

УДК 004.681.2.08

А.И. МИХАЛЕВ, А.Ю. ЗИМОГЛЯД, А.И. ГУДА, В.В. КОВТУН
Национальная Металлургическая академия Украины**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ НАПЫЛЕНИЯ**

В настоящей работе исследуется новый способ формирования неоднородных структур, обладающих фрактальными свойствами на поверхности твердого тела, а также приводятся результаты исследования зависимости фрактальной размерности структуры от скорости нанесения.

Современный уровень развития технологий характеризуется использованием функциональных покрытий, обладающих заданным поверхностными свойствами. Важным свойством, определяющим множество параметров покрытия, является структура поверхности. При этом фрактальные структуры позволяют достигать значений параметров, недостижимых для структур с регулярным рельефом. На сегодняшний день фрактальные структуры широко применяются в электронике, оптике, медицине. Для образования фрактальных структур на поверхности твердого тела, применяются различные способы, например, поверхностная модификация материалов сильноточными электронными и ионными пучками, охлаждение подложки при нанесении, специально сконструированные магнетронные системы и т.п. В ходе эксперимента, было выявлено, что при низкой скорости испарения железа в вакууме, возможно получение неоднородной поверхности, проявляющей фрактальные свойства. Были приведены микрофотографии структур, а так же измерены их фрактальные размерности.

Исходя из этого, для получения функциональных покрытий, в основе которых лежат фрактальные структуры, имеет смысл применять данный метод получения этих структур. Управление скоростью нанесения возможно как путём регулирования температуры, так и заданием геометрических параметров установки для нанесения. При этом уменьшение скорости испарения приводит к образованию функциональных фрактальных покрытий.

Ключевые слова: тонкопленочные покрытия, фрактальные структуры, напыление пленок в вакууме.

О.І. МИХАЛЬОВ, А.Ю. ЗИМОГЛЯД, А.І. ГУДА, В.В. КОВТУН
Національна Металургійна академія України**МОДЕЛЮВАННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ З
УРАХУВАННЯМ ШВИДКОСТІ НАПИЛЕННЯ**

У даній роботі досліджується новий спосіб формування неоднорідних структур, які володіють фрактальними властивостями на поверхні твердого тіла, а також наводяться результати дослідження залежності фрактальної розмірності структури від швидкості нанесення.

Сучасний рівень розвитку технологій характеризується використанням функціональних покриттів, що володіють заданим поверхневими властивостями. Важливою властивістю, що визначає безліч параметрів покриття, є структура поверхні. При цьому фрактальні структури дозволяють досягати значень параметрів, недосяжних для структур з регулярним рельєфом. На сьогоднішній день фрактальні структури широко застосовуються в електроніці, оптиці, медицині. Для створення фрактальних структур на поверхні твердого тіла, застосовуються різні способи, наприклад, поверхнева модифікація матеріалів Потужнострумів електронними та іонними пучками, охолодження підкладки при нанесенні, спеціально сконструйовані магнетронні системи і т.п. В ході експерименту, було виявлено, що при низькій швидкості випаровування заліза в вакуумі, можливо отримання неоднорідної поверхні, яка проявляє фрактальні властивості. Були наведені мікрофотографії структур, а так само виміряні їх фрактальні розмірності.

Виходячи з цього, для отримання функціональних покриттів, в основі яких лежать фрактальні структури, має сенс застосовувати даний метод отримання цих структур. Управління швидкістю нанесення можливо як шляхом регулювання температури, так і завданням геометричних параметрів установки для нанесення. При цьому зменшення швидкості випаровування призводить до утворення функціональних фрактальних покриттів.

Ключові слова: тонкоплівкові покриття, фрактальні структури, напилення плівок в вакуумі.

A.I. MIKHALYOV, A.Y. ZIMOGLYAD, A.I. GUDA, V.V. KOVTUN
National Metallurgical Academy of Ukraine

SIMULATION FRACTAL STRUCTURES OF FUNCTIONAL COATINGS WITH REGARD TO SPEED OF EVAPORATION

In this paper, we investigate a new method formation of heterogeneous structures with fractal properties on the surface of a solid, as well as the results of an investigation of the dependence of the fractal dimension of the structure on the deposition rate.

