

05;12

Фрактальная структура углеродного депозита, получаемого при распылении графита в электрической дуге

© Ю.В. Соколов, В.С. Железный

Воронежский государственный технический университет

E-mail: wwwfalcon@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2002 г.

Представлены экспериментальные данные, показывающие, что при распылении графита в электрической дуге на катоде образуется углеродный депозит, имеющий фрактальную структуру. Исследование углеродного депозита проводилось с помощью атомно-силового микроскопа. Он состоит из кластеров порядка 1–5 нм. Поверхность и профиль углеродного депозита имеют самоаффинное фрактальное строение. Вычислена фрактальная размерность поверхности и профиля углеродного депозита и показатель Харста, который используется для характеристики самоаффинных фракталов.

При дуговом методе получения фуллеренов на катоде образуется осадок, который получил название „углеродный депозит“. Его образование обусловлено неравновесными условиями (градиент температуры и концентрации атомов) при горении электрической дуги. Наряду с большим числом работ, посвященных получению фуллеренов и исследованию их свойств, имеются единичные работы [1,2], в которых исследуется микроскопическая структура углеродного депозита.

Из результатов работы [1] следует, что углеродный депозит состоит из нанотрубок и наночастиц, тогда как в работе [2] получена структура, названная „протуберанцами“.

Нами изучалась поверхностная структура углеродного депозита, полученного при следующих условиях. Из рабочей камеры выкачивался воздух до давления 10^{-2} Торг. Затем напускался рабочий газ — аргон или гелий. Давление варьировалось в пределах 10–600 Торг. Для зажигания дугового разряда графитовый электрод в виде прямоугольного стержня сечением 5×3 мм и длиной 100 мм заостренным концом вводился в соприкосновение с неподвижным графитовым электродом, имеющим площадь в месте контакта 1.5×1.5 см. Устанавливался

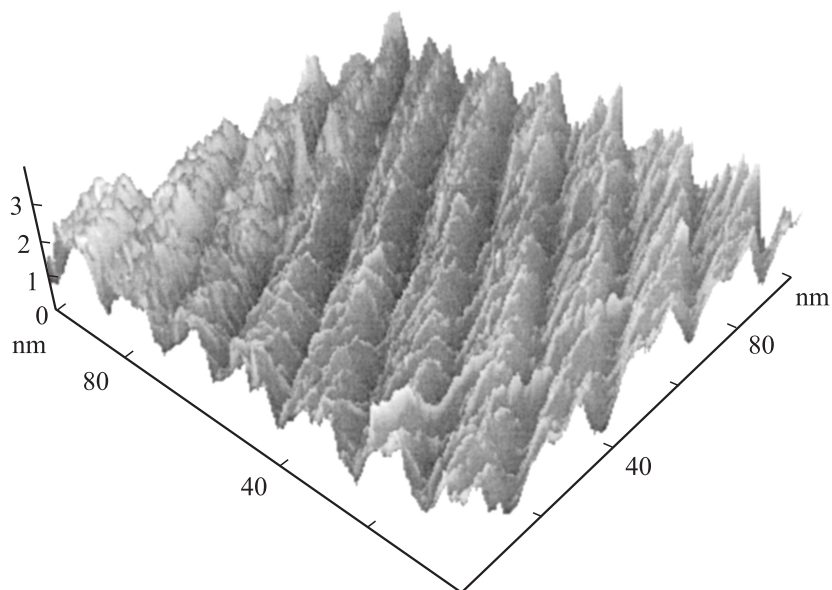


Рис. 1. Поверхность углеродного депозита. Площадь сканирования 100×100 nm.

ток порядка 170–190 А при напряжении 15–20 В. Время осаждения депозита на неподвижном графитовом электроде варьировалось в пределах 10–180 с. В зоне контакта углеродный депозит имел вид кольца серебристого цвета толщиной 1–3 нм в зависимости от времени горения дуги.

Изучение поверхностной структуры углеродного депозита проводилось на атомно-силовом микроскопе. На рис. 1, 2 представлено изображение поверхности и профиля углеродного депозита соответственно. Как видно из рис. 1 и 2, поверхность углеродного депозита состоит из протяженных сильно изрезанных выступов и впадин шириной порядка 20–40 нм. На изображении также видны кластеры порядка 5 нм, которые, в свою очередь, состоят из кластеров размером ~ 1 нм.

