

Danhui Han*, Chong Peng, Guangtong Zhou, Bingtao Hu

State Key Laboratory for High Performance Tools,
Zhengzhou Research Institute for Abrasives & Grinding Co., Ltd,
Zhengzhou, P.R. China

*zwxlby@126.com

Швидкий синтез композитів наноалмаз/ оксид графену з використанням вибухових характеристик оксиду графену

Частинки наноалмазу та порошки оксиду графену (ОГ) використовували як сировину для створення композитів наноалмаз/відновлений ОГ (вОГ) з використанням вибухової реакції ОГ. Результати рентгенівської дифрактометрії, перетворення Фур'є і рентгенівської фотоелектронної спектроскопії вказують на те, що швидке нагрівання може індукувати вибухові реакції в ОГ. За допомогою цієї вибухової реакції ОГ швидко відновлюється до графену. Результати сканувальної електронної мікроскопії вказують на те, що ОГ зазнав істотного розширення і відшарування, а частинки наноалмазів були повністю перенесені на шари вОГ.

Ключові слова: оксид графену, наноалмаз, вибухова реакція, зв'язка.

В останні роки наноалмаз викликає великий інтерес серед дослідників, тому що не тільки має чудові властивості алмазу, але й особливі властивості, такі як ефект малого розміру, поверхневий ефект, квантовий ефект тощо, і тому має широкий спектр потенційних застосувань [1]. Висока хімічна інертність наноалмазу значно обмежує його продуктивність і застосування. Створення композитної структури з наноалмазу та графену може ефективно регулювати структуру поверхні наноалмазу та покращити його поверхневі властивості.

Дослідження показали, що можна синтезувати матеріали наноалмаз/графен типу ядро–оболонка. Такі матеріали мають чудові електрохімічні властивості [2], а також демонструють відмінну адсорбційну та фотокаталітичну здатність щодо органічних забруднювачів [3]. З наведеного вище випливає, що можна отримати відносно недорогий наноалмаз методом дроблення сировини, і для цього застосувати простий і недорогий процес підготовки для отримання високоякісного композита з наноалмазу і графену.

Численні дослідження [4, 5] показали, що оксид графену (ОГ) має легкозаймисті та вибухонебезпечні властивості. Коли швидкість нагрівання досягає порогового значення > 10 °C/хв, це спричиняє локальне підвищення температури і реакцію теплової детонації в ОГ. Під час цього процесу детонації структура sp^3 перетворюється на вуглець sp^2 і вивільняє велику кількість газоподібних продуктів.

Автори даної роботи спробували використати наноалмаз і ОГ як сировину для індукування вибуху ОГ за допомогою швидкого нагрівання. В процесі

відновлення ОГ висока температура і високий тиск, що виникають в результаті реакції вибуху, викликали компонування наноалмазу з графеном.

Використовували порошки ОГ чистотою 95 % і діаметром 20–50 мкм виробництва компанії “Suzhou Carbon Feng Graphene Technology Co., Ltd.” та порошки наноалмазів чистотою 99,9 % і середнім розміром частинок 20 нм виробництва компанії “Zhengzhou Smart Industrial Co, Ltd.” Порошки наноалмазу і ОГ зважували і рівномірно змішували в різних молярних співвідношеннях 1:4, 1:6, 1:8, 1:10, 1:12, отримані зразки було позначено А1, А2, А3, А4 і D5 відповідно. Ці змішані порошки компонували в щільні диски діаметром 12 мм і товщиною ~ 3–4 мм за допомогою сталеві форми. Отриману заготовку поміщали на піддон невеликої електричної печі (модель FL500A). Швидкість нагрівання становила 20 °С/хв. Коли температура досягала ~ 200 °С, зразок міг вибухнути внаслідок реакції. Після вибуху збирали порошки і продовжували визначати наступні параметри. Фазовий склад зразків аналізували за допомогою рентгенівського дифрактометра типу D/MAX-2500PC. Мікроструктуру досліджували за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ, тип Quanta 250 FEG). Зразки тестували за допомогою інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур’є з використанням інфрачервоного абсорбційного спектрометра IS50/6700 виробництва “Thermo Fisher Scientific”. Стан поверхні зразків досліджували за допомогою рентгенівського фотоелектронного спектрометра (РФС, модель 250XI) виробництва “Thermo Fisher Scientific”.

На рис. 1, *a* видно, що на одній стороні зразка А3 почалася реакція (1–2 с) і виділилася невелика кількість диму. Потім вибух став більш вираженим. Вся реакція вибуху була не дуже інтенсивною і тривала близько 26 с. Зображення сканувальної електронної мікроскопії (див. рис. 1, *б*) зразка А3 свідчить про те, що він складався з великої кількості фрагментів. Ці продукти утворилися внаслідок розширення і відшарування шарів ОГ після реакції вибуху. Чітко видно велику кількість алмазних наночастинок, що потрапили на шари в ОГ (див. рис. 1, *в*).

