

©Тихоненко В.В., Созонов Ю.И.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МДО-ПОКРЫТИЯ

1. Введение

Одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения является метод микродугового оксидирования (МДО), который позволяет получать на деталях из вентильных металлов (Al, Ti, Zr, Mg и др.) и их сплавов многофункциональные покрытия с уникальным комплексом свойств и высокими эксплуатационными характеристиками, позволяющими использовать изделия в оборудовании различных отраслей промышленности [1].

МДО является сложным процессом, при котором решающее влияние на формирование оксидного слоя и его свойства оказывают состав и концентрация электролита, электрические (плотность тока, соотношение катодной и анодной составляющих тока) и временные параметры режима МДО, состав оксидируемого сплава. Выявление закономерностей влияния условий получения оксидно-керамического покрытия может служить основанием для внедрения технологии МДО в практику.

2. Постановка задачи и цели исследований

Целью настоящей работы является изучение взаимосвязи параметров обработки с характеристиками покрытия, полученного на алюминиевых сплавах методом микродугового оксидирования.

Задача разработки и нанесения покрытий достаточно сложна, а процесс формирования покрытий носит вероятностный характер и относится к ряду многофакторных. Поэтому для определения оптимальных значений режимов формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах Д16, АМг6 и

АК5 методом МДО предлагается использовать приемы, которые существуют в теории планирования эксперимента, позволяющие найти зависимость в виде полиномиальной модели при одновременном оперировании факторами, влияющими на конечный результат (параметр оптимизации).

Авторы экспериментально исследовали влияние параметров обработки (концентрация КОН, концентрация Na_2SiO_3 , плотность тока и время оксидирования) на микротвердость и толщину упрочненного слоя на сплавах Д16, АМг6 и АК5, в результате чего были поставлены следующие задачи:

1. Определить аппроксимирующие функции зависимости микротвердости и толщины упрочненного покрытия от одного из выбранных режимов МДО при фиксированных значениях остальных технологических параметров.

2. Построить полиномы, соответствующие множественным зависимостям моделируемых показателей качества от технологических параметров МДО, используя планирование эксперимента.

Вычисления по определению вида эмпирической формулы проводили в MS Excel, а вычисления коэффициентов эмпирической формулы методом наименьших квадратов и планирование эксперимента – с использованием программы Maple 12.

3. Определение аппроксимирующих функций зависимости характеристик получаемого покрытия от параметров обработки

Задача построения аппроксимирующей функции решалась в два этапа:

- определение вида аппроксимирующей функции $f(x)$, т.е. класса функций, к которому принадлежит аппроксимирующая функция (линейная, квадратичная, показательная и т.д.);
- определение параметров (различного рода коэффициентов) аппроксимирующей функции выбранного вида методом наименьших квадратов.

Выбор вида эмпирической формулы облегчается при сведении к 7 видам

наиболее часто встречающихся зависимостей, по выполнению необходимых условий устанавливалось существование наиболее подходящего вида зависимости [2]. Для подтверждения предположения о характере зависимости при выборе аппроксимирующей функции $y=f(x)$ проводили ее «линеаризацию» методом выравнивания, т.е. сводили нелинейную функцию $y=f(x)$ к линейной. При расположении полученных после замены точек с достаточной точностью на прямой подтверждается предположение о характере зависимости x и y .

На рис. 1 представлен график полученной теоретической зависимости и соответствующих ей данных эксперимента микротвердости от плотности тока для сплава АМг6. В случае полного совпадения наблюдаемых и предсказанных с помощью модели значений все точки должны лежать на диагональной прямой. Как видно, отклонение полученных точек от диагональной прямой незначительно. Таким образом, подтверждается адекватность полученной модели. Аппроксимация логарифмической функцией свидетельствует о том, что вначале наблюдается быстрый рост, а затем постепенная стабилизация микротвердости с увеличением плотности тока, что соответствует физической сущности процесса МДО.



