

УДК 546.26+546.56+546.72-121

**Ю. А. Шафорост, Р. Л. Галаган, О. А. Жабковська, О. С. Погребняк,
О. П. Шевченко, В. В. Смалиус**

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
ННІ природничих та аграрних наук, кафедра хімії та наноматеріалознавства,
бул. Шевченка, 81, м. Черкаси, 18031, Україна; e-mail: zdoryulia@ukr.net

СИНТЕЗ БІМЕТАЛКАРБОНОВОГО НАНОКОМПОЗИТУ NiAg@C З ВИКОРИСТАННЯМ ГІДРОЗОЛЮ СРІБЛА

Синтезовано наноккомпозит NiAg@C шляхом піролізу осаду, утвореного при взаємодії гідрозолу срібла з іонами нікелю у присутності рутину. Композит охарактеризовано методами рентгенофазового, спектрального аналізів, визначено електропровідність, магнітні властивості. Виявлено наявність аморфного вуглецю як матриці наноккомпозиту. Вперше синтезовано біметалкарбонівий наноккомпозит шляхом взаємодії готового гідрозолу наночастинок срібла стабілізованих органічною сполукою з іонами Ni^{2+} з наступним піролізом одержаного осаду.

Ключові слова: біметалкарбоніві наноккомпозити, NiAg@C, піроліз, електропровідність, каталізатори.

ВСТУП

Метал- і біметалкарбоніві наноккомпозити знаходять широке застосування в каталізі органічного синтезу, протирадарному захисті військової техніки, створенні електродів паливних елементів та інших галузях. Актуальність розширення номенклатури таких наноккомпозитів з новими електричними, магнітними та механічними властивостями підтверджується постійним зростанням кількості наукових публікацій у галузі хімічного матеріалознавства.

Існує низка методів синтезу таких композитів: електродуговий плазмовий синтез, піроліз металкарбонівих сполук, хімічне осадження з газової фази тощо [1, 2]. Кристалічні форми карбону, що формуються за участю металів VIII групи побічної підгрупи (Fe, Co, Ni), представлені графеном, нанотрубками, фулереноподібними структурами або карбонівими волокнами. Для металів I групи побічної підгрупи (Cu, Ag, Au) характерніше утворення аморфної карбонівової матриці. Зазвичай під час піролізу металкарбонівих сполук використовуються солі органічних кислот або комплексні сполуки катіонів з органічними лігандами, наприклад, ацетилацетонатні комплекси. Особливістю проведеного нами синтезу було те, що метал I групи з самого початку був у вигляді наночастинок взятих у формі гідрозолу одержаного хімічним відновлення іонів Ag^+ природнім флавоноїдом рутинном.

Аналіз літературних джерел свідчить, що композити з наночастинками перехідних металів (зокрема нікелю) у поєднанні з елементами I групи (наприклад, сріблом) активно досліджуються завдяки їх універсальним властивостям [3–5]. Проте, у науковій літературі практично відсутні відомості про синтез наноккомпозитів NiAg@C з використанням готового гідрозолу наночастинок срібла. Саме

тому, нами вперше запропонований такий підхід для синтезу біметалкарбонових нанокompозитів.

Металкарбонові композити широко використовуються як каталізатори в органічному синтезі [6], в екотехнологіях [3–5], у тому числі для очищення стічних вод від токсичних сполук, таких як 4-нітрофенол, 2-нітроанілін, родамін В, метиленовий синій тощо [4]. Біметалкарбонові нанокompозити також знаходять застосування в електрохімічному добуванні водню [7], у паливних елементах, суперконденсаторах, як матеріали з великою питомою поверхнею, у клінічній хімії для виявлення метаболітів (наприклад, глюкози) [8], та в медицині завдяки бактерицидним властивостям срібла [9]. У контексті розвитку «зелених» підходів до синтезу наноматеріалів перспективним є використання біоорганічних відновників. Зокрема, продемонстровано ефективність застосування ваніліну як одночасно відновника і стабілізатора у процесі одержання наночастинок золота [10].