The modern level of technology development is characterized by the use of functional coatings that have specified surface properties. An important property that determines a set of parameters of a coating is the surface structure. At the same time, fractal structures allow one to achieve values of parameters that are unachievable for structures with a regular relief. To date, fractal structures are widely used in electronics, optics, medicine. For the formation of fractal structures on the surface of a solid, various methods are used, for example, surface modification of materials by high-current electron and ion beams, substrate cooling during deposition, specially designed magnetron systems, and like that. To assess the effect of the application parameters on the surface properties, a physical experiment was performed. In the course of the experiment, a thin layer of iron was deposited on the glass substrate. The method of application was thermal deposition in a vacuum. In the course of the experiment, it was found that at a low evaporation rate of iron in a vacuum, it is possible to obtain an inhomogeneous surface exhibiting fractal properties. The microphotographs of the structures were given, and their fractal dimensions were also measured.

Proceeding from this, to obtain functional coatings based on fractal structures, it makes sense to apply this method of obtaining these structures. The control of the application speed is possible both by controlling the temperature and by setting the geometric parameters of the application unit. In this case, a decrease in the evaporation rate leads to the formation of functional fractal coatings.

Keywords: thin film coatings, fractal structures, film spraying in a vacuum.

Постановка проблеми

Современный уровень развития технологий характеризуется использованием функциональных покрытий, обладающих заданным поверхностными свойствами [6, 7]. Важным свойством, определяющим множество параметров покрытия, является структура поверхности. При этом фрактальные структуры позволяют достигать значений параметров, недостижимых для структур с регулярным рельефом. На сегодняшний день фрактальные структуры широко применяются в электронике, оптике, медицине.

Для образования фрактальных структур на поверхности твердого тела, применяются различные способы [1, 3], например, поверхностная модификация материалов высокоэнергетическими электронными и ионными пучками, охлаждение подложки при нанесении, специально сконструированные магнетронные системы и т.п.

Цель исследования

В настоящей работе исследуется новый способ формирования неоднородных структур, обладающих фрактальными свойствами на поверхности твердого тела, а также приводятся результаты исследования зависимости фрактальной размерности структуры от скорости нанесения.

Изложение основного материала исследования

Для оценки влияния параметров нанесения на свойства поверхности был поставлен физический эксперимент. В ходе эксперимента на стеклянную подложку наносился тонкий слой железа. Способом нанесения было выбрано термическое нанесение в вакууме. Нанесение производилось в вакуумном универсальном poste (ВУП-4) с использованием созданного приспособления для термического напыления в вакууме (рис. 1).

Целью проведения эксперимента было исследование влияния скорости нанесения материала на свойства получаемой структуры на подложке. Для регулировки скорости испарения металла в вакууме производилось управление током через нагреватель, что позволяло плавно регулировать температуру. Скорость испарения металла можно оценить, используя формулу Герца–Кнудсена (1):

$$V_{evap.} = 5.84 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot P. \tag{1}$$

Испарение железа производилось при максимально возможном вакууме для данной установки – 0.0133 Па. Воспользовавшись формулой средней длины свободного пробега молекул (2), оценим условия при нанесении покрытия:

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot p} \tag{2}$$

Обеспечивались условия, при которых длина свободного пробега составила 80 см, а расстояние от тигля до подложки – 7 см. Подставив эти значения в уравнение Кнудсена (3), получим число большее 1, следовательно, можно не учитывать столкновение атомов между собой, а лишь соударения атомов металлов о поверхность стенок сосуда [8, 10]:

