

УДК 658.512:621.9:621.8:621.7+536.75

Академик П. А. ВИТЯЗЬ, академик А. И. ГОРДИЕНКО,  
Ж. А. МРОЧЕК, М. Л. ХЕЙФЕЦ, О. П. ГОЛУБЕВ

**МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
ПЛАЗМЕННО-ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Институт порошковой металлургии НАН Беларуси,  
Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Белорусский национальный технический университет,  
Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь

Поступило 24. 02.2006

Нанесение покрытий и пленок на рабочие поверхности, модифицирование поверхностных слоев потоками энергии сопровождаются формированием слоистых структур материала изделия. Между слоями образуются переходные зоны, размеры которых существенно влияют на физико-механические свойства. Изучение механизма формирования поверхности, определение оптимальных режимов осаждения покрытий и моделирование структуры покрытий и границ осаждаемых слоев позволяет управлять качеством изготовления деталей машин [1]. Границы слоев можно классифицировать по аналогии с отклонениями и неровностями профиля (Rz–Ra–Rz) шероховатой поверхности (рис. 1).

При изучении особенностей геометрических отклонений профиля границ слоев, вследствие сочетания различных масштабных уровней отклонений, целесообразно использовать фрактальные представления. Разработано множество способов моделирования выступов и неровностей поверхностей [2]. Среди наиболее простых, методы, основанные на моделях регулярных фракталов – фрактала Минковского и кривой Коха (рис.2). Фракталы также используются для генерации объектов квазипериодического характера, тогда их применение позволяет моделировать процессы, носящие нерегулярный и хаотический характер. В этих случаях целесообразно использовать мультифрактальный анализ [3].

Компьютерное изучение и моделирование технологии формирования поверхности сложно-профильного изделия позволяет рассмотреть конфигурацию границ, при этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводятся к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности изделий и специфические условия технологии, связанные со ста-

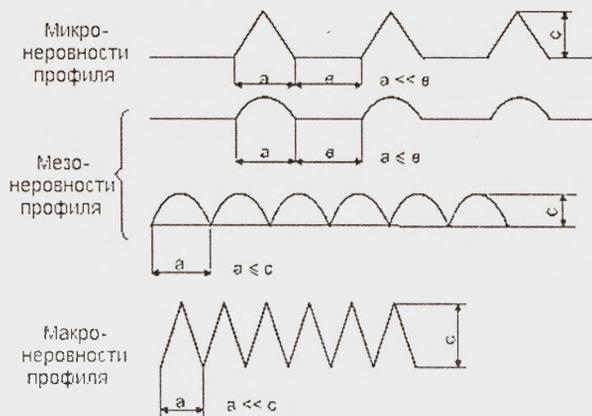


Рис. 1. Отклонения профиля границ слоев

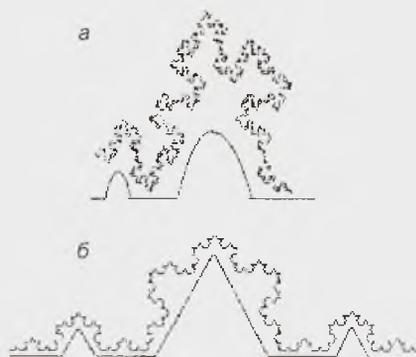


Рис. 2. Описание отклонений профиля фракталом Минковского (а) и кривой Коха (б)

биллизацией процессов, адгезией, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями [4].

При изучении процесса осаждения многокомпонентных вакуумных покрытий рассматривалась основа с идеально гладкой поверхностью, на которой расположены выступы (рис. 3). К ней приложен отрицательный ускоряющий потенциал. Ионный поток, направленный к основе, состоит из однозарядных ионов разных элементов, значительно отличающихся по массе. Вдали от основы ионы имеют скорость, вектор которой направлен перпендикулярно поверхности основы. При подлете ионов к выступам, направление их полета меняется ввиду значительного изменения напряженности электрического поля. Вследствие различия масс ионов их отклонения будут разными. Траектория движения ионов с меньшей массой имеет большую кривизну, и они преимущественно осаждаются в районе вершины выступа. Ионы с большей массой и нейтральная фаза (пар, капли, осколки) осаждаются более равномерно [5].

