

Danhui Han^{1,*}, Junlong Liu¹, Chong Peng¹, Baoyan Liang²

¹State Key Laboratory for High Performance Tools,
Zhengzhou Research Institute for Abrasives & Grinding Co., Ltd,
Zhengzhou, P.R. China

²Materials and Chemical Engineering School,
Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, P.R. China

*zwxlby@126.com

Створення структури композита алмаз/графен методом низькотемпературної термічної обробки

Композит алмаз/графен було отримано з використанням оксиду графену (ОГ). Отримані композити досліджено за допомогою рентгенівської дифракції, скануючої електронної мікроскопії, просвічуючої електронної мікроскопії, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є. Вивчено вплив частинок різних розмірів і вмісту алмазів на фазовий склад і мікроструктуру виробів. Результати вказують на те, що ОГ значно відновлюється за температури ~ 200 °С. Більшість матеріалів ОГ були відновлені до графену. Вони збільшилися в розмірі, були відшаровані і набули форму, подібну до органа. На поверхні алмазних частинок за допомогою простої термічної обробки із сумішею алмазних і ОГ порошків утворювалося графенове покриття. Вплив покриття великих алмазних частинок був слабким через їхню високу інертність. Квазіядерно-оболонкову структуру композита алмаз/графен можна отримати з використанням дрібнозернисті алмази.

Ключові слова: термічне відновлення, графен, алмаз, композит.

ВСТУП

Алмаз не тільки має високу комерційну цінність, але й широко використовується в промисловому виробництві завдяки своїм чудовим експлуатаційним характеристикам. В останні роки привертають увагу наноалмази. Вони успадкували чудові властивості алмазних матеріалів, такі як висока твердість, високий модуль пружності, висока теплопровідність і низький коефіцієнт тертя, а також мають переваги як низькорозмірні матеріали [1, 2]. Тому наноалмази мають широкі перспективи застосування в різних галузях, таких як біомедицина [3], механічне змащення [4], очищення води [5] та каталіз [6].

Функціоналізація поверхонь наноалмазів для підвищення продуктивності зазвичай необхідна через їхню високу інертність. Важливим напрямком досліджень є створення композитів з іншими матеріалами [7–10], такими як SiO₂ і TiO₂. Створення композитної структури з наноалмазів і графену дозволяє ефективно регулювати структуру поверхні наноалмазів і покращувати їхні поверхневі властивості. Алмаз і графен є алотропами. Структура решітки графену є такою ж, як і у поверхні алмазу (111), з коефіцієнтом невідповідності всього 1,7 %, що вказує на хорошу сумісність. Отже, інтерфейсний зв'язок

композитів наноалмаз/графен може бути міцнішим, ніж у інших композитів на основі наноалмазу; отже, композити наноалмаз/графен мають хороші перспективи застосування. Наприклад, в [11] синтезовано композиційний матеріал, що складається з ультрадисперсних наноалмазів, рівномірно диспергованих у неупорядкованому багатошаровому графені. Цей композитний матеріал має некогерентний інтерфейс з твердістю за Кнупом до 53 ГПа, міцністю на стиск до 54 ГПа і провідністю до $670\text{--}1240\text{ см}^{-1}$ за кімнатної температури. Цей новий тип надтвердого і надміцного вуглецевого композиційного матеріалу з провідними елементами має кращі комплексні характеристики, ніж відомі провідні кераміка і композити С/С. Після високотемпературного відпалу поверхня наноалмазних частинок, отриманих методом детонації, поступово перетворюється на вуглець цибулевої структури, з якого можна легко конструювати наноалмазні/графенові матеріали типу ядро–оболонка. Цей матеріал демонструє чудові електрохімічні властивості [12] і відмінні адсорбційні та фотокаталітичні характеристики для органічних забруднювачів [13].

Незважаючи на значний прогрес в отриманні композитів наноалмаз/графен, згадані вище методи отримання, як правило, вимагають жорстких умов або дорогих наноалмазів, синтезованих за допомогою детонаційного методу. Наприклад, в [11] для отримання композитних структур використовували спікання за високої температури і високого тиску. В [12, 13] структури типу ядро–оболонка отримували за допомогою високотемпературної обробки ($1400\text{ }^\circ\text{C}$ і вище). Наведений вище аналіз вказує на те, що необхідно розробити відносно недорогий метод дроблення для підготовки наноалмазів як сировини, з одночасним використанням м'якого процесу підготовки для отримання якісного композита з наноалмазів і графену.

