

УДК 544.654.2; 546.73; 546.74; 546.57

СИНТЕЗ ТРИМЕТАЛЕВИХ НАНОСТРУКТУР (Ni–Co)/Ag

Л. Базиляк^{1,2*}, П. Лютий^{2,3}, Я. Пілюк¹, А. Киця^{1,2}

¹Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка Національної академії наук України,

вул. Наукова, 3а, 79060 Львів, Україна

*e-mail: bazylyak.liliya@gmail.com;

²Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України,
вул. Наукова, 5, 79060 Львів, Україна;

³Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. Ст. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна

За методом гальванічного заміщення іонів срібла біметалевими наночастинками складу Ni₅₀Co₅₀ синтезовано триметалеві наносистеми (Ni–Co)/Ag, структуру яких підтверджено методами сканівної електронної мікроскопії (SEM), X-променевого аналізу (XRD) та енергодисперсійної X-променевої спектроскопії (EDS). З'ясовано, що в досліджуваних умовах можна отримати двофазні магнітосепарабельні триметалеві наноструктури, в яких срібло кристалізується у вигляді фрактала Барнслі, “черешок” якого “виростає” з агломератів наночастинок Ni₅₀Co₅₀.

Ключові слова: синтез наноструктур, нікель, кобальт, срібло.

DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.6501.308>

1. Вступ

Неперервний ріст та розвиток нанотехнологій стали причиною появи нових та інноваційних мультиметалевих наноструктур з чітко визначеною морфологією та малим розміром частинок, а також великою площею поверхні, які в сумі покращують перенесення електронів між атомами металу. Сьогодні активно вивчають поєднання двох, трьох і більше металевих елементів у наноструктурах типу ядро–оболонка, а також у вигляді сплавів, інтерметалідів та інших форм [1]. Синергічне поєднання кількох металів у бі-, триметалевих наноструктурах дає змогу отримувати матеріали з унікальними фізико-хімічними властивостями та покращеними експлуатаційними характеристиками, що допомагає значно розширити галузі їхнього застосування, а розвиток відносно нового напрямку хімії – нанохімії та успіхи сучасної інженерії в галузі точного приладобудування дають можливість проводити дослідження і моделювання наносистем на атомарному рівні.

Одним з найпростіших та широко застосовуваних способів отримання біметалевих наночастинок є спільне відновлення прекурсорів металів, або так звані одностадійні способи синтезу [2]. За такими способами отримують біметалеві наночастинок Ag/Pt [3], Au/Ag [4], Cu/Ag [2], Ni/Ag [5] і т. д., причому найбільш

імовірним у таких випадках є утворення наночастинок статистичної структури, брутто-властивості яких є суперпозицією властивостей окремих елементів. Для отримання біметалевих наночастинок з визначеними структурою та геометрією використовують двостадійні методики синтезу, відповідно до яких на першому етапі синтезують наночастинок одного елемента, після чого до отриманого колоїдного розчину послідовно додають розчин прекурсору іншого металу та відновник [6]. Ще одним цікавим і перспективним двостадійним способом отримання бі- і триметалевих наноструктур є цементация, або контактне відновлення іонів “пасивного” металу на поверхні більш активного металу [7]. За таким методом отримано, наприклад, біметалеві структури Cu/Al [8], в яких мідь осаджувалася у вигляді нанодротинок, наноструктури типу “ядро–оболонка” [9, 10] тощо. Отже, можна зробити висновок, що зацікавленість науковців до розробки нових способів отримання поліметалевих матеріалів постійно зростає.

Однією з широко досліджених галузей застосування наночастинок металів є гетерогенний каталіз різноманітних хімічних процесів, зокрема окиснення органічних субстратів екологічно безпечними окисниками – H_2O_2 або молекулярним киснем. Відомо, що одним з найефективніших каталізаторів таких процесів є нанорозмірне золото (AuNPs) [11, 12], однак через його високу вартість проводиться активний пошук нанокаталізаторів на основі інших, з економічної точки зору більш вигідних металів. Зокрема, у праці [13] на прикладі реакції окиснення кумену молекулярним киснем проведено порівняльний аналіз каталітичної активності AuNPs і наночастинок срібла (AgNPs) і показано, що селективність реакції за гідропероксидом кумену в присутності AgNPs становить 80 %. Також був запропонований механізм каталітичної дії AgNPs, що включає формування аддукту типу “пероксильний радикал – наночастинка” [14], який може брати участь у реакції продовження ланцюга.