$$K_n = \frac{\lambda}{a}. \quad (3)$$

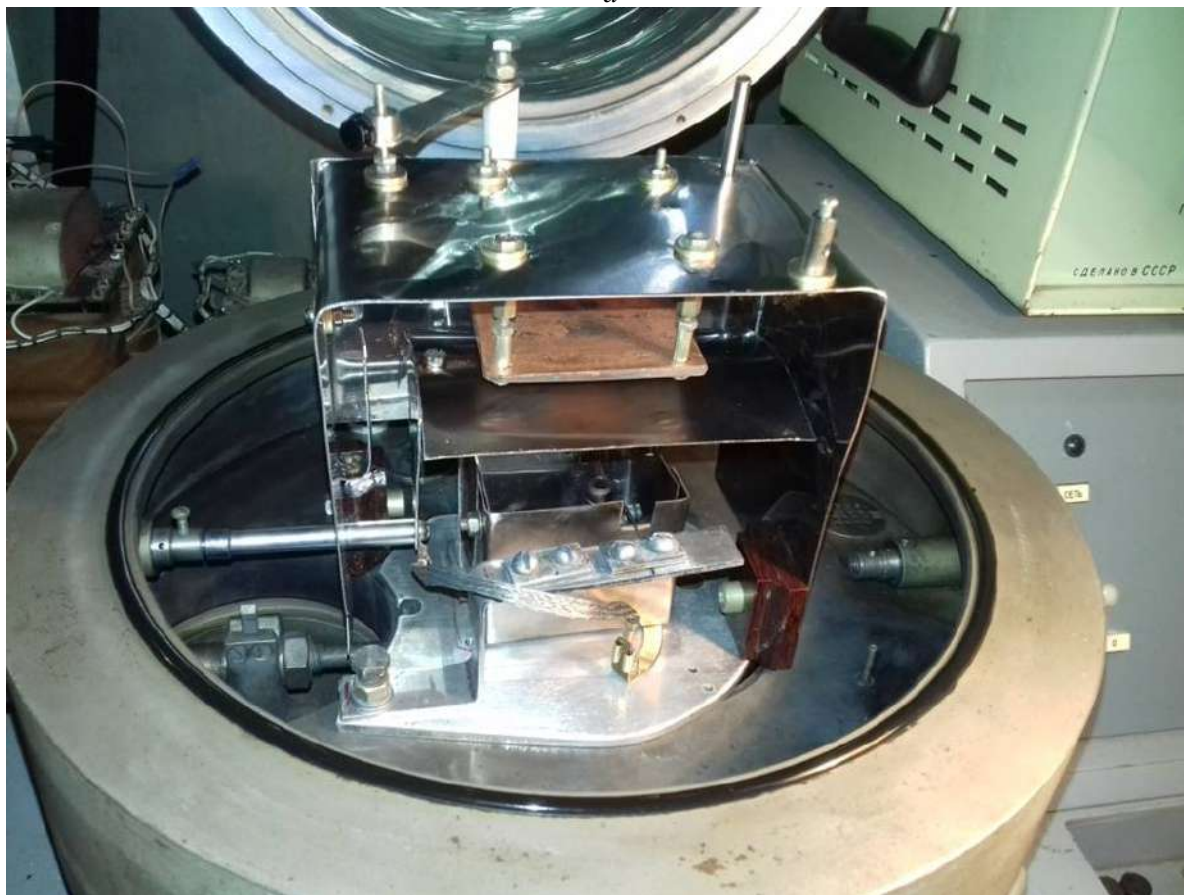


Рис. 1. Приспособление для термического напыления металла в вакууме

В ходе эксперимента ток через нагреватель сопротивлением 0.12 Ома изменялся от 8 до 20 А. Процесс нанесения для каждого образца занимал одинаковое время – 10 минут. Было исследовано 5 образцов. Скорость испарения железа из тигля изменялась от $2.98 \cdot 10^{-6}$ до $4.98 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$. Было выявлено, что при минимальной скорости испарения железа, с последующим нанесением на стеклянную подложку, проявляется матовая, неоднородная структура (рис. 2).



Рис. 2. Пленка железа, нанесенная на стеклянную подложку при минимальной скорости испарения

При большем же нагреве тигля, а следовательно, и большей скорости испарения, железо наносилось более однородно, в результате поверхность получалась зеркальной. При рассмотрении пленки, полученной

при минимальной скорости испарения в металлографическом иммерсионном микроскопе МИМ – 8М, была получена структура пленки (рис. 3).

Для фрактального анализа структуры пленки была применена ранее написанная программа Imghead, использующая алгоритм box-counting (рис. 4). Процедура обработки изображений на микрофотографиях состояла в следующем. Все растры, полученные с помощью специальной камеры с разрешением 2 Мп, для микроскопа, приводились к черно-белой шкале (проходили бинаризацию), а затем по уже полученному бинарному изображению проводилось измерение фрактальной размерности [6, 7].