У цьому дослідженні було використано наноалмази, отримані дробленням, і порошки оксиду графену (ОГ) як сировину для термічної обробки за низьких температур. Реакція термічного відновлення ОГ за низької температури була використана для утворення графену, що дозволило отримати композити наноалмаз/графен. Вивчено вплив вмісту ОГ та розміру частинок алмазу на фазовий склад і морфологію продуктів.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Використовували монокристалічні алмазні порошки із середнім розміром частинок 200, 1 мкм і 20 нм фірми Zhengzhou Smart Industrial Co, Ltd (Китай) і порошки ОГ промислового класу з чистотою 95 % фірми Suzhou Carbon Feng Graphene Technology Co, Ltd (Китай). Після того, як алмаз і ОГ у вигляді сировини було зважено в різних пропорціях, їх змішували протягом 2 год за допомогою кульового млина для рівномірного перемішування. Сталеву форму використовували для пресування подрібненого порошку в заготовку діаметром 10 мм і товщиною ~ 3 мм. Зразки поміщали в графітовий тигель, який накривали кришкою і поміщали в трубчасту піч для термічної обробки. Швидкість нагріву становила $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$, температура нагріву – $250\text{ }^\circ\text{C}$, час витримки – 1 год. Потім зразки охолоджували в печі. Термооброблені компакти подрібнювали в порошок і пропускали через сито 200 меш.

Фазовий склад зразків аналізували за допомогою рентгенівської дифракції (XRD; тип D/MAX-2500PC, $\text{CuK}\alpha$ випромінювання). Мікроструктуру досліджували за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ, тип Quanta 250 FEG) та трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ, тип FEI Tecnai f20s twin). Термогравіметричний (ТГ) та диференційний термічний аналіз проводили за допомогою синхронного термічного аналізатора типу 209F3. Швид-

кість нагрівання становила $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ у атмосфері повітря. Інфрачервону спектроскопію з перетворенням Фур'є (ФПЧС) проводили на інфрачервоному абсорбційному спектрометрі типу is50/6700. Стан поверхні зразка досліджували за допомогою рентгенівського фотоелектронного спектрометра (тип 250XI). Сировину ОГ та термооброблені продукти ОГ аналізували на раманівському спектрометрі Thermo DXR2xi за довжини хвилі лазерного випромінювання 785 нм .

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Процес низькотемпературного термічного відновлення ОГ

Криву термогравіметричного аналізу та диференціальної скануючої калориметрії (ТГ-ДСК) для порошоків ОГ показано на рис. 1, де видно, що ОГ демонструє значну екзотермічну реакцію (пік $195,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) в діапазоні від 140 до $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одночасно відбувалася значна втрата ваги ($28,9\%$). У разі подальшого підвищення температури вага ОГ поступово зменшувалася. Наведені вище результати вказують на те, що ОГ зазнав різкої реакції відновлення і перетворився на графен приблизно за температури $195\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термічний розклад кисневмісних груп привів до утворення CO , CO_2 і H_2O , що спричинило значну втрату ваги ОГ. Однак відновлення було неповним, і подальше нагрівання привело до подальшого зменшення залишків ОГ, які не були відновлені. Коли температура досягла $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, зразок знову почав втрачати вагу через окиснення роздрібленого оксиду графену (pОГ) до CO і CO_2 .

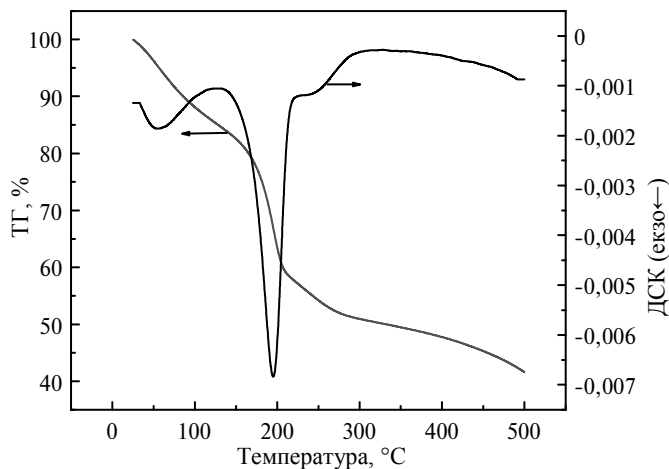


Рис. 1. Криві ТГ-ДСК порошоків ОГ.

На рис. 2 показано рентгенограми продукту рОГ, отриманого зі зразка ОГ, нагрітого за температури $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ і витриманого протягом 1 год. Характерний дифракційний пік ($\sim 11^{\circ}$) ОГ зник, а продукт мав розширений графітоподібний дифракційний пік після термообробки за температури $24,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, що вказує на те, що термообробка певною мірою відновила *sp*-гібридну систему оксиду графену. Однак цілісність кристалічної структури була явно знижена порівняно з графітом, а ступінь неупорядкованості значно збільшився [14]. Крім того, з'явився слабкий дифракційний пік за температури $\sim 42,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, що вказувало на зменшення ОГ.

