

05

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

© Ю.В. Соколов

Воронежский государственный университет
E-mail: wwwfalcon@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 ноября 2005 г.

Обнаружено, что углеродный депозит, полученный при распылении графита в электрической дуге, а также железо и хром, полученные при электрохимическом осаждении при определенных условиях, имеют фрактальную структуру. Приводятся данные по свойствам, величине фрактальных агрегатов и фрактальной размерности D углеродного депозита, железа и хрома, а также данные по связи фрактальной размерности с физическими свойствами материалов. Обсуждается возможный механизм образования фрактальных структур.

PACS: 61.43.Nv

Интерес к фрактальным структурам обусловлен по меньшей мере двумя причинами [1]. Во-первых, фрактальный агрегат является пространственным 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]. В данной работе мы получили при распылении графитовых стержней в электрической дуге и электрохимическом осаждении углеродный депозит, железо и хром, которые имеют подобную фрактальную структуру. Фракталы являются самоорганизованными системами. Существуют общие принципы, управляющие возникновением самоорганизующихся структур. Разнообразные явления самоорганизации (структуры в жидкостях, химические волны, рост фрактальных агрегатов), подчиняющиеся

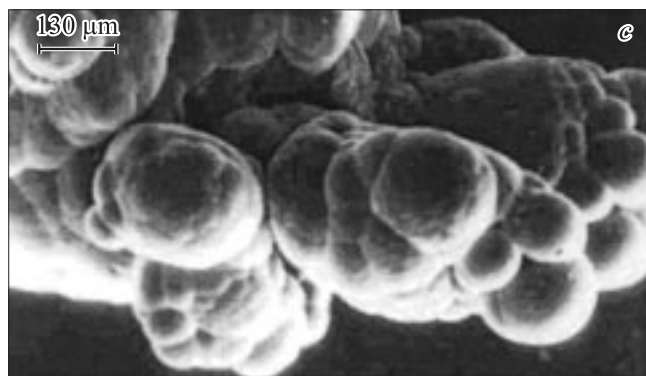
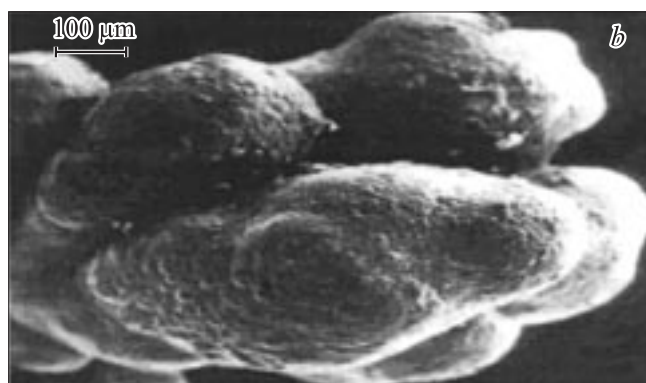
одним и тем же принципам, подпадают под объединяющие понятия синергетики [3].

Углеродный депозит был получен при следующих условиях. Из рабочей камеры выкачивался воздух до давления 10^{-2} Торр. Затем напускался рабочий газ — аргон. Давление варьировалось в пределах 500–600 Торр. Сечение графитового стержня 5×3 мм, длина — 100 мм. 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 железа были получены в результате электрохимического осаждения при следующих условиях. Состав электролита: FeCl_2 — 400 г/л, H_2SO_4 — 0.8–1 г/л, KJ — 5–10 г/л, соляная кислота добавляется до $\text{pH} = 1$. Плотность постоянного тока: 0.12–0.2 А/см². Анод — низкоуглеродистая сталь. Фрактальные структуры хрома получались при следующих условиях. Состав электролита: CrO_3 — 250 г/л, H_2SO_4 — 2.5 г/л. Плотность постоянного тока 0.3 А/см², напряжение 9–10 В. Анод — нерастворимый свинец.