Для проверки работоспособности программы и определения погрешности измерения были проведены измерения размерностей тестовых объектов: квадрата (=2), кривой Коха (=1.26), треугольника Серпинского (=1.58). Относительная погрешность измерений не превышает 0.1%.

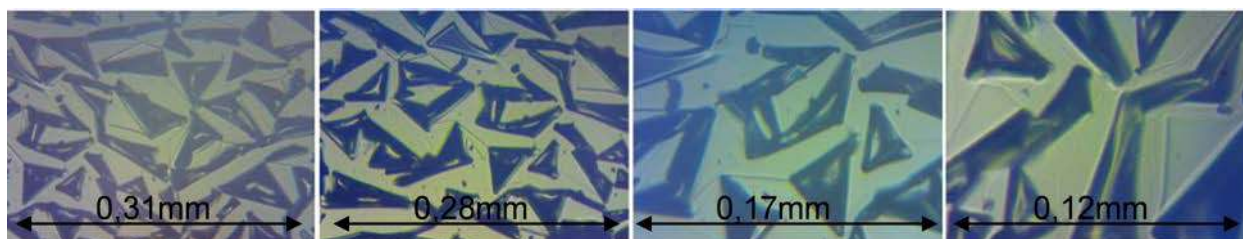


Рис. 3. Структура пленки в одной точке, с разным увеличением слева на право (5040 Pix/mm; 5690 Pix/mm; 9500 Pix/mm; 12860 Pix/mm)

Для каждой фотографии, с использованием разных масштабов проводилось измерение фрактальной размерности.

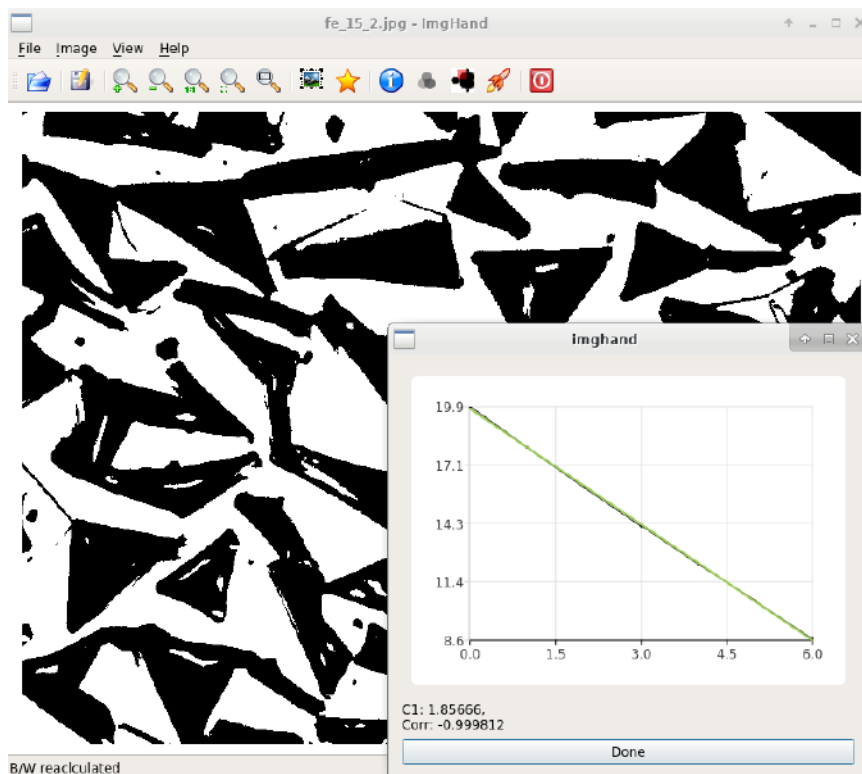


Рис. 4. Измерение фрактальной размерности изображения в программе Imghead

В результате обработки изображений были получены следующие величины фрактальной размерности: 1.86 при 5040 Pix/mm; 1.8659 при 5690 Pix/mm; 1.89886 при 9500 Pix/mm и 1.92682 при 12860 Pix/mm. Полученные значения размерностей весьма близки, и лишь на максимальном увеличении наблюдается существенное отклонение. Скорее всего, это вызвано меньшей глубиной резкости при применении объектива микроскопа с большим увеличением.

