, 512RAM, HDD 60GB). Матрица планирования значений шероховатости по параметру R_a , полученная в результате эксперимента, представлена в таблице 2 для сплава 1201. Электролиты – $NaNO_3$, $NaCl + NaNO_3$; $S = 0,3$ мм, $U = 16,5$ В. Проверка на значимость коэффициентов регрессии по критерию Фишера (F – критерию) при 5 % уровне значимости показала, что для сплава 1201 при его обработке в нитрате натрия незначительными оказались коэффициенты при факторах x_1x_4 , x_2x_5 , x_3x_4 и т.д., а в комбинированном электролите – при факторах x_2 , x_2x_5 , x_3x_6 . После исключения незначимых членов, уравнения регрессии принимают следующий вид:

- для нитрата натрия

$$R_a = 0.5x_6^2 + 0.11x_1^2 + 0.09x_2^2 + 0.081x_5^2 + 0.05x_1x_5 + 0.03x_3x_5 + 0.02x_4x_5; \quad (3)$$

- для нитратно-хлоридного электролита

$$R_a = 0.5x_4^2 + 0.61x_1^2 + 0.41x_6^2 + 0.27x_3^2 + 0.11x_3 + 0.09x_5^2 + 0.04x_3x_6. \quad (4)$$

Таблица 2

Матрица планирования для сплава 1201

факторы	$C, \%$	pH	$T(^{\circ}K)$	V_3 (м/с)	скорость подачи (м/с)	струк.	шерохов. R_a , мкм
	1	2	3	4	5	6	7
основной уровень	20	7	30+273	32	1	сырой	
верхний уровень	25	9	40+273	52	1,5	состар.	
нижний уровень	15	5	20+273	12	0,5		
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,34 - 2,5
2	1	0	0	0	0	0	0,65 - 0,875
3	0	1	0	0	0	0	0,65 - 5,150
4	0	0	1	0	0	0	0,635 - 4,875
5	0	0	0	1	0	0	0,275 - 0,8
6	0	0	0	0	1	0	0,67 - 6,35
7	0	0	0	0	0	1	0,35 - 7,0
8	-1	1	1	1	1	1	0,635 - 1,45
9	1	-1	1	1	1	1	0,325 - 0,54
10	1	1	-1	1	1	1	0,285 - 8,0
11	1	1	1	-1	1	1	1,1 - 1,225
12	1	1	1	1	-1	1	0,9 - 0,8
13	1	1	1	1	1	-1	0,225 - 0,55
14	1	1	-1	-1	-1	-1	0,375 - 0,815
15	1	-1	1	-1	-1	-1	0,575 - 1,5
16	1	-1	-1	1	-1	-1	0,525 - 1,424
17	1	-1	-1	-1	1	-1	0,573 - 2,0
18	1	-1	-1	-1	-1	-1	0,3 - 1,35
19	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,29 - 7,4
20	-1	-1	1	-1	-1	1	0,75 - 1,35
21	-1	-1	-1	1	-1	1	0,37 - 0,55
22	-1	-1	-1	-1	1	1	1,075 - 8,0
23	-1	-1	-1	-1	1	1	0,725 - 5,675
24	-1	-1	1	-1	1	-1	0,9 - 8,0
25	-1	-1	-1	1	1	-1	0,975 - 8,0
26	-1	1	-1	1	-1	-1	0,275 - 0,95
27	-1	1	1	-1	-1	-1	0,75 - 1,065
28	-1	-1	1	1	-1	-1	0,65 - 1,35

Оценка параметров поверхности складывалась из замера шероховатости, визуальной оценки поверхности на всех режимах выборочного фотографирования поверхности, имеющей характерный вид. Поверхность образцов, обработанных в нитратном электролите на всех режимах обработки, светлая, блестящая, без следов макродефектов.