Окрема сфера практичного застосування МКНК – військова промисловість. В розвинених країнах світу (США, ЄС, Китай та ін.) ведуться активні дослідження з удосконалення стелс-технологій, суть яких полягає у зменшенні видимості об'єктів у радіолокаційному та інфрачервоному діапазонах. Основними компонентами таких технологій є спеціальна геометрія об'єкта і матеріали з нанокompозитними покриттями, що поглинають радіохвилі. Такі покриття використовуються не лише в авіа- та суднобудуванні, але й для наземної техніки. Зокрема, в Україні до таких зразків можна віднести катери «Гюрза-М» і «Кентавр» ВМС ЗСУ.

З огляду на актуальність досліджень нанокompозитів, що містять метали перехідної та І групи, метою цієї роботи є синтез нанокompозиту NiAg@C з використанням готового гідрозолу наночастинок срібла та вивчення його фізико-хімічних властивостей. Для досягнення мети було реалізовано наступні етапи: введення іонів нікелю до складу гідрозолу наночастинок срібла, осадження нікель-срібного осаду, піроліз утвореного продукту в атмосфері водню, а також дослідження структури і фазового складу отриманого композиту методами рентгеноспектрального та дифрактометричного аналізу.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для виконання роботи використовували наступні методи: препаративний синтез нікельсрібної системи з гідрозолу наночастинок срібла; піролітичний розклад нікельсрібної системи в атмосфері водню; визначення середнього розміру наночастинок за методом Шерера; виявлення нікелю у продукті рентгеноспектральним аналізом.

Гідрозоль наночастинок срібла з масовою концентрацією срібла 26,8 г/дм³, синтезований за методикою, викладеною у [11, 12]. Для цього наважку рутину 61,0 мг (0,1 ммоль) вносили до конічної колби місткістю 150 см³, додавали 34,0 см³ дистильованої води і 3,3 см³ розчину NaOH з концентрацією 1,0 моль/дм³. Вміст колби нагрівали на водяній бані до температури $\approx 40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$. До нагрітого розчину при перемішуванні додавали 12,5 см³ розчину AgNO₃ з $c(\text{Ag}^+) = 0,2\text{ моль/дм}^3$ і залишали у спокої на 24 години.

В ході приготування вихідного продукту – осаджених іонами Ni²⁺ наночастинок срібла для відділення осаду від маточного розчину було використано від-

смоктування рідини за допомогою перистальтичного насосу, редиспергування осаду у 500 мл дистильованої води і його повторне осадження на центрифугі при 3000 об/хв.

Піроліз нікельвмісного осаду здійснювали в трубчатій електропечі СУОЛ-0.4/12.5 при постійному пропусканні водню у робочий простір. Піч забезпечує максимальну робочу температуру 1200 °С та точність підтримання температури ± 1 °С. Газоподібний водень для створення відновної атмосфери у робочій камері добували шляхом електролізу 20% розчину NaOH з залізними електродами.

Протокол синтезу NiAg@C. У хімічному стакані до 80 см³ гідрозолу наночастинок срібла з масовою концентрацією 26,8 г/дм³ додавали при інтенсивному перемішуванні 20 см³ 1 М розчину Ni(NO₃)₂. Суспензію, що утворилася (Ni-коагулят AgNP), залишали у спокої на кілька хвилин щоб по кольору верхнього шару переконатися, що осаджувач додано в надлишку і залишали для відстоювання протягом доби. Далі проводили декантацію маточного розчину шляхом обережного відсмоктування рідини за допомогою перистальтичного насосу. Осад редиспергували в 400 см³ дистильованої води і центрифугували при 3000 об/хв протягом 10 хвилин. З центрифужної посудини осад вимивали у чашку Петрі, використовуючи 50–80 см³ води і ставили на випаровування в сушильну шафу.

Сухий осад у вигляді чорно-зелених лусочок, що мав металічний блиск переміщували у керамічний тигель-човник та розміщували у кварцовій трубі нагрівальної камери печі СУОЛ. Після герметизації труби через неї починали пропускати водень контролюючи його чистоту після пропускання кожних 200 см³ газу. Після повного витіснення повітря з робочого простору вмикали нагрівання печі і задавали бажану температуру. Зразок знаходився при заданій температурі 30 хв, після чого нагрівання вимикали і зразок охолоджувався до кімнатної температури при постійному потоці водню через робочу камеру.

Одержаний нанокompозит було охарактеризовано методами рентгенівської дифракції та рентгеноспектрального аналізу. Дифрактограми знімали на дифрактометрі ДРОН-3 з використанням характеристичного випромінювання FeK α з $\lambda = 1,934$ Å.