На рис. 3, *а*, *б* показано СЕМ-зображення, а на рис. 3, *в*, *г* – ТЕМ-зображення зразка рОГ. Після низькотемпературної відновлювальної обробки

ОГ збільшилися в розмірі, були відшаровані і набули форму, подібну до органа (див. рис. 3, *а*). На поверхні та краях спостерігали зморшки (див. рис. 3, *б*), що переконливо підтверджує інтенсивність реакції термічного відновлення. Термооброблені вироби демонструють чіткий невпорядкований розподіл складчастих листоподібних структур, що нагадують тонку марлю (див. рис. 3, *в*). Викривлення кристалічної решітки вуглецю (див. рис. 3, *г*) вказує, що реакція була дуже інтенсивною.

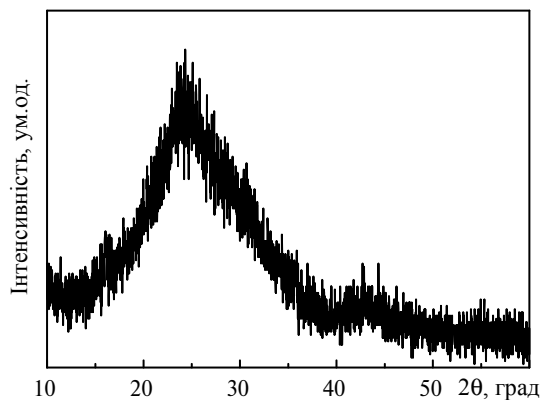
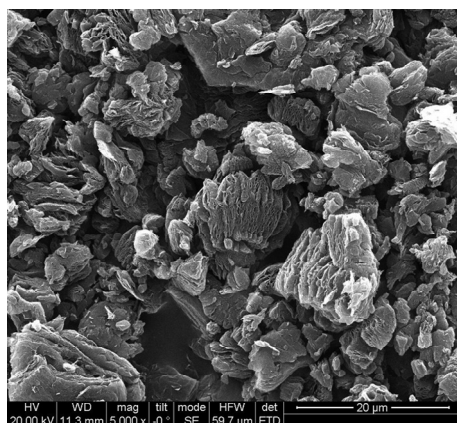
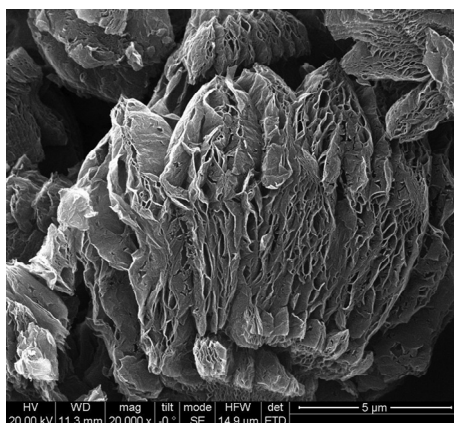


Рис. 2. XRD продукту, отриманого після термічної обробки ОГ за температури 250 °С протягом 1 год.



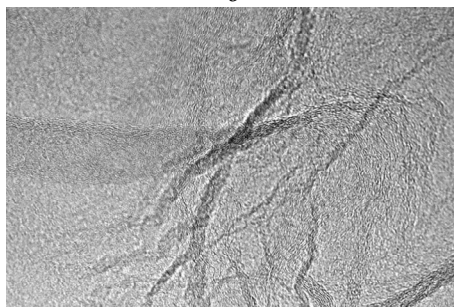
а



б



в



г

Рис. 3. SEM (*а*, *б*), ТЕМ (*в*, *г*) зображення продукту, отриманого після термічної обробки ОГ за температури 250 °С протягом 1 год.

На рис. 4 показано XPS-зображення зразка рОГ. XPS-тестування було проведено для визначення елементного складу та хімічного стану рОГ, а також для перевірки того, чи було зменшено вміст ОГ. Як показано на рис. 4, *a*, спектр C1s зразка складався з трьох піків. Пік енергії зв'язку за 284,6 В відповідає зв'язкам C–C і C=C, тоді як піки за 285,7 і 288,5 еВ відповідають зв'язкам C–C і C=O дефектної структури sp^3 , відповідно. Піки за 531,0 і 533,4 еВ у спектрі O1s (див. рис. 4, *б*) відповідають функціональним групам C=O і O=C–O відповідно. Ці результати вказують на те, що невелика кількість кисневмісних функціональних груп все ще існувала у зразку рОГ. XPS-аналіз показав, що вміст C, O та інших домішок у сировині ОГ становив 59,81, 37,02 та 3,17 % відповідно. Співвідношення вмісту C і O у зразку рОГ становило 86,08 і 13,92 % відповідно. Ці результати вказують на те, що після низькотемпературної реакції термічного відновлення більша частина ОГ була відновлена до графену. Цей результат узгоджується з результатами ТГ-ДСК на рис. 1.