Рис. 1 – Зависимость микротвердости (y) от плотности тока (x) для сплава АМг6

Проанализировав полученные данные и сравнив для каждого сплава, можно заключить, что полученный вид функции свидетельствует о характере

изменения микротвердости и толщины упрочненного слоя и объясняется природой процесса нанесения покрытия МДО. Отметим, что на всех сплавах прослеживается общий характер изменения микротвердости и толщины от токовых режимов по логарифмической функции.

4. Оценка степени влияния параметров обработки на характеристики получаемого покрытия

Поскольку необходимо оценить степень влияния параметров обработки на характеристики получаемого покрытия, то достаточно составить уравнение первого порядка, включающее линейные эффекты и эффекты взаимодействия факторов:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где y – функция отклика, x_i – влияющие факторы, b_0 – свободный член, b_i , b_{ij} – коэффициенты регрессии, n – число опытов.

Моделируемыми показателями, характеризующими основные износостойкие свойства покрытий, являются: y_1 – микротвердость (H , ГПа) и y_2 – толщина упрочненного слоя (h , мкм). Предварительно проделанные эксперименты показали, что такие случайные характеристики как микротвердость и толщина приближенно могут быть описаны нормальным распределением.

В качестве основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на микротвердость и толщину упрочненного слоя, были выбраны: X_1 – соотношение катодной и анодной токовых составляющих (I_k/I_a), X_2 – плотность тока (i , А/дм²), X_3 – концентрация КОН ($C_{\text{КОН}}$, г/л), X_4 – концентрация метасиликата натрия ($C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$, г/л), X_5 – продолжительность оксидирования (T , ч). Выбор уровней и интервалов варьирования факторов проводили на основании предварительных опытов и данных литературного анализа: $i \in [10,$

30] А/дм²; $I_k/I_a \in [1, 1.5]$; $C_{KOH} \in [1, 5]$ г/л; $C_{Na_2SiO_3} \in [2, 14]$ г/л; $T \in [0.5, 2.5]$ ч.

Решая поставленную задачу методом планирования эксперимента, для анализа степени влияния токовых параметров на микротвердость и толщину упрочненного слоя по данным, полученным на сплаве Д16 были составлены зависимости $H(i, I_k/I_a)$ и $h(i, I_k/I_a)$. Используя данные экспериментов на сплавах АМг6 и АК5, считалось целесообразным проанализировать зависимости: $H(C_{KOH}, C_{Na_2SiO_3}, i)$, $h(C_{KOH}, C_{Na_2SiO_3})$ и $h(i, T)$. Используя теорию, предложенную в [3-4], для ПФЭ 2² и ПФЭ 2³ в системе Maple была создана программа, позволяющая решить задачу по определению математических моделей микротвердости и толщины упрочненного слоя МДО-покрытия от условий получения данного покрытия.

В результате получены следующие регрессионные модели:

для сплава Д16:

$$H(i, I_k/I_a): y_1 = 8,637 + 3,637 \cdot x_1 + 4,412 \cdot x_2 + 3,412 \cdot x_1 \cdot x_2 .3$$

$$y_1 = 8,637 + 3,637 \cdot x_1 + 4,412 \cdot x_2 + 3,412 \cdot x_1 \cdot x_2 ;$$

$$h(i, I_k/I_a): y_2 = 44,345 + 26,975 \cdot x_2 + 0,655 \cdot x_1 \cdot x_2 .3$$

$$y_2 = 44,345 + 26,975 \cdot x_2 + 0,655 \cdot x_1 \cdot x_2 ;$$

для сплава АМг6:

$$h(C_{KOH}, C_{Na_2SiO_3}): y_2 = 84,937 - 10,887 \cdot x_3 - 4,862 \cdot x_4 - 4,087 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$h(i, T): y_2 = 62,637 - 38,412 \cdot x_2 - 41,162 \cdot x_5 + 44,887 \cdot x_2 \cdot x_5 ;$$

