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  $\mathrm{Na_2SO_3}$  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 МФ-параметризации.

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-покрытие-катод» можно описывать с позиций фрактального (мультифрактального) формализма [2].

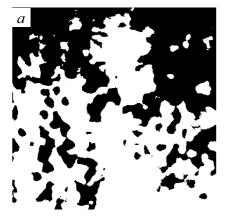
В нашей работе на основе анализа изменения мультифрактальных параметров (МФ-параметров) в зависимости от характеристик технологического

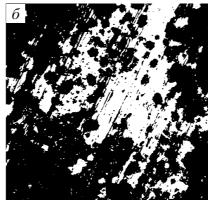
процесса исследованы процессы самоорганизации МДО-покрытий на алюминии марки А-999.

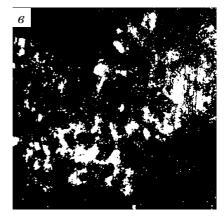
Микродуговое оксидирование образцов проводили в слабощелочном водном электролите, содержащем гидроксид натрия и жидкое стекло  $\mathrm{Na_2SO_3}$  с различной концентрацией. Источник питания позволял поддерживать постоянную плотность тока j. Оксидирование проводили при значениях j=5,10 и 15 мА/см².

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.

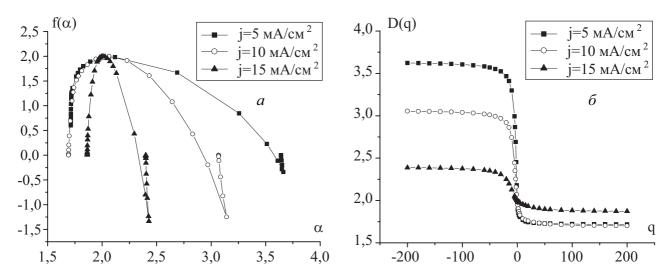
Обработка полученных аппроксимированных изображений поверхности структуры осуществля-



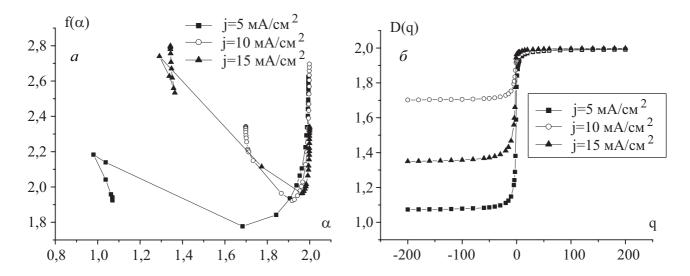




**Рис. 1.** Аппроксимированные изображения поверхности МДО-покрытий на алюминии при различных плотностях тока: a) j = 5 мА/см²,  $\delta$ ) j = 10 мА/см²,  $\epsilon$ ) j = 15 мА/см². Концентрация жидкого стекла в электролите 33,3 %.



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



**Рис. 3.** Псевдоспектры сингулярностей  $f(\alpha)$  (*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.

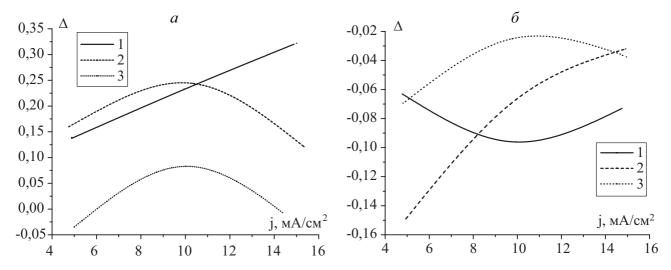
С помощью  $D_q$  можно, с одной стороны, эффективно опознавать внешне неразличимые или слаборазличимые структуры, полученные в одних и тех же условиях, а с другой стороны, устанавливать взаимосвязь с условиями формирования структур.

Показатель  $\Delta_q$  отражает степень упорядоченности и нарушения фрактальной симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом. Увеличение (по модулю)  $\Delta_q$  для исследуемой

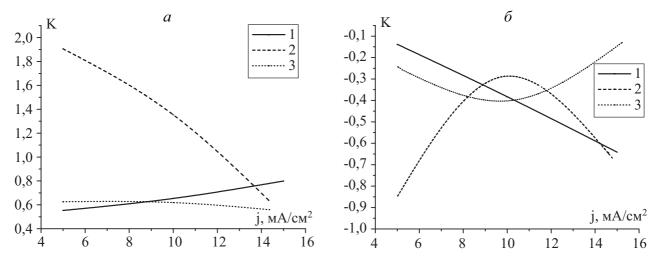
серии структур показывает, что в структуре становится больше периодической составляющей, и в ней возрастает степень нарушения симметрии. Величины  $\Delta_q$ , полученные из канонических и псевдоспектров, описывают несколько разную упорядоченность. Показатель  $\Delta_q$ , полученный из канонических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

Обратимся к рис. 4, иллюстрирующему поведение МФ-параметра  $\Delta_q$  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  $\delta$ ).

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: a — канонический вариант расчета,  $\delta$  — 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: a — канонический вариант расчета,  $\delta$  — псевдовариант расчета.

## МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНОДНЫХ МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ

— (см. рис. 5 a) и псевдоварианта — на локальном уровне — (см. рис. 5  $\delta$ ).

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  $\alpha$ ) и псевдоварианта — на локальном уровне — (см. рис. 6  $\alpha$ ).

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 оксогидрокси-

дов 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.