Спектри рентгенівської флуоресценції одержували на приладі з енергодисперсійним детектором в діапазоні енергії від 2 до 10 кеВ. Реєстрація і обробка спектрів здійснювалась з використанням програмного забезпечення ElvaX. Також було проведено тести на електропровідність та магнітні властивості порошку нанокompозиту та проведено якісне виявлення аморфного карбону після розчинення металів у нітратній кислоті.

Одержані дифрактограми нанокompозитів не містять рефлексів пов'язаних з тою чи іншою кристалічною формою Карбону. Тому, можна зробити висновок, що Карбон, який на початку входив до складу продуктів окиснення рутину при піролізі утворив аморфну речовину, яка тонким шаром розділяє окремі металічні частинки. Наявність аморфного Карбону можна зафіксувати після розчинення металічних частинок у концентрованій нітратній кислоті при кип'ятінні з наступним охолодженням до кімнатної температури. Для повного видалення металу цю операцію повторювали тричі.

Чорну суспензію, що утворилась, виливали у стакан з водою, нагрівали до кипіння, декантували воду і знову заливали свіжу. Цю процедуру повторювали двічі, щоб добре промити порошок від кислоти. Далі порошок переносили до чашки Петрі і висушували при температурі 100 °С. Сухий порошок перевіряли на електропровідність.

Середній розмір металевих частинок у нанокompозиті визначали за допомогою методу Шерера, розраховуючи ширину дифракційних піків на половині їх висоти.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вихідний гідрозоль, синтезований співробітниками кафедри хімії та наноматеріалознавства, містив приблизно 20 г/дм³ срібла. Для точного визначення вмісту срібла було застосовано потенціометричне титрування.

До аликвоти гідрозолу срібла об'ємом 5,0 см³ у високому стакані додали 100 мг калій нітрату та 5 см³ концентрованої нітратної кислоти. Цю суміш нагрівали до кипіння. Після випаровування рідини осад прожарювали до сухих солей та почорніння. Знявши з плитки, охолоджували і додавали ще 5 см³ нітратної кислоти і знову гріли, випарюючи до мокрих солей. Після охолодження додавали воду, для розчинення солей, щоб переконатися у відсутності каламуті, яка є ознакою неповного окиснення органічних речовин присутніх у вихідному гідрозолі.

У разі присутності каламуті операцію повторювали декілька разів до зникнення органічних речовин. Після цього у стакан додавали воду, змиваючи зі стінок всі залишки та доводили об'єм розчину до 150 см³.

Наступний етап – власне титрування. У розчин клали магніт мішалки, вмикали мілівольтметр рН-150 в режимі вимірювання потенціалу, до якого були під'єднані електроди, занурені у розчин, що титрується. Робочий електрод – це відрізок срібної дротинки, а електрод порівняння – хлоридсрібний, який був з'єднаний з титрованим розчином за допомогою сольового містка концентрованим розчином калій нітратом. Робочий розчин 0,1000 моль/дм³ калій хлорид додавали порціями по 0,50 см³ вимірюючи при цьому різницю потенціалу.

Обробку даних здійснювали в Excel і MathCAD. Первинні результати відображено графічно (рис. 1, а), а чисельне диференціювання (dE/dn) проведено для визначення кількості срібла в зразку за максимумом на диференціальній кривій (рис. 1, б).

До 80 см³ гідрозолу срібла, попередньо розбавленого дистильованою водою до об'єму 400 см³, додавали при перемішуванні 20 см³ 1 М розчину нікель(II) нітрату. При цьому утворювався темно-коричневий осад (Ni-коагулят наночастинок), який повільно осідав протягом доби. Зв'язок іонів нікелю з поверхнею носить іонний характер. В таких гідрозолях поверхня частинок вкрита захисною оболонкою, яка складається з продуктів окиснення органічного відновника, рутину. Ці продукти містять дисоційовані гідроксо- та карбоксигрупи з якими зв'язуються катіони Ni²⁺.

Через добу проводили відділення коагуляту від маточного розчину і промивання осаду. Такий підхід до синтезу біметалкарбонових нанокompозитів є новим і дозволяє рівномірно розподілити іони осаджувача по поверхні срібних наночастинок.