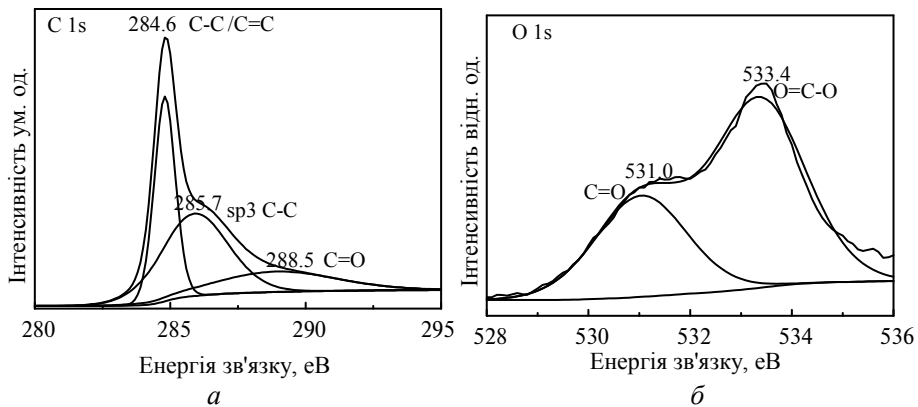


Рис. 4. C1s XPS (*a*) та O1s XPS (*б*) зображення продукту, отриманого після термічної обробки ОГ за температури 250 °C протягом 1 год.

Структурні властивості вуглецевих матеріалів, таких як графен, можна дослідити за допомогою раманівської спектроскопії. На рис. 5 показано спектри комбінаційного розсіювання (КР) ОГ і продукту після 1 год термообробки за температури 250 °C. Як показано на рис. 5, раманівські спектри ОГ і термообробленого продукту в основному складаються з піку *D* (1350 см^{-1} , невпорядкований гібридний вуглець sp^3) і піку *G* (1580 см^{-1} , впорядкований гібридний вуглець sp^2). Після визначення відношення інтенсивності *D*-піку до *G*-піку (I_D/I_G) кожного зразка, можна порівняти ступінь дефектності ОГ і термообробленого продукту. Відношення I_D/I_G для ОГ і термообробленого продукту становило 0,936 і 0,917 відповідно. Усунення кисневмісних функціональних груп на поверхні ОГ під час піролізу може призвести до структурних пошкоджень, хоча процес відновлення може відновити деякі sp^3 -мережі. Ці процеси мають конкурентні відносини, а термічна обробка виправляє структурні дефекти і може зменшити щільність графенових дефектів. Крім того, в спектрі комбінаційного розсіювання світла зразків з'явився слабкий 2*D*-пік, який є характерним піком графіту і графену. У порівнянні з вихідною сировиною, пік 2*D* термообробленого продукту мав червоний зсув (збільшення з 2699 до 2715 см^{-1}), що вказує на те, що термообробка ефективно зменшила вміст ОГ і поступово відновила sp^2 структуру на поверхні вуглецевого матеріалу. Поруч з 2*D*-піком за 2905 см^{-1} виявлено пік *D* + *G*, який є композитним піком піків *D* і *G*. Інтенсивність піку *D* + *G* значно зменшилася після термообробки.

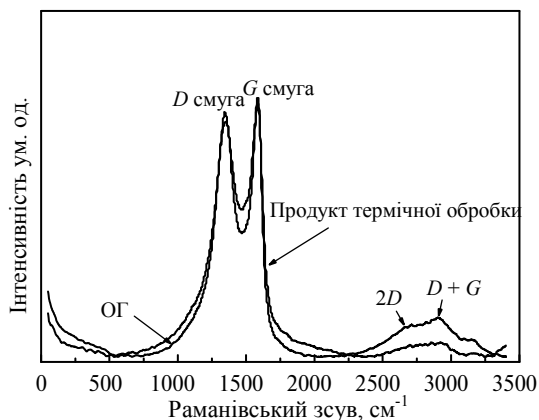


Рис. 5. Раманівський спектр ОГ та продукту, отриманого після термічної обробки ОГ за температури 250 °С протягом 1 год.

Дослідження низькотемпературного композита алмазу та графену

Спочатку було досліджено композит грубозернистих алмазів (200 мкм) з графеном. Чи може реакція термічного відновлення ОГ привести до утворення композита алмазу та графену, легко підтверджується візуальним спостереженням за поверхневим покриттям великих алмазних частинок. Більше того, одночасне спостереження за великими частинками алмазу та графену в композиті може слугувати орієнтиром для роботи композита з наноалмазів та графену.

Комбіноване дослідження крупнодисперсного алмазу (200 мкм) та графену. Рентгенограму підготовленого зразка (алмаз:графен = 6:1) показано на рис. 6, а, де видно, що основною фазою зразка був алмаз, його дифракційний пік був особливо великим, тому спостерігати дифракційний пік в області графену з малими кутами було неможливо. На рис. 6, б представлено рентгенограму зразка з інтенсивністю дифракційного піку, зменшеною до 1/50 від початкової. Видно, що характерний пік ОГ зникає за температури 11 °С, а слабкий і широкий дифракційні піки з'являються приблизно за температури 24 °С. Це свідчить про те, що ОГ був ефективно відновлений до графену.