Поскольку структура поверхности пленки состояла преимущественно из треугольников, возник естественный вопрос о распределении значений их углов. Углы треугольных элементов на полученных структурах были измерены, и по измеренным значениям была построена гистограмма (рис. 5).

Анализ данной гистограммы позволяет сделать вывод, что, несмотря на ограниченность количества исходных данных, существуют значения углов, которые наиболее часто представлены в данной структуре, а

именно 32, 45, 50, 55, 72, 90, 108. Следует отметить, что значения, равные 32, 72, 108 градусов, имеют особое значение, так как эти углы являются золотыми, характеризующими золотое сечение (мозаика Пенроуза).

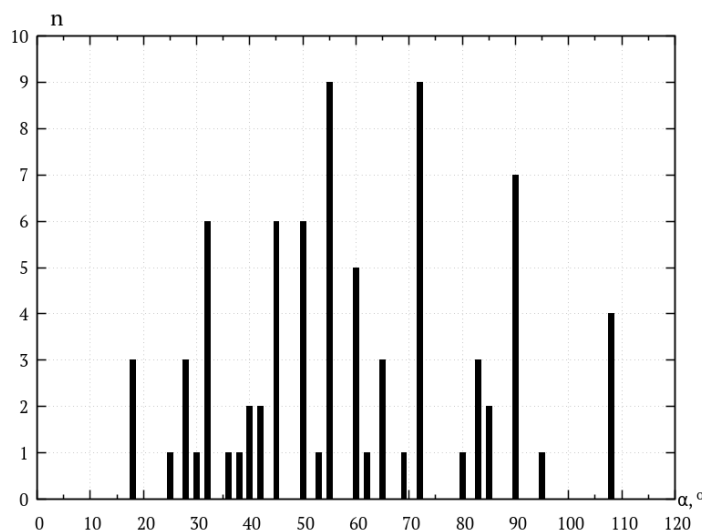


Рис. 5. Гистограмма распределения значений углов

Выводы

В ходе эксперимента, было выявлено, что при низкой скорости испарения железа в вакууме, возможно получение неоднородной поверхности, проявляющей фрактальные свойства. Были приведены микрофотографии структур, а так же измерены их фрактальные размерности.

Исходя из этого, для получения функциональных покрытий, в основе которых лежат фрактальные структуры, имеет смысл применять данный метод получения этих структур. Управление скоростью нанесения возможно как путём регулирования температуры, так и заданием геометрических параметров установки для нанесения. При этом уменьшение скорости испарения приводит к образованию функциональных фрактальных покрытий.

Список использованной литературы

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б.С. Данилин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.
2. Попов В.Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии/ В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин — М.: Высш. шк., 1988. — 255 с.
3. Виноградов М.И. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии / М.И. Виноградов, Ю.П. Маишев. — М.: Машиностроение, 1989. — 56 с.
4. Mattox M. Donald. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control / M. Donald Mattox. — Westwood, N.J.: Noyes Publications, 1998. — 944 p.
5. Powell Vapor Deposition. The Electrochemical Society series / F. Carroll, H. Joseph, Oxley, J. M. Blocher. — New York: Wiley, 1966 — 158 p.
6. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. — М.: Наука, 1994. — 382 с.
7. Бунин И.Ж. Концепция фрактала в материаловедении / И.Ж. Бунин, А.Г. Колмаков, В.Г. Встовский, В.Ф. Тереньтєв // Материаловедение. — 1999. — № 2. — С. 19-26.
8. Антоненко С.В. Технология тонких пленок / С.В. Антоненко. — М.: МИФИ, 2008. — 104 с.
9. Шешин Е.П. Вакуумные технологии / Е.П. Шешин. — М.: Интеллект, 2009 — 504 с.
10. Миначев В.Е. Нанесение пленок в вакууме. Серия Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники, книга 6/ В.Е. Миначев. — М.: Высшая школа, 1989. — 110 с.
11. Розанов Л.Н. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. — М.: Высшая школа, 1990. — 320 с.