

05

Получение, структура и некоторые физические свойства углеродного депозита и хрома, имеющих фрактальное строение

© Ю.В. Соколов, В.С. Железный

Воронежский государственный технический университет
E-mail: www/falcon@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2003 г.

Обнаружено, что углеродный депозит, полученный при распылении графита в электрической дуге, и хром, полученный при электрохимическом осаждении при определенных условиях, имеют подобную фрактальную структуру. Приводятся данные по свойствам, величине фрактальных агрегатов и фрактальной размерности D углеродного депозита и хрома. Обсуждается возможный механизм образования фрактальных структур.

В последнее время внимание исследователей привлечено к объектам, имеющим фрактальную структуру. Интерес к фрактальным структурам обусловлен по меньшей мере двумя причинами [1]. Во-первых, фрактальный агрегат является распространенным природным объектом. Во-вторых, он является основным структурообразующим элементом целого ряда макроскопических систем, возникающих в результате протекания различных физико-химических процессов и явлений. Применение концепции фрактальной геометрии берет свое начало с фундаментальных работ Мандельброта [2]. Сведения о структуре и свойствах фрактальных объектов базируются в основном на результатах теоретических моделей. В данной работе мы получили при распылении графитовых стержней в электрической дуге и электрохимическом осаждении углеродный депозит и хром, которые имеют подобную облакоподобную фрактальную структуру.

Углеродный депозит был получен при следующих условиях. Из рабочей камеры выкачивался воздух до давления 10^{-2} Torr. Затем напускался рабочий газ — аргон. Давление варьировалось в пределах 500–600 Torr. Сечение графитового стержня 5×3 mm, длина 100 mm.

Сила тока 170–190 А при напряжении 15–20 В. Время осаждения депозита на неподвижном графитовом электроде варьировалось в пределах 10–180 с. Углеродный депозит осаждался на катоде. В зоне контакта углеродный депозит имел вид кольца серебристого цвета толщиной 1–3 мм в зависимости от времени горения дуги. Фрактальные структуры хрома были получены в результате электрохимического осаждения при следующих условиях. Состав электролита: CrO_3 — 250 г/л, H_2SO_4 — 2.5 г/л. Температура электролита: $t = 44$ – 55°C . Плотность постоянного тока 0.3 A/cm^2 , напряжение 9–10 В. Анод — нерастворимый свинец. Хром осаждался на катоде. Скорость хромирования $13 \mu\text{m/h}$. Время хромирования — 18–20 h.

Изучение фрактальной структуры углеродного депозита и хрома проводилось на растровом электронном микроскопе в режиме вторичных электронов. На рис. 1, *a, b* представлено изображение углеродного депозита при увеличении в $\times 8700$ (*a*) и $\times 310$ (*b*) раз соответственно. В процессе образования углеродного депозита фрактальные агрегаты размером 0.7–1.1 μm (рис. 1, *a*) образуют макроскопические облакоподобные образования размером 1–3 μm (рис. 1, *b*).

Авторы работ [3,4] также получали углеродный депозит, но он не имел фрактальной структуры, так как плотность тока в дуге у них была в пределах 169 – 372 A/cm^2 , тогда как мы получали углеродный депозит при $j = 1000$ – 1200 A/cm^2 . Столь высокая плотность и обеспечивает формирование углеродного депозита, имеющего фрактальное строение. При такой плотности тока температура дуги достигает 10^4 K . В межэлектродном промежутке образуется углеродная плазма и за время 10^{-4} s образуются кластеры порядка нескольких нанометров, из которых по механизму кластер-кластерной агрегации формируются фрактальные агрегаты [5].