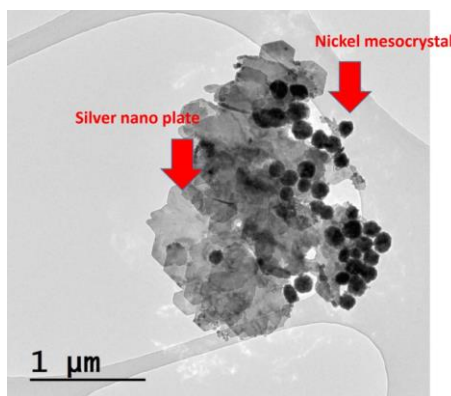


Рис. 1. TEM-зображення біметалевих наноструктур Ni–Ag, отриманих за співвідношення Ni/Ag = 5/1 [16]. Рисунок наведено з дозволу “IEEE” (ліцензія № 5703721435850)

Fig. 1. TEM-image of Ni–Ag bimetallic nanostructures obtained at the ratio of Ni/Ag = 5/1 [16].
Reproduced with permission (License No. 5703721435850)

Однією з важливих технологічних проблем нанокаталітичних процесів є вилучення каталізатора з реакційної суміші з метою його подальшої регенерації та використання. Тому досліджують можливості іммобілізації нанокаталізатора як на поверхні макросубстратів, так і на поверхні феромагнітних мікро- і наночастинок [15], отримуючи полікомпонентні наноматеріали, в яких поєднано характеристики кожної з фаз. У попередній праці [16] за методом гальванічного заміщення було синтезовано біметалеві наноструктури Ni/Ag і з'ясовано, що залежно від співвідношення Ni/Ag у вихідній реакційній суміші можливим є отримання як нанострижнів срібла з включеннями нікелю, так і нанопластинок срібла товщиною ~10 нм (рис. 1). На прикладі реакції ініційованого окиснення кумену молекулярним киснем було показано високу каталітичну активність наноструктур Ni/Ag, причому нікель у такій системі відіграє роль феромагнітного носія для каталітично активного матеріалу – срібла [17]. Отже, синтез та дослідження наноструктур на основі срібла та елементів-феромагнетиків є перспективним з точки зору розробки нових магнітосепарбельних каталітичних систем.

Варто зазначити, що нікель володіє найнижчим значенням питомої намагнічуваності серед усіх металів-феромагнетиків [18], а тому для підвищення ефективності відділення каталізатора від реакційної суміші перспективними є дослідження триметалевих наносистем (Ni-M)/Ag, де M = Fe, Co. Відповідно, мета цієї праці – синтезувати та дослідити структуру триметалевої наносистеми (Ni-Co)Ag.

2. Матеріали та методика експерименту

Для синтезу металевих наночастинок використовували: ацетат нікелю $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ (“х. ч.”, “Сфера Сім”, Україна, $\geq 99,8\%$); ацетат кобальту $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ (Aldrich, $> 98,0\%$), нітрат срібла AgNO_3 (“х. ч.”, “Сфера Сім”, Україна, $\geq 99,0\%$).

Для відновлення іонів металів у процесі синтезу наночастинок використовували гідразин гідрат $\text{N}_2\text{H}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ (“х. ч.”, “Сфера Сім”, Україна, $\geq 99\%$). Регулятором рН середовища під час синтезу наночастинок слугував натрій гідроксид (стандарт-титр, “Харківреахім”). Як розчинник під час синтезу наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$ використовували етиленгліколь (“Сфера Сім”, Україна, $\geq 99\%$), який переганяли за атмосферного тиску. Для проведення досліджень використовували фракцію з температурою перегонки $197\text{ }^\circ\text{C}$, $n_{\text{D}20} = 1,431(1)$.

Біметалеві наночастинки Ni-Co синтезували за методикою, описаною у праці [19]. Для синтезу триметалевих наноструктур (Ni-Co)Ag вибрано наночастинки складу $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$, оскільки вони характеризуються найменшим розміром та полідисперсністю (рис. 2), а також задовільною стійкістю до окиснення атмосферним киснем під час зберігання в звичайних умовах [20].