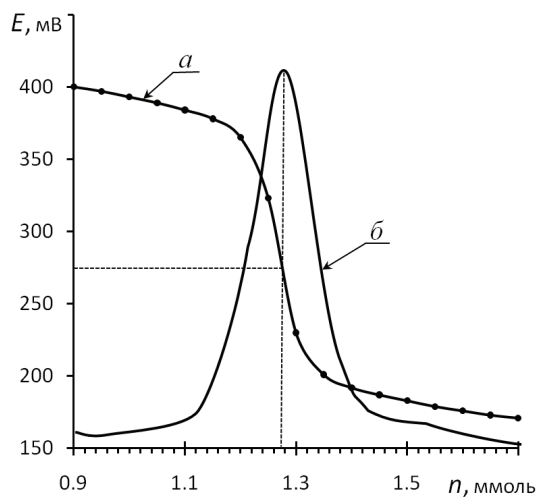


Рис. 1. Крива потенціометричного титрування (а) та диференціальна залежність (б).

Fig.1. Potentiometric titration curve (a) and differential dependence (b).

Осад із центрифужних посудин переносили у чашку Петрі і висушували при температурі 105 °С. Далі проводили піроліз висушеного осаду.

Робота з електропіччю здійснювалась згідно з технічною інструкцією з безпечної експлуатації [13]. Після подачі напруги вмикали температурний регулятор і встановлювали заданий температурний режим за допомогою панелі керування. Час витримки зразка при номінальній температурі становив 30 хвилин. По завершенні процесу піч переводили в режим охолодження, підтримуючи постійний потік водню до зниження температури нижче 100 °С. Лише після цього припиняли подачу газу.

Піроліз Ni-коагуляту наночастинок срібла проводили при 600 °С, 700 °С і 800 °С у атмосфері чистого водню (рис. 2, 3, 4). Кожен зразок (маса 0,5 г) витримували при відповідній температурі протягом 30 хвилин, охолодження здійснювали також у потоці водню.

Для рентгенодифрактометричного аналізу порошок наносили на скляну пластинку з допомогою полівінілацетатної емульсії як зв'язувального компонента. Дифрактограми записували на приладі ДРОН-3 з фокусуванням за Бреггом-Брентано, використовуючи характеристичне випромінювання FeK α ($\lambda = 0,1394$ нм).

Отримані дифрактограми зразків після піролізу використовували для ідентифікації типу кристалічної ґратки та розрахунку середнього розміру наночастинок методом Шерера.

Результати дифрактометричних (XRD) вимірювань наведені в таблиці.

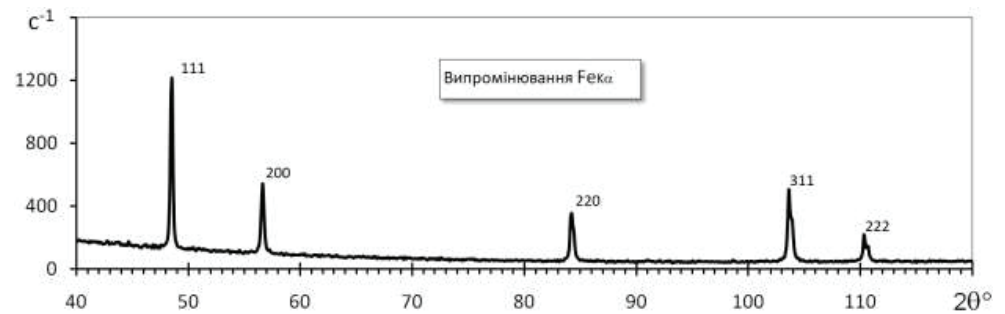


Рис. 2. Дифрактограма нанокompозиту, одержаного при 600 °C.

Fig. 2. Diffractogram of a nanocomposite obtained at 600 °C.