Изучение морфологии фрактальных структур проводилось на растровом электронном микроскопе РЭМ-300 в режиме вторичных электронов. Микротвердость измерялась с помощью стандартного метода на приборе ПМТ-3. Плотность фрактальных структур измерялась с помощью гидростатического метода.

На рисунке, *a* представлено изображение углеродного депозита, полученное с помощью растрового электронного микроскопа. В процессе образования углеродного депозита фрактальные агрегаты размером 0.5–1 μm образуют макроскопические облакоподобные образования размером 3–9 μm . Из экспериментальных данных по плотности углеродных депозитов, а также радиуса фрактальных агрегатов [4,5] была определена фрактальная размерность, которая оказалась равной $D = 2.89$.

Авторы работ [6,7] также получали углеродный депозит, но он не имел фрактальной структуры, так как плотность тока в дуге у них была в пределах 170–370 А/см², тогда как мы получали углеродный депозит при $j = 1000$ –1500 А/см². Столь высокая плотность и обеспечивает формирование углеродного депозита, имеющего фрактальное строение. При такой плотности тока температура дуги достигает 10^4 К.



Изображение фрактального углеродного депозита (*a*), железа (*b*) и хрома (*c*).

В межэлектродном промежутке образуется углеродная плазма и за время 10^{-4} s образуются кластеры порядка нескольких нанометров, из которых по механизму кластер-кластерной и диффузионно-ограниченной агрегации формируются фрактальные агрегаты [8].

На рисунке, *b* представлено изображение фрактальных структур железа. Видны фрактальные агрегаты размером $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$. Из фрактальных агрегатов образуются облакоподобные образования размером $20\text{--}30\ \mu\text{m}$. Фрактальная размерность полученных структур железа: $D = 2.93$. На рисунке, *c* представлено изображение фрактальных структур хрома. Из фрактальных агрегатов размером $4\text{--}6\ \mu\text{m}$ образуются облакоподобные образования размером $25\text{--}65\ \mu\text{m}$. Фрактальная размерность структур хрома: $D = 2.95$. Ионы хрома и железа разрезаются на катоде и происходит фрактальный рост по механизму диффузионно-ограниченной агрегации.

Плотность углеродных депозитов составляет 60% от плотности графита, тогда как их микротвердость превышает микротвердость поликристаллического графита в 27–30 раз. Плотность фрактальных структур железа и хрома составляет 95 и 94% от плотности поликристаллического железа и хрома соответственно. Микротвердость превышает микротвердость кристаллического хрома и железа в 1.6 и 1.9 раз соответственно.

Фрактальные структуры образуются при соблюдении следующих условий:

- градиент концентрации вещества;
- наличие электромагнитного поля;
- 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 углеродном депозите, полученном при распылении графитовых стержней в электрической дуге, а также железе и хrome, полученных электролитическим методом при определенных условиях, образуются за счет увеличения порового пространства сфероидальные нано- и микрокластеры, имеющие более высокую, чем в объемном материале, микротвердость. Поэтому фрактальные структуры представляют собой довольно твердые образования с определенным объемом пористости.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что фрактальные структуры углеродного депозита, железа и хрома являются объемными фракталами, размерность которых приближается к трем. 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 и наличие электромагнитного поля. Фрактальные „ветки“ растут на краях подложки и различных макроскопических дефектах.

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. № 3. С. 263–283.
- [2] Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman. New York, 1983. P. 421.
- [3] Хакен Г. Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Пер. с англ. М., 1985. 423 с.
- [4] Золотухин И.В., Соколов Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 13. С. 71–75.
- [5] Соколов Ю.В., Железный В.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 8. С. 91–94.
- [6] Yoshinori A. // Fullerene science & technology. 1994. V. 2. N 2. P. 173–180.
- [7] Грушко Ю.С., Егоров В.М., Зимкин И.Н. и др. // ФТТ. 1995. Т. 37. № 6. С. 1838–1842.
- [8] Meakin P. // Phys. Rev. Letters. 1983. V. 51. N 13. P. 1119–1122.