Таким образом, вследствие неоднородности напряженности электрического поля у поверхности основы наблюдается сепарация ионного потока по массе, а в реальной ситуации – и по заряду. Такая сепарация ионного потока на первом этапе формообразования покрытия приведет к быстрому росту покрытия на вершине выступа мезонеровности (рис. 3, а). Причем по мере его роста радиус закругления вершины будет уменьшаться. Все это приведет к тому, что в какой-то момент времени радиус закругления вершины выступа, а следовательно, и напряженность электрического поля достигнут таких величин, что коэффициенты распыления и конденсации могут стать равными и рост выступа мезонеровности прекратиться.

В то же время между выступами по-прежнему будет идти формирование покрытия за счет преимущественного осаждения тяжелых ионов и нейтральной фазы, приводящее к тому, что в определенный момент пространство между ними заполнится настолько, что оно само станет местом для роста нового выступа-пика (рис. 3, а). В рассматриваемой модели сепарация ионного потока осуществляется по массе. В то же время в реальном процессе в потоке присутствуют ионы с различными по величине зарядом, что будет приводить и к сепарации ионов по заряду.

Рассмотрим влияние энергии ионов на процесс формирования пиков. При ионно-вакуумной обработке процесс конденсации сопровождается распылением ионов (рис. 3, б). Причем если на поверхности конденсации имеются выступы макронеровностей, способствующие повышению напряженности электрического поля, то на них следует ожидать интенсификации процесса самораспыления.

В результате конденсации многокомпонентного ионного потока будут существовать зоны, в которых концентрируются преимущественно легкие и многозарядные ионы и где процесс самораспыления осуществляется более интенсивно, чем в других областях (рис. 3, б). Следовательно, в покрытии содержание легких элементов и элементов, образующих многозарядные ионы из-за самораспыления будет уменьшаться.

В результате моделирование процессов формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий может основываться на принципе сепарации ионов по массе и заряду в районах выступов различного происхождения в результате повышения на них напряженности электрического поля, с учетом масштабного фактора отклонений неровностей профиля и мультифрактального характера формирующихся структур.

Мультифрактальный анализ формирующихся структур и отклонений неровностей профиля осаждаемых покрытий проводился с использованием компьютерной программы MFRDrom (мультифракталодром), позволяющей обрабатывать серии изображений размером до  $2000 \times 2000$  пикселей в диапазоне значений управляющего параметра  $q \in [200; \pm 200]$  [3, 6].

В MFRDrom при обработке снимков изображения с растрового электронного микроскопа (рис. 4) генерируется информация для частных параметров мультифрактальных спектров по данным статистической обработки корректных спектров при произвольной выборке масштабов об-

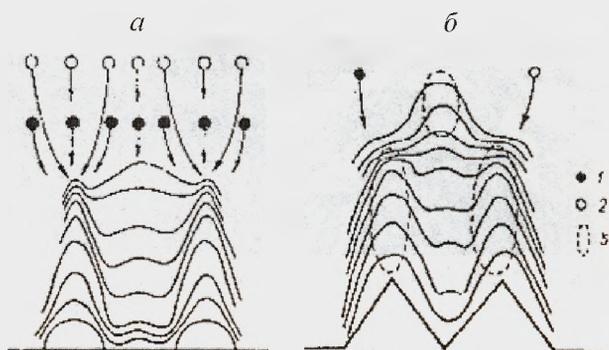


Рис. 3. Модель формирования многокомпонентного покрытия на выступах мезонеровностей (а) и макронеровностей (б): 1 – тяжелые ионы; 2 – легкие; 3 – зоны самораспыления