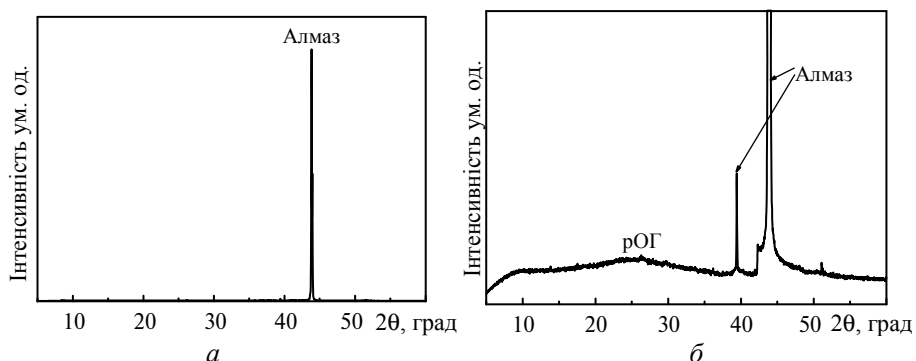


Рис. 6. XRD відокремлених алмазних частинок, отриманих після термічної обробки суміші ОГ та алмазного порошку за температури 250 °С протягом 1 год (а); зображення (б) збільшене в 50 разів порівняно із зображенням (а).

Макроскопічне зображення алмазних частинок сировини показано на рис. 7, а, де видно, що алмазні частинки виглядають напівпрозорими і світло-жовтими. Відокремлення алмазних частинок від термооброблених виробів

показано на рис. 6, видно, що алмазні частинки були темними і непрозорими. Це вказує на те, що поверхня алмазних частинок могла бути покрита графеном.

На рис. 7, в показано СЕМ-зображення алмазних частинок, які відокремилися після термообробки, видно, що розміри частинок на поверхні алмазних частинок варіювалися. Алмазні частинки були покриті численними частинками розміром від 50 до 60 нм, також було виявлено невелику кількість субмікронних частинок (див. рис. 7, з).

Наведені вище результати досліджень вказують на те, що реакція термічного відновлення ОГ може сприяти рекомбінації з великими частинками алмазу і формувати багато нанографенових частинок на поверхні алмазу. З результатів досліджень можна зробити висновок, що реакцію термічного відновлення можна використовувати для створення композитних структур із композитного графену з дрібними частинками алмазу.

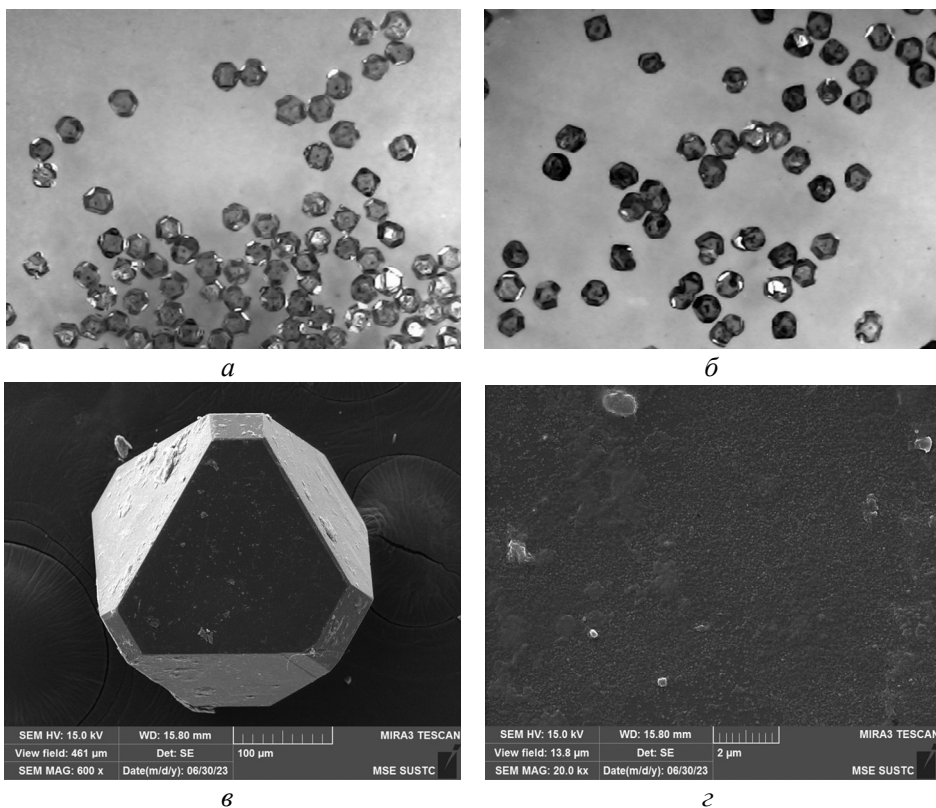


Рис. 7. Зображення, отримані з допомогою оптичного мікроскопа (а, б), СЕМ зображення (в, з) розділених частинок алмазу, отримані після термічної обробки суміші ОГ та алмазного порошку за температури 250 °С протягом 1 год.