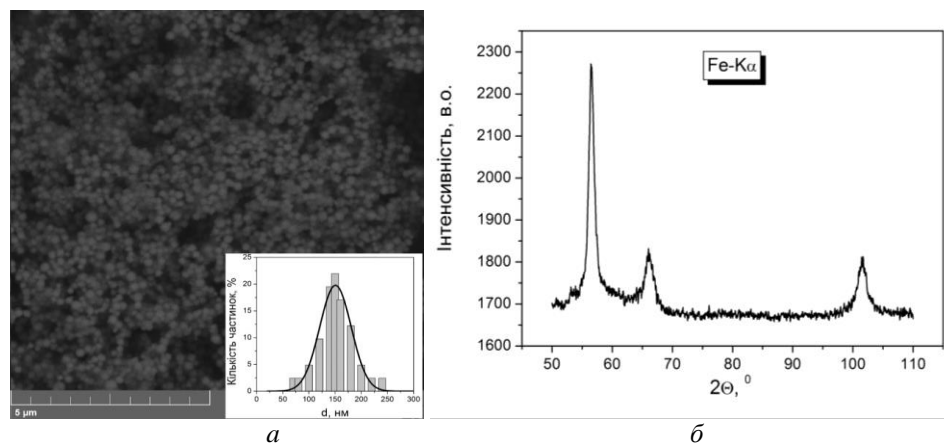


Рис. 2. СЕМ-зображення (а) та X-променева дифрактограма (б) наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$.

Відтворено з [19] згідно з умовами ліцензії Creative Commons CC BY 4.0

Fig. 2. SEM-image (a) and XRD-pattern (b) of $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$ nanoparticles.

Reproduced from [19] under the terms of the Creative Commons CC BY 4.0 license

(Ni–Co)Ag синтезували в термостатованому реакторі, обладнаному магнітною мішалкою при 20 °С. Наважку наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$ (0,15 г) диспергували у 45 мл води з використанням ультразвукової ванни (потужність УЗ-випромінювання – 70 Вт; частота – 40 кГц) впродовж 10 хв, після чого до утвореної суспензії додавали 5 мл розчину AgNO_3 визначеної концентрації і витримували за постійного перемішування (500 об/хв) впродовж години. Виявлено, що отриманий продукт кількісно (вихід 95 %) відділяється від реакційної суміші з використанням неодимового магніту. Отримані осадки промивали надлишком дистильованої води і висушували в ексікаторі при пониженому тиску за кімнатної температури.

Форму та розмір наночастинок металів оцінювали з використанням сканівного електронного мікроскопа (SEM) EVO–40XVP (Carl Zeiss) із системою енергодисперсійного X-променевого мікроаналізу INCA Energy 350. Розмір наночастинок оцінювали з використанням програми AxioVision V 4.8.2.0.

Структуру і фазовий склад отриманих наночастинок металів досліджували з використанням методу порошкової дифракції X-променів з використанням X-променевого порошкового дифрактометра Aeris–Malvern Panalytical (Cu–K α випромінювання, напруга 40 кВ, струм 15 мА, початковий кут 25° (2 θ), кінцевий кут 100°, крок 0,0217). Отримані дані аналізували повнопрофільним уточненням за методом Рітвельда з використанням програмного пакета WinCSD [21].

3. Результати досліджень та їх обговорення

Як і у випадку біметалевих наноструктур Ni–Ag, для синтезу (Ni–Co)Ag вибрано метод гальванічного заміщення срібла біметалевими наночастинками Ni/Co. Вибір кобальту як додаткового компонента зумовлений тим, що, на відміну від заліза, Ni і Co необмежено розчиняються один в одному і утворюють неперервний ряд твердих розчинів [22]. Відповідно, синтез біметалевих наночастинок Ni–Co є більш прогнозованим, а магнітні властивості сплаву нікелю та кобальту змінюються монотонно (рис. 3) [18].

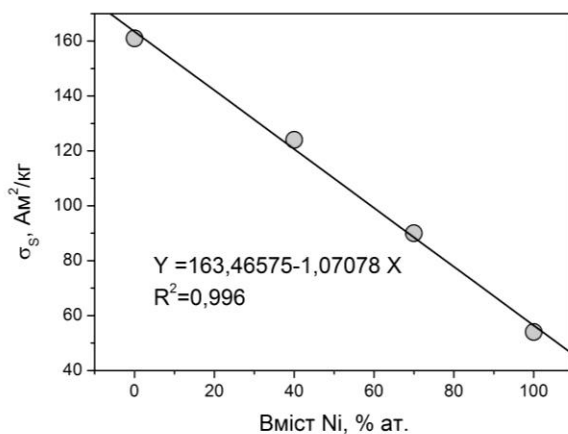


Рис. 3. Залежність питомої намагнічуваності (σ_s) при 20 °С сплавів нікелю і кобальту залежно від вмісту нікелю. Графік побудовано за даними, наведеними у [18]
Fig. 3. Dependence of the specific magnetization (σ_s) at 20 °C of nickel-cobalt alloys depending on the nickel. The graph was plotted according to the data given in [18]