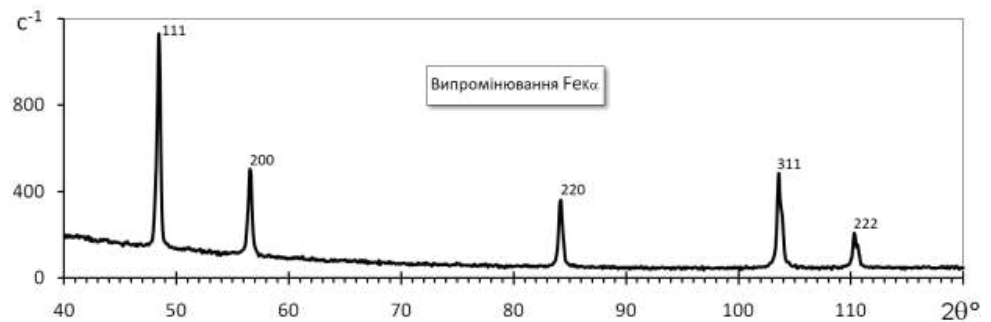


Рис. 3. Дифрактограма нанокompозиту, одержаного при 700 °C.

Fig. 3. Diffractogram of a nanocomposite obtained at 700 °C.

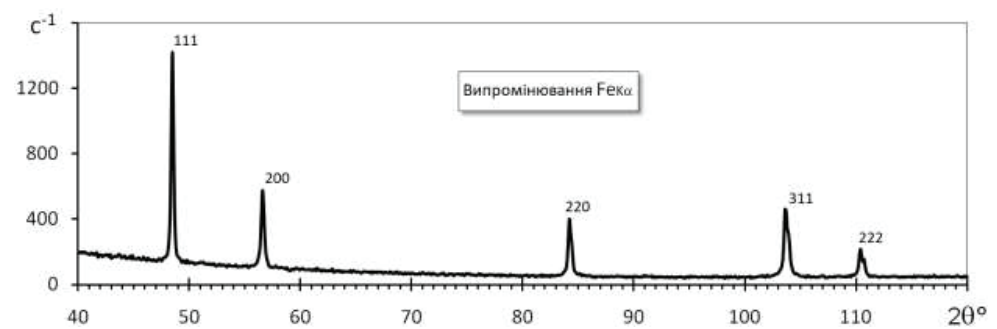


Рис. 4. Дифрактограма нанокompозиту, одержаного при 800 °C.

Fig. 4. Diffractogram of a nanocomposite obtained at 800 °C.

Дані XRD вимірювань для Ni-коагуляту AgNP та нанокompозитів

Таблиця

Table

Ni-coagulum AgNP and nanocomposites XRD data

Температура піролізу, °C	Кут падіння променя (2θ °max)	Напівширина піка (β _{1/2} , °)	Діаметр частинок, нм
20 (коагулят)	48,46	0,45	27,0
600	48,34	0,32	35,8
700	48,45	0,25	48,5
800	48,50	0,26	46,8

Середній розмір металічних частинок у нанокompозиті визначали за дифрактограмою по ширині дифракційних піків на половині їх висоти. Використовували формулу Шерера:

$$D = \frac{\lambda}{\beta_{1/2} \cdot \cos\theta}$$

де: D – середній діаметр наночастинок, нм; λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, нм; $\beta_{1/2}$ – напівширина дифракційного піка, рад; θ – кут падіння променя на зразок у точці максимуму піка, рад. Як бачимо з таблиці розмір частинок зростає з підвищенням температури.

Для встановлення елементного складу одержаних нанокompозитів були одержані спектри рентгенівської флуоресценції зразків композитів та Ni-коагуляту AgNP.

Спектри одержували на РФЛ спектрометрі з енергодиспесійним детектором, а їх візуалізація і обробка проводились у програмному забезпеченні ElvaX. Викристовувались ті ж самі зразки, що і для дифрактометрії.

На рис. 5 наведено РФЛ спектр нанокompозиту одержаного за температури 800 °C і Ni-коагуляту AgNP, які показують, що кількісне співвідношення між елементами залишилося незмінним. Інші спектри, включаючи спектр коагуляту, виявилися очікувано подібними між собою наведеному спектру на рис. 5.

Проведені дослідження показали, що середній розмір металічних наночастинок збільшується при підвищенні температури піролізу. Це може бути наслідком плавлення найдрібніших НЧ, які відповідають лівому хвосту розмірного розподілу. У ході міграції, яка полегшується внаслідок газовиділення у ході реакції, ці частинки контактують з НЧ більшого розміру і їх атоми вбудовуються в гранично-центрировану кубічну ґратку більшої частинки.