Комбіноване дослідження дрібнозернистого алмазу і графену. Було досліджено алмазні порошки розміром 1 мкм і 20 нм як репрезентативні для вивчення впливу різних співвідношень сировини на фазовий склад продуктів.

Рентгенограму підготовленого зразка з розміром частинок алмазу 1 мкм показано на рис. 8, а, характерний пік ОГ (~ 11,0°) не спостерігали раніше в спектрах композитів. Це вказує на те, що ОГ зменшився в процесі підготовки матеріалу. Крім того, зразок мав широкий дифракційний пік поблизу 24°. Це свідчить про успішну підготовку графену. Зі збільшенням вмісту ОГ в сировині дифракційний пік рОГ поступово збільшується. На рис. 8, б показано

рентгенограму підготовленого зразка з розміром частинок алмазу 20 нм. Ця картина подібна до рис. 8, *a*.

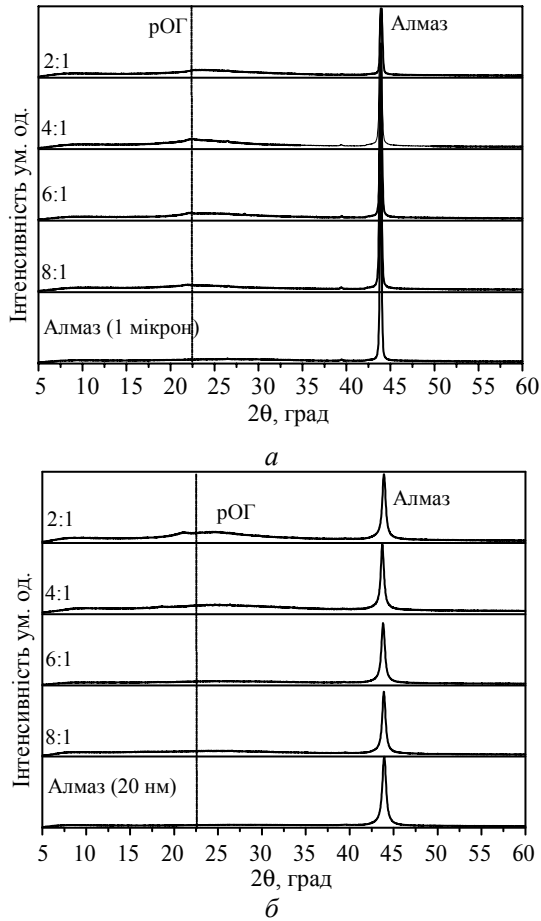


Рис. 8. Рентгенограми синтезованих зразків алмазу із розміром частинок 1 (*a*) мкм та 20 (*б*) нм.

На рис. 9 показано зображення просвічуючої електронної мікроскопії високої роздільної здатності (ПЕМВРЗ) підготовленого зразка. Молярне співвідношення алмазу до ОГ в сировині становило 6:1, а розмір частинок алмазу – 1 мкм, зразок складається з багатьох рівномірно розподілених дрібних алмазних частинок (див. рис. 9, *a*). Можна спостерігати, що частинки алмазу були загорнуті в 2–3 шари графену, якщо простежити зерна на рис. 9, *б*. Цей висновок підтверджує, що підготовлений композит алмаз/рОГ має квазіядерно-оболонкову структуру. ПЕМВРЗ-зображення (див. рис. 9, *в*, *г*) підготовлених зразків з розміром частинок 20 нм були подібні до зображень алмазів з розміром частинок 1 мкм. Отже, утворився композит алмаз/рОГ з квазіядерно-оболонковою структурою.

На рис. 10 показано ІЧ-спектр підготовленого зразка (алмаз:ОГ = 6:1) з розміром частинок 20 нм. Наноалмази можуть мати атоми Н, О та інші атоми, адсорбовані на поверхні через певні структурні дефекти та численні поверхневі зв'язки. Це явище призводить до наявності багатьох органічних активних груп на поверхні. ОГ мав велику кількість кисневмісних функціональних груп. Після термічної обробки пікова міцність кожної функціональної групи в композиті значно зменшилася або зникла. Цей результат вказує на те, що ОГ

був ефективно відновлений до графену під час приготування композиційного матеріалу. Більше того, гідроксильні групи на поверхні алмазу були усунені. Це свідчить про те, що алмаз і графен були ефективно з'єднані між собою.