З використанням SEM виявлено, що за вихідної концентрації AgNO_3 в розчині 0,01 моль/л срібло кристалізується у вигляді фрактала Барнслі, “черешок” якого “виростає” з агрегатів наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$ (рис. 4).

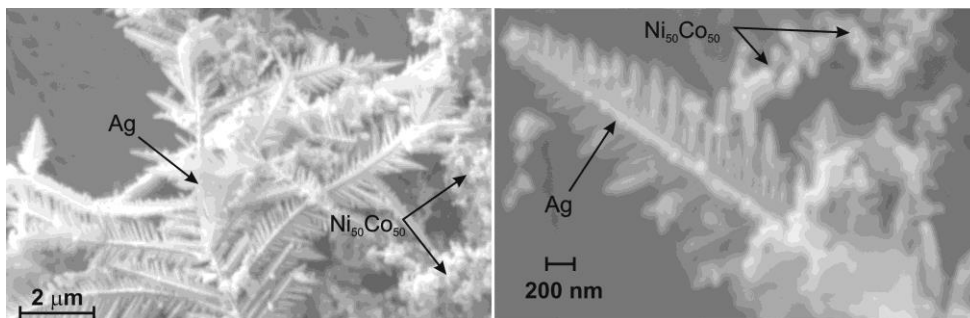


Рис. 4. СЕМ-зображення $(\text{Ni-Co})\text{Ag}$, отриманих за вихідної концентрації AgNO_3 0,01 моль/л
Fig. 4. SEM-images of $(\text{Ni-Co})\text{Ag}$ obtained at the initial concentration of AgNO_3 0.01 mol/L

Зважаючи на те, що середній діаметр наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$ не змінюється, можна припустити, що ріст фрактала відбувається у результаті розчинення наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$, які безпосередньо не контактують із ростучим фракталом завдяки переносу електронів у агрегатах (рис. 5).

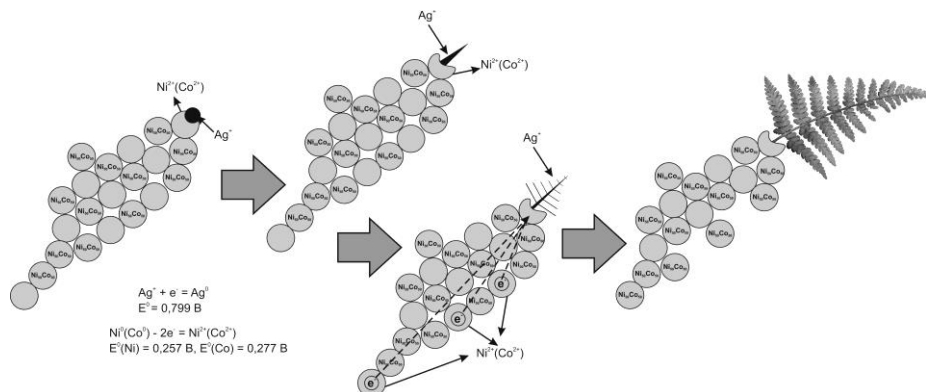


Рис. 5. Імовірна схема утворення наноструктур (Ni–Co)Ag
 Fig. 5. Probable scheme of the formation of (Ni–Co)Ag nanostructures

З використанням енергодисперсійної X-променевої спектроскопії з’ясовано, що елементний склад (див. таблицю) отриманих (Ni–Co)Ag задовільно узгоджується з теоретично розрахованим за рівнянням реакції (1).