Авторы работ [1,2] не смогли получить углеродный депозит, имеющий фрактальную структуру, так как плотность тока в дуге у них была в пределах $169\text{--}372$ А/см², тогда как мы получали углеродный депозит при $j = 1000\text{--}1200$ А/см². Столь высокая плотность и обес-

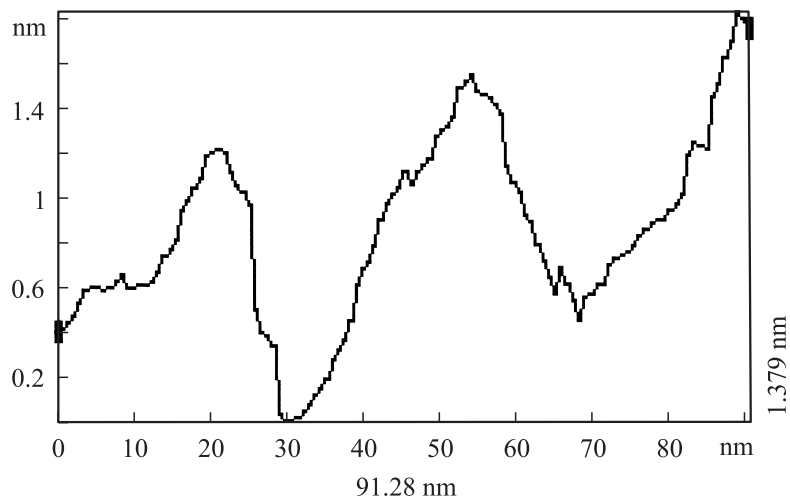


Рис. 2. Профиль поверхности углеродного депозита.

печивает формирование углеродного депозита, имеющего фрактальное строение. При такой плотности тока температура дуги достигает 10^4 К. В межэлектродном промежутке образуются углеродная плазма и за время 10^{-4} с — кластеры порядка нескольких нанометров, из которых по механизму кластер-кластерной агрегации формируются фрактальные агрегаты [3].

Под фракталом понимается структура, состоящая из частей, подобных целому. Увеличенные части объекта не будут тождественно совпадать с целым, но асимптотически в пределе в вероятностных оценках оказываются самоподобными [4]. При построении фракталов преобразование подобия трансформирует геометрическую фигуру по всем направлениям с одинаковым коэффициентом. При росте самоаффинных фракталов коэффициенты преобразования разные.

Методом сеток была вычислена фрактальная размерность поверхности и профиля углеродного депозита. Фрактальная размерность поверхности: $D = 1.8$. Поверхность углеродного депозита является самоаффинной, так как в направлении z размер фрактальных структур в 30–50 раз меньше, чем в направлениях x и y . Профиль поверхности углеродного депозита характеризуется как самоаффинная кривая с фрактальной размерностью: $D = 1.1$. Показатель Харста H ,

характеризующий самоаффинные фракталы, для случайных трехмерных поверхностей равен [4]:

$$H = E + 1 - D, \quad (1)$$

где E — размерность евклидова пространства; D — фрактальная размерность. Он связан с фрактальной размерностью поверхности следующим соотношением [5]:

$$H = 3 - D. \quad (2)$$

Показатель Харста поверхности и профиля равен 1.2 и 1.9 соответственно. По своему содержанию показатель Харста является кофрактальной размерностью и используется для характеристики самоаффинных фракталов и мультифракталов. Он характеризует шероховатость, неровность поверхности.

Углеродный депозит состоит из кластеров порядка одного или нескольких нанометров. Удельная внутренняя поверхность S рассчитывается по формуле:

$$S = 3/\rho r, \quad (3)$$

где ρ — плотность углеродного депозита; r — средний радиус кластеров, из которых состоит углеродный депозит.

При $\rho = 1.32 \text{ g/cm}^3$; $r = 3 \text{ nm}$ получаем $S = 757.6 \text{ m}^2/\text{g}$.

Углеродный депозит обладает очень большой удельной внутренней поверхностью и, следовательно, может быть использован в качестве адсорбента.

В заключение выражаем благодарность Л.А. Битюцкой и А.К. Спицыну за помощь в проведении исследований на атомно-силовом микроскопе.

Список литературы

- [1] *Yoshinori A.* // *Fullerene science & technology*. 1994. V. 2. N 2. P. 173–180.
- [2] *Грушко Ю.С., Егоров В.М., Зымкин И.Н.* // *ФТТ*. 1995. Т. 37. № 6. С. 1838–1842.
- [3] *Золотухин И.В., Соколов Ю.В., Иевлев В.П.* // *ФТТ*. 1998. Т. 40. № 3. С. 584–586.
- [4] *Бобро Ю.Г., Мельник В.Н., Шостак А.В.* // *Металлы*. 1999. № 3. С. 109–113.
- [5] *Talibuddin S., Runt J.P.* // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76. N 9. С. 5070–5078.