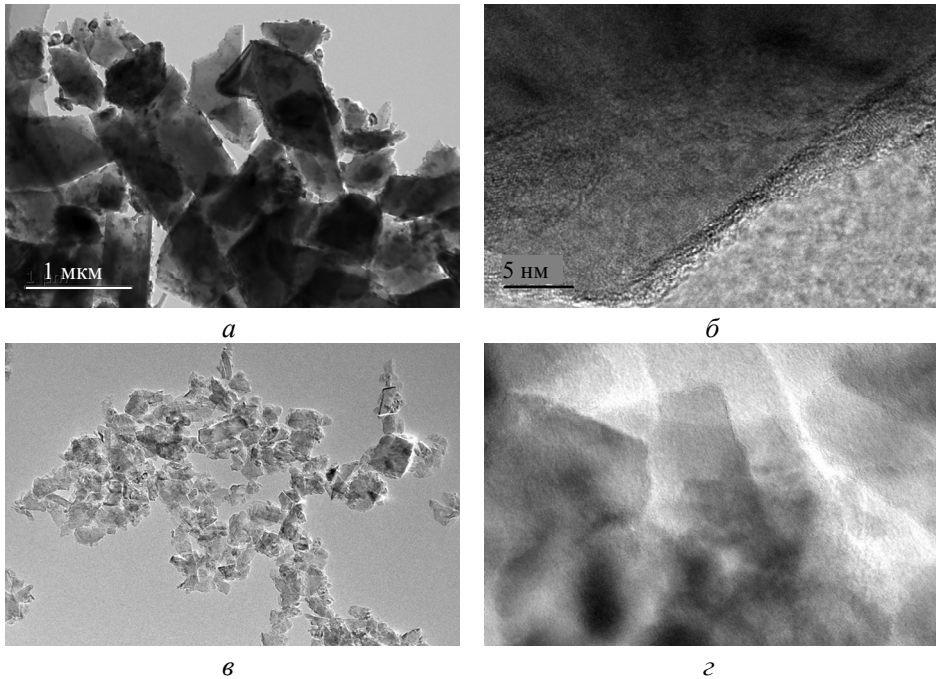


Рис. 9. ПЕМВРЗ-зображення зразка (алмаз:ОГ = 6:1) із розміром частинок алмазу 1 (а, б) мкм і 20 (в, з) нм.

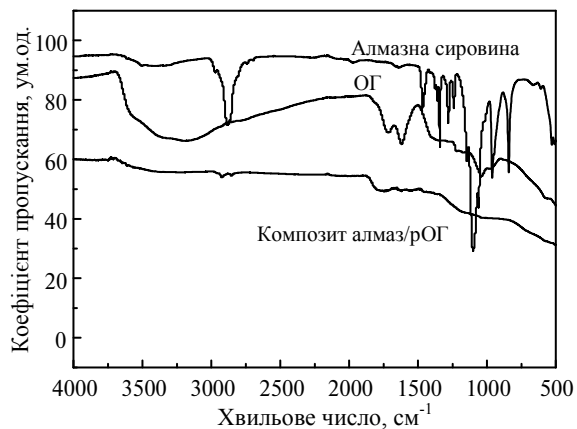


Рис. 10. ФПЧС-зображення зразка (мольне співвідношення алмаз:ОГ = 6:1) із розміром частинок алмазу 20 нм.

Наведені вище результати свідчать про те, що ключовим моментом цього дослідження було повне використання значної реакції відновлення ОГ за низьких температур (~ 200 °C). Крім того, структура ґратки графену була практично ідентичною структурі поверхні алмазу, що свідчить про хорошу сумісність. Зрештою, було досягнуто хорошого поєднання цих двох матеріалів. У цьому дослідженні алмазно-графеновий композит, зокрема наноалмазно-графеновий композитний матеріал, був створений за допомогою простої

низькотемпературної термічної обробки. Це досягнення значною мірою сприятиме його широкому застосуванню в галузі каталізу.

ВИСНОВКИ

Композит алмаз/відновлений ОГ було отримано з використанням наноалмазів і ОГ в якості сировини під час термічної обробки. За допомогою простих експериментів з термообробки було досягнуто хороше з'єднання між поверхнею алмазних частинок і графеном. Для отримання композитів наноалмаз/графен використовували простий метод відпалу. Процес є простим і може мати в майбутньому прикладне використання в галузі виробництва.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку Ключовому плану науково-дослідних проєктів коледжів та університетів провінції Хенань (22A430041, 21A460036, 23A430026), Спеціальним фондам для фінансування фундаментальних наукових досліджень Чжунюаньського технологічного університету (K2022YY006), Провідній інноваційній команді Чженчжоу та Хенаньській інноваційній технологічній команді з технології алмазного покриття та надтвердих композитних матеріалів (СХТД 2013048), Студентському інноваційному та підприємницькому проєкту Чжунюаньського технологічного університету (202210465105), Програмі для інноваційної дослідницької команди (в галузі науки і технологій) в університеті провінції Хенань (23IRTSTHN019).