Елементний склад (Ni–Co)Ag, отриманих за різних вихідних концентрацій AgNO₃
 Element composition of (Ni–Co)Ag obtained at different initial concentrations of AgNO₃

Елемент	Ni50Co50 [19]	[AgNO ₃] ₀ =0,01 моль/л		[AgNO ₃] ₀ =0,02 моль/л	
	% ат.	% ат.	% ат. (теор).	% ат.	% ат. (теор).
Ni	50,5	41,5	40,9	27,3	33,3
Co	49,5	41,2	40,9	26,5	33,3
Ag	–	17,8	18,2	37,4	33,4
O	–	–	–	8,8	–

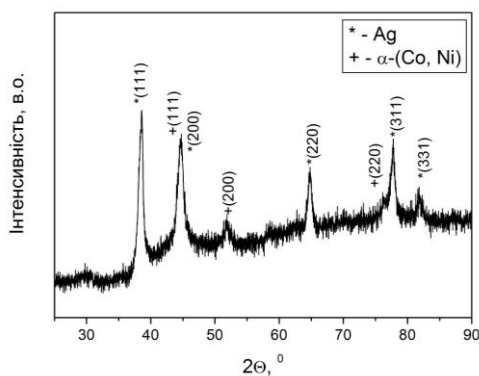


Рис. 6. X-променева дифрактограма (Ni–Co)Ag, отриманих за вихідної концентрації AgNO₃ 0,01 моль/л
 Fig. 6. XRD pattern of (Ni–Co)Ag obtained at the initial concentration of AgNO₃ 0.01 mol/L

На дифрактограмі (Ni–Co)Ag, отриманих за вихідної концентрації AgNO_3 0,01 моль/л (рис. 6), наявні лише піки, характерні для металевого срібла та твердого розчину нікелю і кобальту (фаза α -(Co, Ni), просторова група Fm-3m), і немає неідентифікованих піків, які могли б свідчити про утворення нецільових продуктів-домішок. Також за збільшення вихідної концентрації AgNO_3 до 0,02 моль/л, одночасно з формуванням фрактальних структур, простежується утворення великої кількості агломератів срібла неправильної форми (рис. 7).

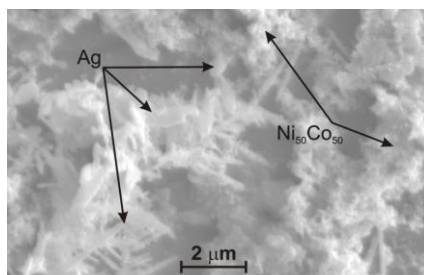


Рис. 7. СЕМ-зображення (Ni–Co)Ag, отриманих за вихідної концентрації AgNO_3 0,02 моль/л
Fig. 7. SEM-images of (Ni–Co)Ag obtained at the initial concentration of AgNO_3 0.02 mol/L

Таке явище можна пояснити перекриванням та агломерацією “пелюстків” окремих ростучих фракталів через високий вміст срібла (рис. 7) в реакційній суміші. Додатково, в отриманому продукті виявлено значну кількість кисню (див. таблицю) та дещо завищену, порівняно з теоретично розрахованою, кількість срібла, що свідчить про окиснення біметалевих наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$.

4. Висновки

З метою апробації нових способів отримання поліметалевих магнітосепарабельних каталітичних систем, за методом гальванічного заміщення іонів срібла біметалевими наночастинами $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$, синтезовано триметалеві наноструктури (Ni–Co)Ag. З використанням SEM показано, що за досліджуваних умов срібло кристалізується у вигляді фрактала Барнслі, “черешок” якого “виростає” з агломератів наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$. З використанням EDS та XRD з’ясовано, що за співвідношення M/Ag ($M = \text{Ni} + \text{Co}$) у вихідній реакційній суміші, яка дорівнює 5/1, отримані наноструктури не містять нецільових продуктів-домішок, водночас збільшення вмісту срібла до $M/\text{Ag} = 2/1$ призводить до утворення агломератів срібла неправильної форми та часткового окиснення біметалевих наночастинок $\text{Ni}_{50}\text{Co}_{50}$. Запропоновано імовірну схему формування наноструктури (Ni–Co)Ag.

5. Подяка

У статті наведено результати досліджень, отримані за часткової фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (грант № 2020.02/0309).

Окремі результати досліджень отримано з використанням обладнання Центру колективного користування науковими приладами “Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу” (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України), а також Центру колективного користування наукового обладнання “Лабораторія перспективних технологій, створення та фізико-хімічного аналізу нових речовин і функціональних матеріалів” (НУ “Львівська політехніка”, <https://lpnu.ua/ckkno>).

