УДК 513.1:530.1:669.01

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНОДНЫХ МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ

© 2007 И.А. Попова, Ю.В. Стрыгин, А.Е. Гриднев, В.В. Чернышев

Воронежский государственный университет Поступила в редакцию 12.10.07

В работе представлена мультифрактальная параметризация (МФ-параметризация) структуры поверхности пористого оксида алюминия, полученного методом микродугового оксидирования (МДО). МДО проводился в слабощелочном водном электролите, содержащем гидроксид натрия и жидкое стекло Na₂SO₃ при постоянной плотности тока j = 5, 10, 15 mAcm⁻². Были вычислены мультифрактальные параметры: обобщенная энтропия и эффективные количественные характеристики однородности и упорядоченности структуры. Оптимальные режимы МДО при формировании алюминиевых покрытий определялись при помощи МФпараметризации.

Метод микродугового оксидирования (МДО) основан на анодной или на анодно-катодной обработке металлов в различных электролитах в режиме электрических разрядов при достаточно высоких потенциалах. МДО позволяет сформировать оксидные слои, обладающие высокой коррозионной стойкостью, износоустойчивостью и электрической прочностью.

Как известно [1], микродуговое оксидирование приводит к появлению некоторой иерархической последовательности механизмов диссипации энергии, так что поведение системы «анод-покрытиекатод» можно описывать с позиций фрактального (мультифрактального) формализма [2].

В нашей работе на основе анализа изменения мультифрактальных параметров (МФ-параметров) в зависимости от характеристик технологического процесса исследованы процессы самоорганизации МДО-покрытий на алюминии марки А-999.

Микродуговое оксидирование образцов проводили в слабощелочном водном электролите, содержащем гидроксид натрия и жидкое стекло Na_2SO_3 с различной концентрацией. Источник питания позволял поддерживать постоянную плотность тока *j*. Оксидирование проводили при значениях *j* = 5, 10 и 15 мА/см².

Рельеф поверхности МДО-покрытий исследовали на металлографическом микроскопе МИМ-8 и фиксировался с помощью цифрового фотоаппарата. Фрагменты поверхности структуры образцов в компьютерной аппроксимации изображены на рис. 1.

Обработка полученных аппроксимированных изображений поверхности структуры осуществля-



Рис. 1. Аппроксимированные изображения поверхности МДО-покрытий на алюминии при различных плотностях тока: *a*) j = 5 мА/см², *b*) j = 10 мА/см², *b*) j = 15 мА/см². Концентрация жидкого стекла в электролите 33,3 %.



Рис. 2. Канонические спектры сингулярностей $f(\alpha)$ (*a*) и спектры энтропии Реньи (*б*).



Рис. 3. Псевдоспектры сингулярностей f(a)(a) и спектры энтропии Реньи (б).

лась с помощью программы MFRDrom [3] на основе определенных способов генерации меры. Результатом обработки является получение канонических спектров сингулярностей $f(\alpha)$ и спектров обобщенных энтропий — размерностей Реньи D_q (по большим масштабам, см. рис. 2). Также рассчитаны соответствующие им «инвертированные» псевдоспектры (по малым масштабам, см. рис. 3). По полученным спектрам определен ряд МФ-параметров, в том числе $\Delta_{200} = D_1 - D_{200}$ — эффективный параметр упорядоченности структуры, определенный при переменной $q_{max} = 200, K = D_{-200} - D_{200}$ — эффективный параметр беспорядка структуры и f_{200} — эффективный параметр степени однородности структуры.

Характеристики D_q несут некоторую количественную информацию о термодинамических условиях формирования изучаемых структур. В частности, в данном случае можно сказать, что большие значения D_q (при q >> 1) соответствуют большим значениям энтропии.

С помощью D_q можно, с одной стороны, эффективно опознавать внешне неразличимые или слаборазличимые структуры, полученные в одних и тех же условиях, а с другой стороны, устанавливать взаимосвязь с условиями формирования структур.