КОНКУРУЮЧІ ІНТЕРЕСИ

Автори не мають жодних фінансових чи нефінансових інтересів, про які слід було б повідомити.

Danhui Han¹, Junlong Liu¹, Chong Peng¹, Baoyan Liang²

¹State Key Laboratory for High Performance Tools,
Zhengzhou Research Institute for Abrasives & Grinding Co.,
Ltd, Zhengzhou, P.R. China

²Materials and Chemical Engineering School,
Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, P.R. China
Construction of diamond/graphene composite structure
via a low-temperature heat treatment

A diamond/graphene composite structure can be obtained using graphene oxide (GO) to undergo a significant thermal reduction reaction at approximately 200 °C. The prepared composites were characterized via X-ray diffraction, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy. The effects of different particle sizes and diamond contents on the products' phase composition and microstructure were studied. Results indicate that GO underwent a significant thermal reduction reaction at approximately 200 °C. Most GO materials were reduced to graphene. They underwent expansion and were peeled off into an organ-like shape. A graphene coating was formed on the surface of diamond particles via a simple heat treatment from the mixtures of diamond and GO powders. The coating effect of large diamond particles was poor because of their high inertness. A quasi core-shell structure of diamond/graphene composite structure can be obtained using fine-grained diamonds.

Keywords: thermal reduction, grapheme, diamond, composite.

1. Danilenko V.V. Nanodiamonds: Problems and prospects. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32. P. 301–310.

2. 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.
3. Xu J.R., Chow E.K. Biomedical applications of nanodiamonds: From drug-delivery to diagnostics. *SLAS. Tech.* 2023. Vol. 28, no. 4. P. 214–222.
4. Ivanov M., Shendprova O. Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils. *Curr. Opin. Solid State Mater.* 2017. Vol. 21, no. 1. P. 17–24.
5. Molavi H., Mirzaei K., Jafarpour E., Mohammadi A., Salimi M.S., Rezakazemi M., Nadagouda M.M., Aminabhavi T.M. Wastewater treatment using nanodiamond and related materials. *J. Environ. Manag.* 2024. Vol. 349, art. 119349.
6. Zhang J., Wang R., Shu D.S. Research progress on metal-free catalysis by nanodiamond. *China. Sci. Chem.* 2012. Vol. 42, no. 4. P. 406–414.
7. Zhang Y.H., Rhee K.Y., Hui D., Park S.J. A critical review of nanodiamond based nanocomposites: Synthesis, properties and applications. *Compos. B Eng.* 2018. Vol. 143. P. 19–27.
8. Guillevic M., Pichot V., Fioux P., Schnell F., Spitzer D. Nanodiamond-based energetic core-shell composites: The route towards safer materials. *Diam. Relat. Mater.* 2019. Vol. 93. P. 150–158.
9. Pastrana-Martínez L.M., Morales-Torres S., Carabineiro S.A.C., Buijnsters J.G., Figueiredo J.L., Silva A.M.T., Faria J.L. Photocatalytic activity of functionalized nanodiamond-TiO₂ composites towards water pollutants degradation under UV/Vis irradiation. *Appl. Surf. Sci.* 2018. Vol. 458. P. 839–848.
10. Samaneh S.K., Mahnoosh M., Akbar S. Tire tread performance of silica-filled SBR/BR rubber composites incorporated with nanodiamond and nanodiamond/nano-SiO₂ hybrid nanoparticle. *Diam. Relat. Mater.* 2022. Vol. 126, art. 109068.
11. Li Z., Wang Y., Ma M., Ma H., Hu W., Zhang X., Zhuge Z., Zhang S., Luo K., Gao Y., Sun L., Soldatov A.V., Wu Y., Liu B., Li B., Ying P., Zhang Y., Xu B., He J., Yu D., Liu Z., Zhao Z., Yue Y., Tian Y., Li X. Ultrastrong conductive in situ composite composed of nanodiamond incoherently embedded in disordered multilayer grapheme. *Nature Mater.* 2023. Vol. 22. P. 42–49.
12. 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.
13. Liang B., Zhang L., Wang W., Xu G., Zhang W., Zhang Y., Zhang R., Yang L., Zhang L. Nanodiamond core/onion-like carbon shell materials with excellent visible light photocatalytic activity. *Mater. Res. Exp.* 2019. Vol. 6, no.4, art. 45609.
14. Hansora D.P., Shimpi N.G., Mishra S. Graphite to graphene via graphene oxide: An overview on synthesis, properties, and applications. *JOM*. 2015. Vol. 67, no.12. P. 2855–2868.

Надійшла до редакції 30.11.23

Після доопрацювання 28.01.24

Прийнята до опублікування 05.02.24