1. *Sharma G., Kumar A., Sharma S., Naushad M., Dwivedi R. P.* et al. Novel development of nanoparticles to bimetallic nanoparticles and their composites: A review // *J. King Saud Univ. Sci.* 2019. Vol. 31, No. 2. P. 257–269.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.06.012>
1. *Delsante S., Borzone G., Novakovic R., Piazza D., Pigozzi G.* et al. Synthesis and thermodynamics of Ag/Cu nanoparticles // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. Vol. 17. P. 28387–28393. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5CP02058A>
2. *Gao J., Ren X., Chen D., Tang F., Ren J.* Bimetallic Ag/Pt hollow nanoparticles: Synthesis and tunable surface plasmon resonance // *Scr. Mater.* 2007. Vol. 57, No. 8. P. 687–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.06.049>
3. *Wilson O. M., Scott R. W., Garcia-Martinez J. C., Crooks R. M.* Synthesis, characterization, and structure-selective extraction of 1–3-nm diameter AuAg dendrimer-encapsulated bimetallic nanoparticles // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. Vol. 127, No. 3. P. 1015–1024. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja045224m>
4. *Zhang J., Yan N.* NiAg Catalysts for selective hydrogenolysis of the lignin C–O bond // *Part. Part. Syst. Char.* 2016. Vol. 33. P. 610–619.
DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201600005>
5. *Zeng J., Zhu C., Tao J., Jin M., Zhang H., Li Z. Y., Xia Y.* Controlling the nucleation and growth of silver on palladium nanocubes by manipulating the reaction kinetics // *Angew. Chem.* 2012. Vol. 51, No. 10. P. 2354–2358.
DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201107061>
6. *Kuntyi O., Zozulya G., Kytsya A.* “Green” synthesis of metallic nanoparticles by sonoelectrochemical and sonogalvanic replacement methods // *Bioinorg. Chem. Appl.* 2021. Vol. 2021. Article ID: 9830644. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9830644>
7. *Inguanta R., Piazza S., Sunseri C.* Novel procedure for the template synthesis of metal nanostructures // *Electrochem. Commun.* 2008. Vol. 10. P. 506–509.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.01.019>
8. *Senapati S., Srivastava S. K., Singh S.B., Mishra H. N.* Magnetic Ni/Ag core-shell nanostructure from prickly Ni nanowire precursor and its catalytic and antibacterial activity // *J. Mater. Chem.* 2012. Vol. 22. P. 6899–6906.
DOI: <https://doi.org/10.1039/C2JM00143H>
9. *Reboul J., Li Z. Y., Yuan J., Nakatsuka K., Saito M., Mori K., Louis C.* Synthesis of small Ni-core–Au-shell catalytic nanoparticles on TiO₂ by galvanic replacement reaction // *Nanoscale Adv.* 2021. Vol. 3, No. 3. P. 823–835.
DOI: <https://doi.org/10.1039/D0NA00617C>
10. *Liu P., Degirmenci V., Hensen E. J.* Unraveling the synergy between gold nanoparticles and chromium-hydroxalates in aerobic oxidation of alcohols // *J. Catal.* 2014. Vol. 313. P. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2014.03.001>
11. *Costa V. V., Estrada M., Demidova Y., Prosvirin I., Kriventsov V.* et al. Gold nanoparticles supported on magnesium oxide as catalysts for the aerobic oxidation of alcohols under alkali-free conditions // *J. Catal.* 2012. Vol. 292. P. 148–156.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.05.009>
12. *Crites C. O. L., Hallett-Tapley G. L., Frenette M., González-Béjar M.* et al. Insights into the mechanism of cumene peroxidation using supported gold and silver nanoparticles // *ACS Catal.* 2013. Vol. 3, No. 9. P. 2062–2071.
DOI: <https://doi.org/10.1021/cs400337w>