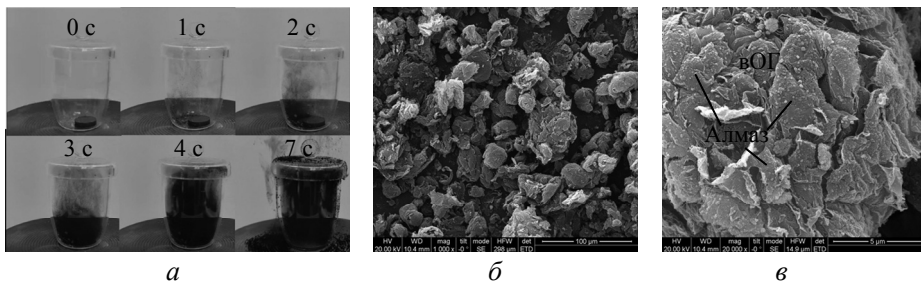


Рис. 1. Схематичне представлення зміни в часі після нагрівання та загоряння компактів із суміші порошоків наноалмазу та ОГ (*a*); СЕМ-зображення зразка А3 (*б*, *в*).

На рис. 2 показано рентгенограми (*a*) та ІЧ-спектри (*б*) синтезованих зразків, а також характерні піки РФС C1s в зразку А3 (*в*), C 1s в зразку ОГ (*г*). На рис. 2, *a* видно, що поверхня наноалмазної сировини була злегка графітізована, а інтенсивність графітового піку була дуже слабкою. Зі зменшенням вмісту наноалмазу в сировині інтенсивність його дифракційного піку також поступово зменшувалася. У продуктах реакції характерні дифракційні піки ОГ майже зникають за 11°, за 24,3° з’являється широкий дифракційний пік Манту, що вказує на те, що ОГ відновлюється до графену. Ці результати вка-

зують на те, що після реакції вибуху ОГ у зразку зазнав реакції відновлення, водночас більшість кисневмісних функціональних груп було видалено, а міжшарова відстань зменшилася. Структура графіту повністю не відновилася і були помітні дефекти. На рис. 2, б показано ІЧ-спектр наноалмазної сировини, зразків ОГ і А3. Після реакції вибуху інтенсивність піків кожної функціональної групи в зразку А3 явно зменшилася або зникла. Цей результат свідчить про те, що в процесі приготування композитів ОГ був ефективно відновлений до вОГ, і функціональні групи на поверхні наноалмазів також, очевидно, зникли. Характерний пік РФС для С 1s у ОГ показано на рис. 2, з, де підігнаний пік за 284,6 еВ відповідає С=C. Піки, розташовані за 288,8 і 291,67 еВ, були С=О і О=C-О, відповідно. Цей результат свідчить про наявність великої кількості кисневмісних функціональних груп у ОГ. На рис. 2, в показано характерний пік РФС для С 1s в А3. Видно, що три піки, розташовані за 284,6, 286 і 288,8 еВ, були С=C, С-О і С=О відповідно. На відміну від результату, отриманого на рис. 2, а, пік О=C-О зник. Пік С=О також був значно ослаблений. Серед цих трьох підігнаних піків інтенсивність двох останніх піків була явно слабшою, ніж інтенсивність піку С=C. Наведені вище результати повністю вказують на те, що більшість кисневмісних функціональних груп на ОГ були видалені, і ОГ був в основному відновлений до графену.