$$H(C_{KOH}, C_{Na_2SiO_3}, i):$$

$$y = 10,325 + 0,925 \cdot x_3 - x_4 - 0,675 \cdot x_2 + 4,5 \cdot x_3 \cdot x_4 - 2,325 \cdot x_3 \cdot x_2 -$$

$$- 5,15 \cdot x_4 \cdot x_2 - 0,6 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_2 .3 \quad - 5,15 \cdot x_4 \cdot x_2 - 0,6 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_2 ;$$

для сплава АК5:

$$h(C_{KOH} .3 \quad C_{KOH}, C_{Na_2SiO_3}): y_2 = 82,75 - 11 \cdot x_3 - 5,25 \cdot x_4 - 4 \cdot x_3 \cdot x_4 .3$$

$$y_2 = 82,75 - 11 \cdot x_3 - 5,25 \cdot x_4 - 4 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$h(i, T): y_2 = 57,233 - 34,933 \cdot x_2 - 37,908 \cdot x_5 + 41,058 \cdot x_2 \cdot x_5 ;$$

$$y_2 = 57,233 - 34,933 \cdot x_2 - 37,908 \cdot x_5 + 41,058 \cdot x_2 \cdot x_5 ;$$

$$H(C_{KOH}, C_{Na_2SiO_3}, i):$$

$$y = 8,834 + 0,684 \cdot x_3 - 0,959 \cdot x_4 - 0,815 \cdot x_2 + 3,94 \cdot x_3 \cdot x_4 -$$

$$- 2,665 \cdot x_3 \cdot x_2 - 4,559 \cdot x_4 \cdot x_2 - 0,459 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_2 .$$

Анализ уравнений дает следующую информацию.

По линейным коэффициентам полинома для сплава Д16 заключаем, что на твердость сплава Д16 практически в одинаковой степени влияют как плотность тока и соотношение катодной и анодной токовых составляющих, так и их взаимодействие, т.е. эффект от влияния одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. Причем с увеличением значения этих факторов в рассматриваемом диапазоне микротвердость повышается. Из токовых параметров, влияющих на толщину упрочненного слоя, значительным является плотность тока, что вытекает из уравнения, полученного для толщины.

По количественной оценке коэффициентов уравнений регрессии для толщины упрочненного слоя сплавов АМг6 и АК5 более сильно влияющим фактором является концентрация КОН, в сравнении с концентрацией Na_2SiO_3 . Знак коэффициентов регрессии показывает, что увеличение концентраций этих компонентов в электролите уменьшает толщину получаемого слоя покрытия. Сопоставляя с экспериментальными данными, отметим, что концентрация КОН в электролите от 1 до 3 г/л увеличивает толщины внешнего упрочненного и рыхлого слоев покрытия, а при концентрации КОН свыше 3 г/л наблюдается уменьшение толщин упрочненного и рыхлого слоев покрытия и снижение микротвердости формируемого упрочненного слоя. С увеличением концентрации в электролите Na_2SiO_3 при остальных постоянных параметрах МДО наблюдается уменьшение глубины проникновения внутреннего упрочненного слоя в основу, а толщина внешнего упрочненного слоя покрытия увеличивается, твердость при этом уменьшается.

Анализ уравнений регрессии для микротвердости МДО-покрытий на сплавах АМГ6 и АК5 показывает, что более значимое влияние на микротвердость этих сплавов оказывают не линейные эффекты, а парные взаимодействия факторов. Так как $b_{34} > 0$, к росту отклика будет вести одновременное изменение X_3 и X_4 в одну и ту же сторону. Для уменьшения микротвердости необходимо уменьшать концентрацию КОН и увеличивать концентрацию Na_2SiO_3 либо наоборот. Коэффициенты b_{32} , b_{42} , < 0 , а значит, уменьшение отклика связано с изменением в одном направлении как факторов X_2 и X_3 , так и факторов X_4 и X_2 . Эти эффекты взаимодействия заметно превосходят линейные.