На дифрактограмах всіх трьох нанокompозитів ми бачимо лише одну систему рефлексів від ГЦК ґратки при кутах, які відповідають фазі металічного срібла. Оскільки у вихідному Ni-коагуляті AgNP атомне відношення Ag/Ni дуже велике, то фаза металічного нікелю не може сформуватись у вигляді кристалічної структури. Наночастинки нікелю не сформувались достатнього розміру, щоб утворилась кристалічна структура, тому піки нікелю на дифрактограмах відсутні.

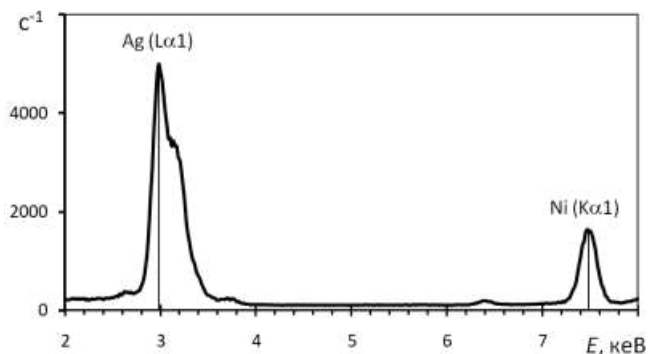


Рис. 5. Спектр рентгенівської флуоресценції нанокompозиту одержаного за температури 800 °С.

Fig. 5. Spectrum of X-ray fluorescence of nanocomposite obtained at a temperature of 800 °C.

Використаний рентгенівський спектрометр не надавав можливості виявити легкі атоми, такі як Оксиген чи Карбон, тому по Карбону було проведено окреме дослідження. Воно полягало у розчиненні металів Ni та Ag, які складають основу композиту, у концентрованій нітратній кислоті. Можна стверджувати, що карбоновий матеріал, який розділяє металічні наночастинки у композитах перебуває в аморфному стані, оскільки на дифрактограмах піки від будь-яких кристалічних форм C відсутні.

Структура аморфного карбону містить атоми C в усіх можливих станах гібридизації (sp^3 , sp^2 , sp^1). Саме цією обставиною пояснюється той факт, що більшість його аморфних модифікацій мають досить високу електропровідність.