Для расчета фрактальной размерности использовалась модель фрактальных агрегатов, состоящих из кластеров радиуса r_0 с плотностью графита ρ_0 . При радиусе фрактального агрегата $R \gg r_0$ число кластеров в нем определяется следующим образом:

$$N(r) = (R/r_0)^D, \quad (1)$$

где D — фрактальная размерность. Из (1) следует выражение для определения плотности вещества в сфере радиуса R :

$$\rho = \rho_0(r_0/R)^{3-D}, \quad (2)$$

где ρ — плотность углеродного депозита.

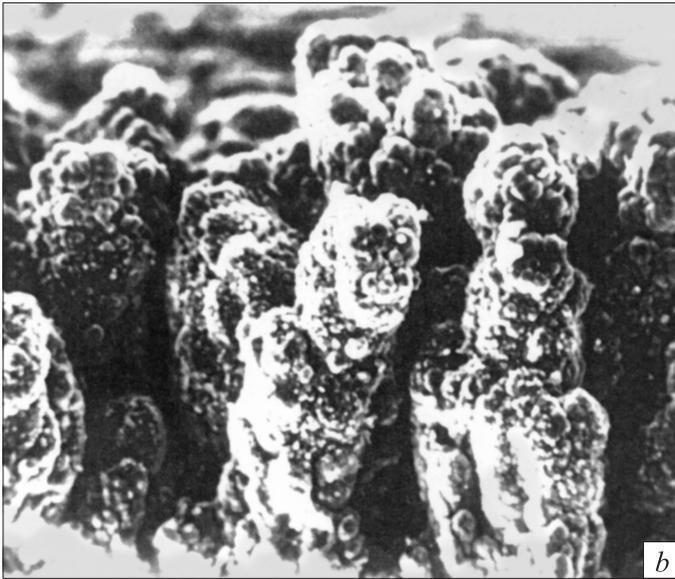
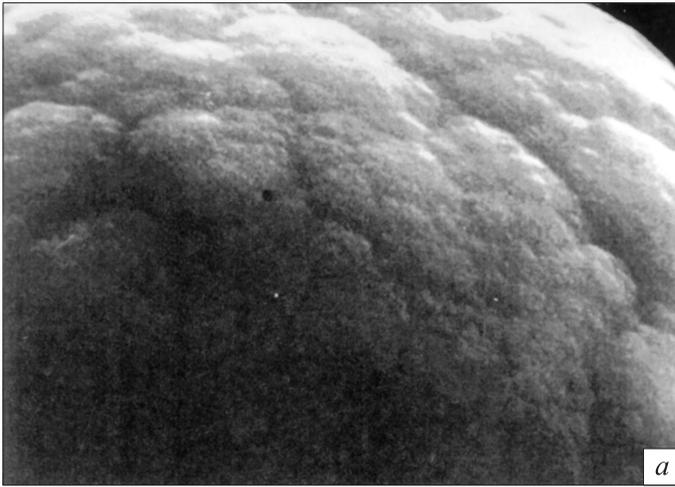


Рис. 1. Поверхностная структура углеродного депозита: *a* — $\times 8700$, *b* — $\times 310$.