Величина R_a (мкм) представлена в таблице 3. Двойные эффекты взаимодействия оказывают существенно меньшее влияние на величину параметра R_a . Для сплава 1201 такими влияющими факторами в парном взаимодействии являются концентрация электролита и скорость перемещения катод-инструмента, температура электролита T и скорость перемещения катод-инструмента и, наконец, скорость течения электролита V_3 и скорость катод-инструмента V_k (рисунки 1 и 2).

При обработке на режимах 6, 8 – 11, 22 – 25, 27, 28 поверхность имеет тёмную плёнку, грубую струйность, переходящую в чешуйчатость или различные сочетания названных дефектов. Очевидно, что это связано с нарушением гидродинамики потока электролита и уве-

Раздел 2. Технология машиностроения и материалы.

личением электропроводности и повышением скорости подачи катода и ростом температуры, приводящими к усиленному местному растворению сплавов.

Таблица 3

Значения R_a для алюминиевого сплава

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R_a , мкм	0,34	0,65	0,65	0,6	0,27	0,67	0,3	0,63	0,32	0,23	1,1	0,9	0,23	0,38
№ опыта	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
R_a , мкм	0,57	0,52	0,57	0,3	0,29	0,75	0,37	1,07	0,72	0,90	0,97	0,27	0,75	0,65