Нами також проведено тест на електропровідність, який підтвердив наявність цієї властивості у карбонового матеріалу, виділеного з синтезованих нанокompозитів.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень методом піролізу у відновлювальній атмосфері отримано нанокompозит NiAg@C на основі гідрозолі наночастинок срібла з початковим середнім діаметром частинок близько 27 нм. Осадження наночастинок із гідрозолі здійснювалося за участі іонів Ni^{2+} , що спричиняло коагуляцію. За результатами досліджень авторами встановлено, що зі зростанням температури піролізу від 600 °С до 800 °С розмір наночастинок металічної фази збільшується від 36 до 47 нм, що підтверджено методом рентгенівської дифракції. Водночас, кристалічні фази нікелю у діапазоні досліджуваних температур не виявлено. Рентгенодифрактометричний аналіз також не зафіксував кристалічних форм Карбону, проте після кислотної обробки зразків з них був виділений аморфний вуглецевий компонент.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Литвин В. А. Гібридні функціональні металовмісні нанокompозити на основі гумінових речовин: монографія. – Черкаси: Видав. Чабаненко Ю. А., 2021. – 284 с.
2. Литвин В. А. Перспективи використання синтетичних гумінових речовин та наноматеріалів на їх основі. – Черкаси: Видав. Кристаль І. Л., 2022. – 189 с.
3. Gopiraman M., Kim I. S. Carbon Nanocomposites: Preparation and Its Application in Catalytic Organic Transformations // In: Nanocomposites. Ed. S. Sivasankaran. – 2018. – Chapter 2. – P. 17–43. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81109>
4. Sachi R., Singh A. P., Thirumal M. Fabrication of AgNi Nano-alloy-Decorated ZnO Nanocomposites as an Efficient and Novel Hybrid Catalyst to Degrade Organic Pollutants // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6. – P. 34771–34782.
5. Wojtaszek K., Cebula F., Rutkowski B. Synthesis and Catalytic Study of NiAg Bimetallic Core-Shell Nanoparticles // Mater. – 2023. – Vol. 16. – P. 659–675. <https://doi.org/10.3390/ma16020659>
6. Wang Q. X., Yuan M. T., Shen H. Y., Zhang H. Y. Fabrication of polyaniline-supported bimetal AgNi nanoparticles and the enhanced performance towards formate oxidation // Sol. St. Electrochem. – 2021. – Vol. 25. – P. 1197–1205.
7. Chen D., Han C., Sun Q., Ding J. Bimetallic AgNi nanoparticles anchored onto MOF-derived nitrogen-doped carbon nanostrips for efficient hydrogen evolution // Green Energy Environ. – 2021. – P. 134–142.
8. Akbar F., Tariq M., Khan H. U., Khan J., Uddin M. K., Ahmed S. S., Rahim A. Development of Ag–Ni NPs loaded on MWCNTs for highly sensitive, selective and reproducible nonenzymatic electrochemical detection of glucose // J. Mater. Sci. – 2021. – Vol. 32. – P. 16166–16181. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06164-2>
9. Kichukova D., Spassova I., Kostadinova A., Staneva A., Kovacheva D. Facile Synthesis Cu–RGO and Ag–RGO Nanocomposites with Potential Biomedical Applications // Nanomater. – 2022. – Vol. 12. – P. 2096–2112. <https://doi.org/10.3390/nano12122096>
10. Литвин В. А., Галаган Р. Л., Романенко Е. О., Шафорост Ю. А., Лут О. А. Одержання наночастинок золота з використанням ваніліну // Укр. журн. природн. наук. – 2024. – № 8. – С. 140–147. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.15>
11. Пат. 94989 Україна, МПК6 C08G 8/00. Спосіб одержання синтетичних гумінових кислот та їх застосування у синтезі наночастинок срібла / Р. Л. Галаган, В. А. Литвин. – Заявл. 11.05.2010; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
12. Пат. 80074 Україна, МПК6 A61K 33/38, A61K 31/765. Спосіб отримання колоїдного розчину металічного срібла, стабілізованого синтетичними фульватами / Р. Л. Галаган, В. А. Литвин. – Заявл. 10.08.2007; Опубл. 25.05.2007, Бюл. № 7.
13. TermoLab®. Електропіч СУОЛ-0.4/12.5: паспорт та інструкція з використання. – Бориспіль: TermoLab, 2021.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2025

**Yu. A. Shaforost, R. L. Galagan, O. A. Zabkovska, O. S. Pogrebnyak,
O. P. Shevchenko, V. V. Smalyus**

Bohdan Khmelnytskyi National University of Cherkasy,
Institute of Natural and Agrarian Sciences, Department of Chemistry and Nanomaterials,
81 Shevchenko Blvd, Cherkasy, 18031, Ukraine; e-mail: zdoryulia@ukr.net

SYNTHESIS OF BIMETALLIC CARBON NANOCOMPOSITE NiAg@C USING SILVER HYDROSOL

The article details the successful synthesis of a bimetal-carbon nanocomposite named NiAg@C, achieved through the pyrolysis of a precipitate formed by the interaction of a silver hydrosol with nickel ions in the presence of rutin. The research includes comprehensive spectral and X-ray phase analyses and evaluations of the composite's electrical and magnetic properties, which are crucial for its functionality in advanced technological systems.

Amorphous carbon within the composite was confirmed, serving as a matrix for embedding metal particles. This characteristic structure is integral to the composite's potential in diverse applications such as catalysis, electrode engineering, analytical chemistry, materials science, and defense technologies, promising breakthroughs in various high-tech sectors

and sustainable solutions. The interdisciplinary nature of these applications highlights the material's versatility and broad utility. The synthesis process utilized involves innovative methods like pyrolysis and chemical precipitation. These techniques facilitate the development of composites hosting metallic nanoparticles with enhanced electrical and magnetic properties. Rutin, a natural flavonoid, is a key component in this process, acting dually as a reducing and stabilizing agent for silver nanoparticles, while also providing an additional carbon source within the nanocomposite. In practical terms, the produced material exhibits remarkable physicochemical properties. The amorphous carbon contributes to high surface activity and resilience against aggressive environments, making the composite suitable for demanding operational contexts, where stability and performance under extreme conditions are paramount.