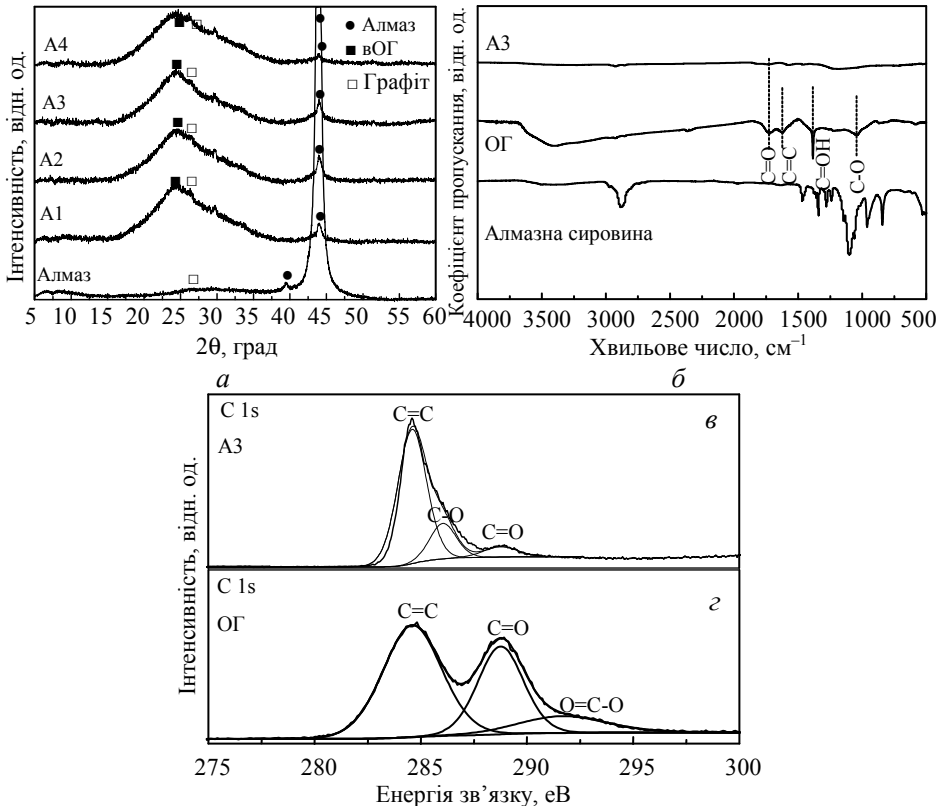


Рис. 2. Рентгенограми (а) та ІЧ-спектри (б) синтезованих зразків, характерні піки РФС С 1s у зразку А3 (в), С1s у зразку ОГ (з).

З наведеного вище можна зробити висновок, що в цьому дослідженні повністю перетворено ОГ під час швидкого нагрівання за низьких температур, які можуть індукувати вибухові реакції. Під час вибухової реакції ОГ був

відновлений до графену. Графен – це двовимірний кристалічний матеріал, що складається з атомів вуглецю, які утворюють гексагональну ґратку. Алмаз, з іншого боку, має тривимірну структуру ґратки. Тому алмаз і графен вважаються алотропами. Однак варто зазначити, що структура ґратки графену дуже нагадує структуру (111) поверхні алмазу, з низьким коефіцієнтом невідповідності – всього 1,7 %, що свідчить про відмінну сумісність між двома матеріалами. Отже, за допомогою вибухової реакції було створено швидко утворений високоякісний композит з нанодіаманту та вОГ. Це дослідження є корисним для створення композитних матеріалів з інших матеріалів та вОГ з використанням реакції вибуху ОГ.

ПОДЯКИ

Автори дякують за підтримку в рамках виконання Ключового плану науково-дослідних проєктів коледжів та університетів провінції Хенань (22A430041, 21A460036, 23A430026).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори цієї роботи заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Danhui Han, Chong Peng, Guangtong Zhou, Bingtao Hu
State Key Laboratory for High Performance Tools,
Zhengzhou Research Institute for Abrasives & Grinding Co., Ltd,
Zhengzhou, P.R. China
Rapid synthesis of nanodiamond/rGO composites by utilizing
the explosive characteristics of graphene oxide

Nanodiamond particles and graphene oxide (GO) powders were used as raw materials to construct nanodiamond/reduced GO (rGO) composites by utilizing the explosive reaction of GO. The XRD, FTIR, and XPS results indicate that rapid heating can induce explosive reactions in GO. GO was rapidly reduced to graphene by this explosive reaction. The SEM results indicate that GO undergone obvious expansion and peeling, and the nanodiamond particles were fully loaded onto the rGO sheets.

Keywords: *graphene oxide, nanodiamond, explosive reaction, bond.*

1. Kumar S., Nehra M., Kedia D., Dilbaghi N., Tankeshwar K., Kim K.-H. Nanodiamonds: Emerging face of future nanotechnology. *Carbon*. 2019. Vol. 143. P. 678–699.
2. Portet C., Yushin G., Gogotsi Y. Electrochemical performance of carbon onions, nanodiamonds, carbon black and multiwalled nanotubes in electrical double layer capacitors. *Carbon*. 2007. Vol. 45. P. 2511–2518.
3. Liang B.Y., Zhang L.J., Wang W.K. Nanodiamond core/onion-like carbon shell materials with excellent visible light photocatalytic activity. *Mater. Res. Exp.* 2019. Vol. 6, no. 4. P. 45609–45626.
4. Qiu Y., Guo F., Hurt R. Explosive thermal reduction of graphene oxide-based materials: Mechanism and safety implications. *Carbon*. 2014. Vol. 72. P. 215–223.
5. Qiu Y., Moore S., Hurt R., Kulaots I. Influence of external heating rate on the structure and porosity of thermally exfoliated graphite oxide. *Carbon*. 2017. Vol. 111. P. 651–657.

Надійшов до редакції 07.03.24

Після доопрацювання 03.05.24

Прийнятий до опублікування 08.05.24