Для нахождения оптимальных режимов процесса формирования покрытий методом МДО далее производили крутое восхождение – движение из некоторой точки внутри изученной области факторов, определяемой полученными уравнениями регрессии, в направлении градиента уравнений [5]. Восхождение осуществляется мысленно (для ряда опытов) и реализуется экспериментально.

При сопоставлении результатов крутого восхождения для сплава Д16 выявлено, что оптимальными режимами для получения покрытий одновременно с максимальной твердостью и толщиной являются: $I_K/I_a=1,3$ и $i = 25 \div 30$ А/дм², для сплавов АМГ6 и АК5 – $C_{\text{КОН}} = 3$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 6$ г/л, $i = 25 \div 30$ А/дм² и $T = 1,5$ ч.

После перехода к физическим переменным получаем математические модели в натуральном масштабе:

$$\text{для сплава Д16: } H = 15,748 - 12,748 \cdot i - 1,265 \cdot (I_K / I_a) + 1,365 \cdot i \cdot (I_K / I_a);$$

$$h = -9,88 - 5,24 \cdot i + 2,67 \cdot (I_K / I_a) + 0,262 \cdot i \cdot (I_K / I_a);$$

$$\text{для сплава АМГ6: } h = 335,865 - 10,574 \cdot i - 130,936 \cdot T + 4,489 \cdot i \cdot T;$$

$$h = 98,25 - 2,833 \cdot C_{\text{КОН}} + 0,125 \cdot C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} - 0,333 \cdot C_{\text{КОН}} \cdot C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3};$$

$$H = 2,312 - 1,012 \cdot C_{\text{КОН}} + 0,125 \cdot C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} + 0,848 \cdot i + 0,475 \cdot C_{\text{КОН}} \cdot C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} -$$

$$-0,076 \cdot C_{KOH} \cdot i - 0,0708 \cdot C_{Na_2SiO_3} \cdot i - 0,005 \cdot C_{KOH} \cdot C_{Na_2SiO_3} \cdot i ;$$

$$\text{для сплава АК5: } h = 328,135 - 10,702 \cdot i - 134,024 \cdot T + 4,806 \cdot i \cdot T ;$$

$$h = 98,25 - 2,833 \cdot C_{KOH} + 0,125 \cdot C_{Na_2SiO_3} - 0,333 \cdot C_{KOH} \cdot C_{Na_2SiO_3} ;$$

$$H = 0,28 - 0,232 \cdot C_{KOH} + 0,145 \cdot C_{Na_2SiO_3} + 0,834 \cdot i + 0,405 \cdot C_{KOH} \cdot C_{Na_2SiO_3} - \\ - 0,103 \cdot C_{KOH} \cdot i - 0,064 \cdot C_{Na_2SiO_3} \cdot i - 0,004 \cdot C_{KOH} \cdot C_{Na_2SiO_3} \cdot i .$$

По данным моделям построены поверхности отклика микротвердости и толщины упрочненного слоя. На рис. 2 в качестве примера приведены поверхности микротвердости и толщины для сплава Д16.