Furthermore, its adaptability extends to eco-friendly water purification technologies, where its resilience and reactivity are advantageous. This broad spectrum of potential applications underscores the composite's significance in industrial and scientific domains, particularly where innovative solutions to complex challenges are required.

Keywords: bimetallic carbon nanocomposites, NiAg@C, pyrolysis, electrical conductivity, catalysts.

REFERENCES

1. Lytvyn V.A. *Hibridni funktsionalni metalovmisni nanokompozyty na osnovi huminovykh rechovyn* [Hybrid functional metal-containing nanocomposites based on humic substances]. Cherkasy, Chabanenko Yu.A. Publ., 2021. 284 p. (in Ukrainian)
2. Lytvyn V.A. *Perspektyvy vykorystannia syntetychnykh huminovykh rechovyn ta nanomaterialiv na yikh osnovi* [Prospects for the use of synthetic humic substances and nanomaterials based on them]. Cherkasy, Kristal I.L. Publ., 2022. 189 p. (in Ukrainian)
3. Gopiraman M., Kim I.S. *Carbon nanocomposites: preparation and its application in catalytic organic transformations*. In: Nanocomposites. Ed. S. Sivasankaran. 2018, Chapter 2, pp. 17–43. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81109>
4. Sachi R., Singh A.P., Thirumal M. *Fabrication of AgNi nano-alloy-decorated ZnO nanocomposites as an efficient and novel hybrid catalyst to degrade organic pollutants*. ACS Omega, 2021, vol. 6, pp. 34771–34782. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05086>
5. Wojtaszek K., Cebula F., Rutkowski B. *Synthesis and catalytic study of NiAg bimetallic core-shell nanoparticles*. Mater., 2023, vol. 16, pp. 659–675. <https://doi.org/10.3390/ma16020659>
6. Wang Q.X., Yuan M.T., Shen H.Y., Zhang H.Y. *Fabrication of polyaniline-supported bimetal AgNi nanoparticles and the enhanced performance towards formate oxidation*. Sol. St. Electrochem., 2021, vol. 25, pp. 1197–1205. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04874-4>
7. Chen D., Han C., Sun Q., Ding J. *Bimetallic AgNi nanoparticles anchored onto MOF-derived nitrogen-doped carbon nanostrips for efficient hydrogen evolution*. Green Energy Environ., 2021, pp. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2021.01.008>
8. Akbar F., Tariq M., Khan H.U., Khan J., Uddin M.K., Ahmed S.S., Rahim A. *Development of Ag–Ni NPs loaded on MWCNTs for highly sensitive, selective and reproducible nonenzymatic electrochemical detection of glucose*. J. Mater. Sci., 2021, vol. 32, pp. 16166–16181. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06164-2>
9. Kichukova D., Spassova I., Kostadinova A., Staneva A., Kovacheva D. *Facile synthesis Cu–RGO and Ag–RGO nanocomposites with potential biomedical applications*. Nanomater., 2022, vol. 12, pp. 2096–2112. <https://doi.org/10.3390/nano12122096>
10. Lytvyn V.A., Halahan R.L., Romanenko E.O., Shaforost Yu.A., Lut O.A. *Oderzhannia nanochastynok zolota z vykorystanniam vanilinu* [Synthesis of gold nanoparticles using vanillin]. Ukr. zhurn. pryrodn. nauk – Ukrainian Journal of Natural Sciences, 2024, no 8, pp. 140–147. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.15>
11. Halahan R.L., Lytvyn V.A. *Sposib oderzhannia syntetychnykh huminovykh kyslot ta yikh zastosuvannia u synthezi nanochastynok sriubla* [Method for obtaining synthetic humic acids and their application in the synthesis of silver nanoparticles]. Patent UA, no 94989, 2011.
12. Halahan R.L., Lytvyn V.A. *Sposib otrymannia koloidnoho rozchynu metalichnoho sriubla, stabilizovanoho syntetychnymy fulvatamy* [Method for producing a colloidal solution of metallic silver stabilized by synthetic fulvates]. Patent UA, no 80074, 2007.
13. TermoLab®. Elektropich SUOL-0.4/12.5: pasport ta instruktsiia z vykorystannia [TermoLab® Electric Furnace SUOL-0.4/12.5: Passport and Instruction for Use]. Boryspil: TermoLab, 2021.