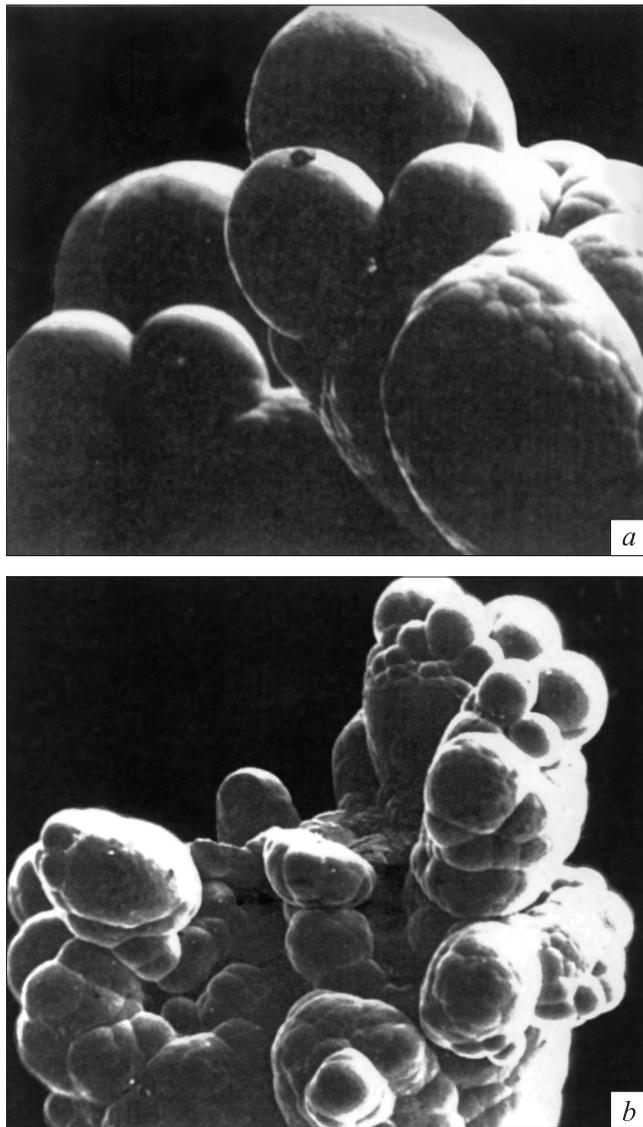


Рис. 2. Поверхностная структура фрактального хрома: *a* — $\times 220$, *b* — $\times 77$.

Плотность углеродных депозитов $\rho = 1.32 \text{ g/cm}^3$, $\rho_0 = 2.23 \text{ g/cm}^3$, $R = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$, $r_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$. Фрактальная размерность углеродных депозитов $D = 2.89$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что углеродные депозиты являются плотными объемными фракталами, размерность которых приближается к трем.

На рис. 2, *a, b* представлено изображение фрактальной структуры хрома при увеличении в $\times 220$ (*a*) и $\times 77$ (*b*) раз соответственно. На рис. 2, *a* видны фрактальные агрегаты размером $1.2\text{--}2 \mu\text{m}$. Из них образуются облакоподобные образования размером $7\text{--}10 \mu\text{m}$ (рис. 2, *b*).

Плотность фрактальных структур хрома $\rho = 6.2 \text{ g/cm}^3$, плотность кристаллического хрома $\rho_0 = 7.1 \text{ g/cm}^3$, $R = 8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$, $r_0 = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$. Фрактальная размерность полученных структур хрома $D = 2.95$.

Объемные фрактальные структуры, состоящие из фрактальных агрегатов и облакоподобных образований и имеющие сходное строение, образуются из совершенно разных материалов и при различных физических процессах. Для их образования необходим поток вещества. Фрактальные „ветки“ растут на краях и различных макроскопических дефектах подложки.

Таким образом, фрактальные структуры образуются при соблюдении следующих условий: градиент концентрации вещества; взаимодействие вещества с полем. На различных макроскопических дефектах растущего фрактала напряженность электрического поля выше. В результате на дефектах и краях фрактальной ветки вещество осаждается быстрее и, как следствие, происходит ветвление и образование фрактальной структуры.

В заключение выражаем благодарность В.П. Иевлеву за помощь в проведении исследований на растровом электронном микроскопе.

Список литературы

- [1] Михайлов Е.Ф., Власенко С.С. // УФН. 1995. Т. 165. В. 3. С. 263–283.
- [2] Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman. New York, 1983. 421 с.
- [3] Yoshinori A. // Fullerenes science & technology. 1994. V. 2. N 2. P. 173–180.
- [4] Грушко Ю.С., Егоров В.М., Зимкин И.Н. // ФТТ. 1995. Т. 37. В. 6. С. 1838–1842.
- [5] Meakin P. // Phys. Rev. Letters. 1983. V. 51. N 13. P. 1119–1123.