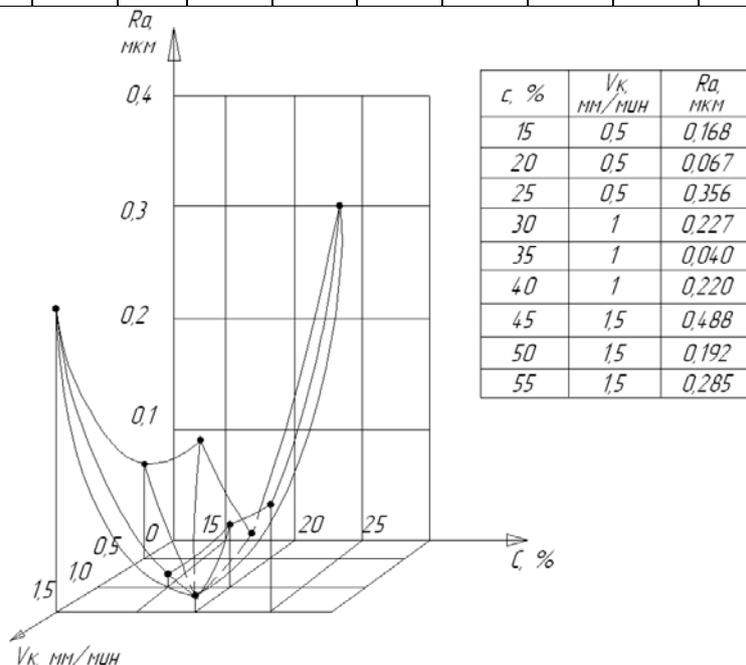


Рисунок 1 - Зависимость $R_a = f(C, V_k)$, сплав 1201, электролит 15% $NaNO_3$

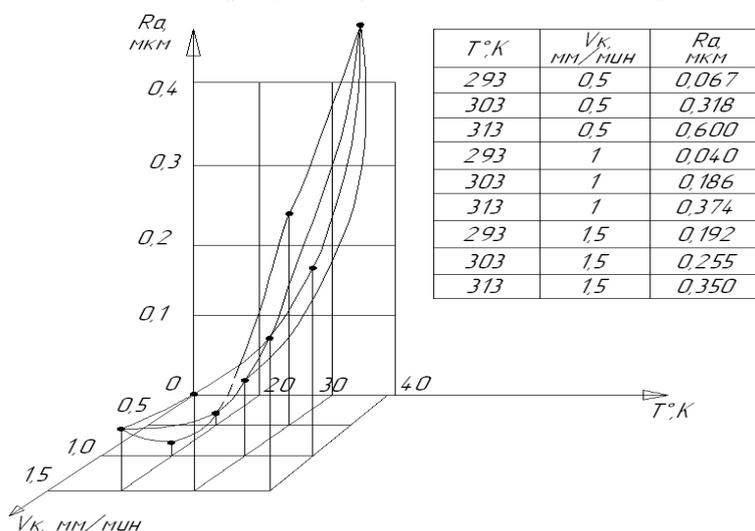


Рисунок 2 - Зависимость $R_a = f(T, V_k)$, сплав 1201, электролит 15 % $NaNO_3$

Для сплава 1201 установлено, что повышение температуры от 293° до 313°K ведёт к увеличению шероховатости R_a , что можно объяснить увеличением электропроводности электролита с повышением температуры и, как следствие этого, увеличением съёма материала. Увеличение скорости прокачки электролита снижает шероховатость поверхности от 0,32 до 0,029 мкм на лучшем режиме и от 1,25 до 0,53 мкм – на наихудшем режиме. Очевидно, это связано с улучшением условий выноса продуктов растворения из зоны обработки, что по-

вышает стабильность процесса обработки. Наименьшая шероховатость поверхности достигается при $C = 20\%$ ($R_a = 0,029$ мкм). Уменьшение концентрации до 15% и её увеличение до 25% приводит к росту шероховатости, что может быть связано с диффузионными ограничениями процесса. Увеличение шероховатости поверхности наблюдается при увеличении скорости подачи катода-инструмента от 1 до $1,5$ мм/мин, что, очевидно, вызвало нарушение гидродинамических условий в МЭЗ.

Значения параметра R_a , полученные для наилучшего режима, представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Значения параметра R_a для состаренного и закалённого сплавов

сплав	режим ЭХО						R_a , мкм
	C , %	pH	T (°K)	V_3 , мм/мин	V_k , мм/мин	структура	
1201	20	9	293	52	1	состаренный	0,029

$$S = 0,3 \text{ мм}; \varphi = 12,5 \text{ В}; j = 25 - 55 \text{ А/см}^2$$

Таблица 5

Значения параметра R_a для сплава 1201 без термообработки

сплав	режим ЭХО						R_a , мкм
	C , %	pH	T (°K)	V_3 , мм/мин	V_k , мм/мин	структура	
1201	25	9	313	12	1,5	сырой	0,131

$$S = 0,3 \text{ мкм}; \varphi = 12,5 \text{ В}; j = 28 - 86 \text{ А/см}^2$$

Анализ влияния парных эффектов и величины параметра шероховатости R_a показывает, что наибольшее значение R_a для сплава 1201 формируется при сочетании предельных (для рассматриваемого диапазона факторов) значений концентрации C и скорости подачи катода-инструмента V_k : 25% и $1,5$ мм/мин соответственно (рисунок 1, рисунок 2). Этот факт можно объяснить тем, что высокая концентрация ионов нитратного электролита приводит к нарушению динамики диффузионных процессов в межэлектродном промежутке, а большая скорость подачи катода – к развитию и осложнению гидродинамических процессов, образованию кавитационных явлений, образованию воздушных полостей и т.д.

Исследование влияния парного взаимодействия температуры электролита T и скорости подачи катод-инструмента V_k на величину параметра шероховатости R_a указывает на преобладающее влияние температурного фактора: с ростом температуры электролита в диапазоне 293°K до 313°K возрастает от $0,04$ мкм до $0,6$ мкм. Дополнительный вклад в увеличение параметра R_a вносит увеличение скорости подачи катод-инструмента, что, очевидно, связано, как и в предыдущем случае, с интенсификацией кавитационных явлений в межэлектродном промежутке и образованием макродефектов поверхности.