13. *Opeida I. A., Kytsya A. R., Bazilyak L. I., Pobigun O. I.* Silver Nanoparticle Catalysis of the Liquid-Phase Radical Chain Oxidation of Cumene by Molecular Oxygen // *Theor. Exp. Chem.* 2017. Vol. 52, No. 6. P. 369–374.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11237-017-9492-z>
14. *Oliveira R. L., Kiyohara P. K., Rossi L. M.* High performance magnetic separation of gold nanoparticles for catalytic oxidation of alcohols // *Green Chem.* 2010. Vol. 12, No. 1. P. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.1039/B916825G>
15. *Kytsya A., Bazilyak L., Pobigun-Halajska O., Opeida I., Simon P., Zelenina I.* Synthesis and Catalytic Properties of Ni@Ag Bimetallic Nanostructures // 2018 IEEE 8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). IEEE, Zatoke, 3–7 September. 2018. P. 01SPN20-1–01SPN20-4.
DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915129>
16. *Opeida I. A., Kytsya A. R., Bazilyak L. I., Pobigun-Halajska O. I.* Magnetically Separable Nanocatalyst Ag@Ni for the Liquid-Phase Oxidation of Cumene // *Theor. Exp. Chem.* 2018. Vol. 54. P. 242–246.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11237-018-9569-3>
17. *Grey D. E.* American Institute of Physics Handbook. New York; Toronto; London: McGraw-Hill, 1957. 1549 p.
18. *Kytsya A., Berezovets V., Verbovytsky Y., Bazilyak L.* et al. Bimetallic Ni-Co nanoparticles as an efficient catalyst of hydrogen generation via hydrolysis of NaBH₄ // *J. Alloys Compd.* 2022. Vol. 908. Article ID: 164484.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164484>
19. *Kytsya A. R., Verbovytsky Y. V., Vlad H. I., Bazilyak L. I.* et al. Synthesis and hydrogenation properties of Ni–Co bimetallic nanoparticles // *Appl. Nanosci.* 2023. Vol. 13. P. 5265–5276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02752-8>
20. *Akselrud L., Grin Y.* WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4) // *J. Appl. Crystallogr.* 2014. Vol. 47, No. 2. P. 803–805.
DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576714001058>
21. *Liakishev N. P.* Phase diagrams of binary metal systems. Moscow: Mashinostroenie, 1997. Vol. 2. 1024 p. (in russian).

SYNTHESIS OF TRIMETALLIC (Ni–Co)Ag NANOSTRUCTURES**L. Bazylyak^{1,2*}, P. Lyuty^{2,3}, Ya. Pilyuk¹, A. Kytsya^{1,2}**

¹*Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of the Institute of Physical Organic Chemistry and Coal Chemistry named after L. M. Lytvynenko of the NAS of Ukraine,*

Naukova Str., 3a, 79060 Lviv, Ukraine

** e-mail: bazylyak.liliya@gmail.com;*

²*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,*

Naukova Str., 5, 79060 Lviv, Ukraine;

³*“Lviv Polytechnic” National University,*

Bandery Str., 12, 79013 Lviv, Ukraine

Currently, the combination of two, three, and more metal elements in core-shell nanostructures, as well as in the form of alloys, intermetallics, and other forms, is being actively studied. The synergistic combination of several metals in such nanostructures makes it possible to obtain the materials with unique physico-chemical properties, which allows to significantly expand the fields of their application, and the development of modern engineering in the field of precision instrumentation allows to conduct the research and modeling of the nanosystems at the atomic level.

One of the widely researched fields of an application of metal nanoparticles is heterogeneous catalysis of various chemical processes. At the same time, one of the important technological problems of nanocatalytic processes is the extraction of the catalyst from the reaction mixture for its further regeneration and use. Therefore, the possibilities of nanocatalyst immobilization both on the surface of macrosubstrates and on the surface of ferromagnetic micro- and nanoparticles are being investigated for the obtaining of multicomponent nanomaterials in which the characteristics of each phase are combined. Previously, Ni/Ag bimetallic nanostructures were synthesized by the method of galvanic replacement and their high catalytic activity in the reaction of oxidation of cumene with molecular oxygen was shown. Therefore, in this work trimetallic (Ni–Co)Ag nanostructures were synthesized using the method of galvanic replacement of silver ions with Ni₅₀Co₅₀ bimetallic nanoparticles. Using the scanning electron microscopy it was shown that under the studied conditions silver is crystallized in the form of the Barnsley fractal, the “petiole” of which “grows” from the agglomerates of Ni₅₀Co₅₀ nanoparticles. With the use of EDS and XRD, it was established that at a ratio of M/Ag (M = Ni+Co) in the initial reaction mixture equal to 5/1, the obtained nanostructures do not contain non-target products-impurities, while the silver content is increased to M/Ag = 2/1 and leads to the formation of silver agglomerates of irregular shape and partial oxidation of Ni₅₀Co₅₀ bimetallic nanoparticles. The probable scheme of the formation of Ni/Co/Ag is proposed.

Keywords: synthesis of nanostructures, nickel, cobalt, silver.

Стаття надійшла до редколегії 31.10.2024

Прийнята до друку 09.09.2024