Показатель Δ_q отражает степень упорядоченности и нарушения фрактальной симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом. Увеличение (по модулю) Δ_q для исследуемой серии структур показывает, что в структуре становится больше периодической составляющей, и в ней возрастает степень нарушения симметрии. Величины Δ_q , полученные из канонических и псевдоспектров, описывают несколько разную упорядоченность. Показатель Δ_q , полученный из канонических (canon) спектров, представляет степень упорядоченности и нарушения симметрии для макроконфигурации исследуемой структуры. Для псевдомультифрактального (*pseudo* — от греч. «прилегающий») варианта расчёта показатель Δ_q отражает степень нарушения локальной симметрии изучаемой структуры по отношению к мультифрактальною.

Обратимся к рис. 4, иллюстрирующему поведение МФ-параметра Δ_q в зависимости от плотности тока и концентрации раствора жидкого стекла в электролите для двух вариантов расчета: канонического — на уровне общей конфигурации структуры формирующейся пленки — (см. рис. 4 *a*) и псевдоварианта — на локальном уровне — (см. рис. 4 δ).

На рис. 5 представлено поведение эффективного МФ-параметра беспорядка структуры в зависимости от плотности тока и концентрации раствора жидкого стекла в электролите для двух вариантов расчета: канонического — на уровне общей конфигурации структуры формирующейся пленки



Рис. 4. Поведение МФ-параметра упорядоченности структуры в зависимости от плотности тока и концентрации электролита: *а* — канонический вариант расчета, *б* — псевдовариант расчета. Цифрами обозначены концентрации жидкого стекла в электролите: *1* — 50%, *2* — 33,3%, *3* — 25%.



Рис. 5. Поведение МФ-параметра меры беспорядка структуры в зависимости от плотности тока и концентрации электролита: *а* — канонический вариант расчета, *б* — псевдовариант расчета.

— (см. рис. 5 *a*) и псевдоварианта — на локальном уровне — (см. рис. 5 *б*).

На рис. 6 изображено поведение эффективного МФ-параметра однородности структуры f_{200} в зависимости от плотности тока и концентрации жидкого стекла в электролите для двух вариантов расчета: канонического — на уровне общей конфигурации структуры формирующейся пленки — (см. рис. 6 *a*) и псевдоварианта — на локальном уровне — (см. рис. 6 *б*).

Анализ кривых, изображенных на рис. 4, 5 и 6 показывает наличие точки перегиба в поведении МФ-параметров, что свидетельствует об имеющем место неравновесном фазовом переходе и следующей за ним области самоорганизации структуры. Этот факт очевидно связан со сменой механизма процессов образования пористого МДО-покрытия. В точке фазового перехода (точка бифуркации) поведение системы металл-оксид-электролит-катод отличается повышенной нестабильностью, что отражается и на поведении соответствующих эффективных МФ-параметров. Известно также [4], что наличие многообразных кристаллических модификаций оксидов, гидроксидов и оксогидроксидов алюминия затрудняет понимание механизма формирования МДО-покрытий на алюминии. Дальнейший анализ поведения МФ-параметров, особенно рассчитанных по псевдоварианту, может облегчить эту задачу.

Таким образом, анализ поведения изученной нелинейной системы с использованием мультифрактальной параметризации позволяет по-новому взглянуть на процесс формирования МДО-покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малышев В.Н., Колмаков А.Г., Баранов Е.Е.* Оптимизация технологии микродугового оксидирования на основе системного подхода. // Перспективные материалы. 2003. № 2. С.5.

2. Kolmakov A.G., Vstovsky G.V. Multifractal Analysis of Metallic Surface Structure Changes during Mechanical Treatment // Materials Science and Technology. 1999. V.15. № 6, P. 705–710.

3. *Vstovsky G.V.* Transform Information: A Symmetry Breaking Measure // Foundations of Physics. 1997. V.27. № 10. P. 1413—1444.

4. Денисов А.И. Структурно-морфологические особенности пористых оксидов алюминия различной функциональности. Реферат диссертации на соиск. ученой степени кандидата ф.-м. наук. // Петрозаводск. 2004.