При исследовании влияния тонких парных эффектов таких, как скорость течения электролита V_3 и водородного показателя pH , можно заключить, что наименьшее значение параметра R_a формируется на поверхностях, обработанных в нейтральном нитратном электролите ($pH = 7$) со скоростью его прокачки $V_3 = 52$ мм/мин. Наибольшее значение параметра R_a следует ожидать при минимальных скоростях прокачки электролита (12 мм/мин) в щелочной среде ($pH = 9$), что объясняется ухудшением выноса продуктов растворения из зоны обработки, её зашлакованности при малых скоростях течения электролита и выносной избирательностью процесса, свойственной щелочным электролитам.

Выводы

Анализ полученных данных позволяет сделать следующий вывод:

- наибольшее влияние на величину параметра R_a оказывает температура электролита;
- парные (двойные) дефекты взаимодействия факторов оказывают хотя и меньшие влияния,

чем ранее названные, но достаточно значительные, чтобы ими можно было пренебречь.

При выборе режимов электрохимической обработки с целью получения наименьшего значения среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a (0,040мкм) для сплава 1201 рекомендуется 20 % раствор нитрата натрия с температурой 293°К и подача катода-инструмента со скоростью 1мм/мин., таблицы 5.

Заключение

В целом можно отметить, что парные эффекты взаимодействия, образуя сложную поверхность типа “седло” или “гиперболического” типа, демонстрируют синергетический принцип осуществления размерной электрохимической обработки, заключающийся в совместном действии многочисленных факторов на изменение (рост или уменьшение) шероховатости поверхности по параметру R_a . Кроме того, при соблюдении ранее высказанных рекомендаций по достижению наименьшего значения параметра R_a формируется так называемая квазистационарная шероховатость с $R_c = 0,22\text{мкм}$ (0,003мм) независимо от исходной шероховатости, что можно объяснить явлениями самоорганизации поверхности, структур при определённых режимах обработки.

Литература

1. Вячеславова О.Ф., Потапов В.И., А.В. Иванайский. Применение информационных технологий для контроля параметров поверхности изделий ракетно-космической техники. В журнале «Технология машиностроения», выпуск 9, Москва 2008 г., стр. 66-69.
2. Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов в авиастроении. Сборник под ред. А.Х. Каримов. Казань: КАИ, 1991.–87с.
3. Баранов О.В. Методы математического моделирования. Ч. I. Качественная теория. М.: 1997, 61с. Ч. II. Нелинейные модели. М.: 1997, 53с.
4. Коченов М.И., Правоторова Е.А. Моделирование операций контроля и управления точностью М.: Калуга, 1980, с.95.
5. Оценка методов анализа геометрии поверхности после различных видов обработки /Пер. с англ., 1979, т.28, с.18.

Лазерная фотохимическая модификация поли-п-ксилилена

к.ф.-м.н. Волкова Л.В., Аверьянова Е.А., д.ф.-м.н. проф. Нурмухаметов Р.Н., Кабанов С.П.
МГТУ «МАМИ», ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»
(495) 223-05-23, доб. 1338

Аннотация. Изучены спектрально-люминесцентные свойства плёнок поли-п-ксилилена, подвергавшихся воздействию импульсного УФ-лазера. Показано, что воздействие лазера приводит к эффективному образованию в полимере новых оптических центров свечения, полоса флуоресценции которых лежит в видимой области спектра.

Ключевые слова: полимер, поли-п-ксилилен, оптические центры свечения, фотохимическая модификация структуры, спектр поглощения, спектр флуоресценции.

Полимер поли-п-ксилилен (ППК) характеризуется хорошими механическими свойствами, низкой водо- и газопроницаемостью, стойкостью по отношению к органическим растворителям и агрессивным средам, оптической прозрачностью, низкой диэлектрической проницаемостью [1, 2]. Благодаря указанным свойствам ППК широко используется в качестве высокоэффективных влагозащитных электроизоляционных покрытий для изделий радио- и микроэлектроники.

ППК относится к флуоресцирующим полимерам, что позволяет расширить область его

108 Известия МГТУ «МАМИ» № 2(10), 2010.