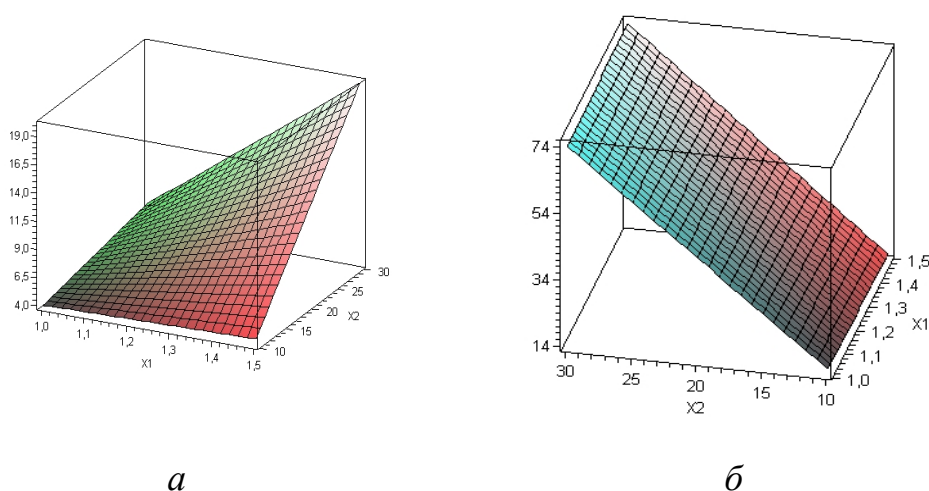


Рис. 2 – Поверхность микротвердости $H(i, I_k/I_a)$ – (а) и толщины упрочненного слоя $h(i, I_k/I_a)$ – (б) алюминиевого сплава Д16

Выводы

Результаты исследований подтвердили, что варьируя концентрацией компонентов электролита, плотностью тока и продолжительностью оксидирования, т.е. подобрав оптимальный режим, можно изменять в широких пределах структуру и свойства покрытий, сформированных способом МДО.

Полученные регрессионные модели, являющиеся адекватными процессу формирования оксидного покрытия методом МДО, позволили выяснить, в какой мере каждый из факторов влияет на функцию отклика, а также могут применяться в практических расчетах.

Изучение взаимосвязи «параметры обработки МДО - свойства покрытия» для алюминиевых сплавов различных групп и исследование их физико-механических свойств с привлечением физических методов диагностики (экзоэлектронной и акустической эмиссии, контактной разности потенциалов) является базой для дальнейшей разработки практических рекомендаций по определению оптимальных технологических параметров МДО-покрытий с необходимыми характеристиками.

Список использованных источников:

1. Тихоненко В. В. Метод микродугового оксидирования / В. В. Тихоненко, А. М. Шкилько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/13 (56). – С. 13–18.
2. Демидович Б.П. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
3. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
4. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К. П. Власова – Х.: Гуманитарный Центр, 2002. – 256 с.
5. Никитин М. Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля / М. Д. Никитин, А. Я. Кулик, Н. И. Захаров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. – 168 с.

Тихоненко В.В., Созонов Ю.И. «Влияние параметров обработки на характеристики МДО-покрытия».

В статье изучена взаимосвязь параметров обработки со свойствами МДО-покрытия, получаемого на алюминиевых сплавах. Используя планирование эксперимента, получены регрессионные модели, соответствующие зависимостям микротвердости и толщины упрочненного покрытия от технологических параметров МДО.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, аппроксимирующая функция, полный факторный эксперимент.

Тихоненко В.В., Созонов Ю.И. «Вплив параметрів обробки на характеристики МДО-покриття».

У статті вивчено взаємозв'язок параметрів обробки з властивостями МДО-покриття, одержуваного на алюмінієвих сплавах. Використовуючи планування експерименту, отримано регресійні моделі, що відповідають

залежностям мікротвердості і товщини зміцненого покриття від технологічних параметрів МДО.

Ключові слова: мікродугове оксидування, апроксимуюча функція, повний факторний експеримент.

Tihonenko V.V., Sozonov Y.I. «Influence of processing parameters on the characteristics of MAO-coating».

In the article interrelation of processing parameters with the properties of MAO-coatings produced on aluminum alloys is studied Regression models corresponding to the dependencies of microhardness and thickness of hardened coating of the technological parameters of MAO are obtained using experiment planning.

Keywords: microarc oxidation, approximating function, full factorial experiment.

Стаття надійшла до редакції 18 травня 2012 р.