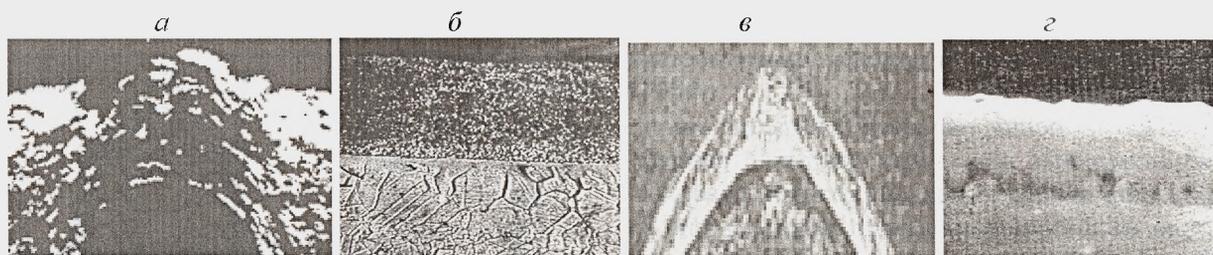


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 3000$ ) покрытия (а), на отдельном выступе (б), в переходной зоне (в), на выступе с радиусом при вершине 30 мкм (г)

#### Параметризация мультифрактальных структур исследуемых снимков

Снимки	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_q$	$D_q^N$	$\Delta_q$	$\delta_q$
а	2,000	1,988	1,977	1,962	2,756	0,026	0,794
б	2,000	1,970	1,954	1,954	2,400	0,016	0,446
в	2,000	1,999	1,998	1,953	2,071	0,046	0,118
г	2,000	1,984	1,974	1,902	2,434	0,082	0,532

Примечание.  $D_0$  – хаусдорфова размерность;  $D_1$  – информационная размерность;  $D_2$  – корреляционная размерность;  $D_q$  – экстремальное значение по управляющему параметру  $q$  меры  $\mu$ , объекта при разбиении его на  $i$  частей;  $D_q^N$  – предельное значение  $D_q$ ;  $\Delta_q = D_1 - D_q$  – степень упорядоченности, при  $\Delta_q < 0$  – отсутствие упорядоченности;  $\delta_q = D_q - D_q^N$  – степень разреженности

работки изображений (таблица). Анализ мультифрактальной информации показал тесную связь взаимосвязь информационной  $D_1$  и корреляционной  $D_2$  размерности и подтвердил целесообразность предложенной классификации отклонений профиля (Rz-Ra-Rz) границ слоев (см. рис. 1). Экстремальная фрактальная размерность  $D_q$  по управляющему параметру  $q$  с ростом отклонений неровностей профиля монотонно убывает, в то время как информационная  $D_1$  и корреляционная  $D_2$  размерность имеют участок возрастания на мезоуровне (Ra) при относительном постоянстве размерностей на микро- и на макроуровнях (Rz).

В результате исследования образующихся структур и рельефа поверхностного слоя (рис. 4 и таблица) установлено, что на выступах рельефа формирующейся поверхности фрактальная степень упорядоченности структур  $\Delta_q$  максимальна, а процесс наиболее интенсивен. Следствием этого является высокая фрактальная степень разреженности структур  $\delta_q$  в переходной между слоями зоне, что особенно заметно для различных по массе и заряду ионов и режимов формирования осаждаемых в вакууме слоев.

Таким образом, описание электрофизических процессов формирования многокомпонентных покрытий с использованием мультифрактального формализма, анализ структур и рельефа поверхности покрытия по результатам статистической обработки мультифрактальных спектров позволили разработать и опробировать комплексную модель осаждения ионного покрытия и предложить рекомендации по управлению технологическим процессом для повышения геометрических и физико-механических параметров качества изделий.

#### Литература

- Хейфец М. Л., Кожуро Л. М., Мрочек Ж. А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель, 1999.
- Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов. Ниж Новгород, 1999.
- Иванова В. С., Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Пименов В. Н. Мультифрактальный метод тестирования устойчивости структур в материалах. М., 2000.
- Яшерцын П. И., Лугаков Н. Ф., Хейфец М. Л., Кухта С. В. // Вестн НАН Беларуси Сер. физ.-техн. наук. 2000. № 3. С. 40–43.
- Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Марков Г. В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий. Мн., 1991.
- Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур. Ижевск, 2001.

VITLAZ P. A., GORDIENKO A. I., MROCHEK G. A., KHEIFETZ M. L., GOLUBEV O. P.

#### MULTIFRACTAL ANALYSIS OF MULTICOMPONENT PLASMA-VACUUM COATINGS

#### Summary

The analysis of the multifractal information on shaping multicomponent coatings at the ionic settling-down in vacuum is presented.