

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-331-338](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-331-338)

УДК 544.4:504

Ірина Сергіївна Макєєва¹, Ольга Володимирівна Кислова²¹кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)

E-mail: makyeyeva.is@knutd.com.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>

Researcher ID: X-2580-2018. SCOPUS Author ID: 7003994762

²кандидат біологічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)

E-mail: kislova.ov@knutd.com.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0223-1860>. SCOPUS Author ID: 22034723000

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНО СИНТЕЗОВАНОЇ СУМІШІ Cu/Cu₂O/CuO НА ДЕСТРУКЦІЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ПЛІВКИ

У роботі досліджено вплив композиції Cu/Cu₂O/CuO на швидкість деградації поліетиленової плівки під дією сонячного світла експрес-методом. Зразки плівки із вмістом 3 % гетерогенної суміші при сумарному опроміненні 120 годин продемонстрували втрату маси до 27 %, тоді як для контрольної плівки цей показник становив 2 %. Електрохімічно синтезований продукт має низку переваг під час використання: стабільність, екологічна безпека, активація випромінюванням видимого світла, можливість регулювати його фазовий склад та кристалічну структуру шляхом зміни умов електролізу.

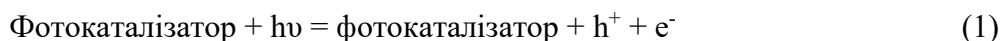
Ключові слова: фотокаталітична деструкція; поліетиленова плівка; композиція Cu/Cu₂O/CuO; електрохімічні методи; захист навколишнього середовища.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 18.

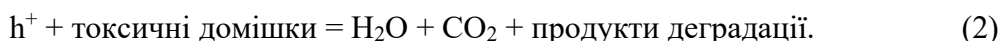
Актуальність теми дослідження. Охорона навколишнього середовища від негативних наслідків діяльності людства є нагальною потребою сьогодення. Однією з таких проблем є забруднення довкілля полімерними матеріалами, розклад яких у природі триває від десятків до сотень років. Під дією сонячного світла, нагрівання або в результаті механічної обробки відбувається руйнування хімічних зв'язків у полімерах з утворенням низькомолекулярних продуктів розпаду. Опромінення макромолекул спричиняє реакцію деструкції поліолефінів шляхом розриву C–C зв'язків з утворенням вільних радикалів. Подальша взаємодія з киснем повітря супроводжується виділенням активних оксигеновмісних форм радикалів за ланцюговим механізмом та різних продуктів окиснення (альдегідів, кетонів, карбонових кислот тощо). Як результат спостерігається втрата міцності полімерних матеріалів, пожовтіння та збільшення крихкості [1,2].

Для пришвидшення процесу деструкції полімерів використовують каталізатори: для термічного крекінгу – цеоліти з утворенням ароматичних сполук, алюмосилікати, солі перехідних металів (Феруму, Купруму); для деструкції в рідкі паливні продукти – Pd, Pt, Ru, Ni на носіях (Al₂O₃, C), для біокаталітичної деструкції – мікроорганізми та ферменти [2-4].

Для руйнування тонких плівок полімерів перспективним напрямком є застосування фотокаталізаторів – напівпровідникових матеріалів на основі оксидів металів (TiO₂, NiO, суміш Cu₂O – CuO, ZnO, Fe₂O₃, SnO₂, ZrO₂), у молекулах яких під час поглинання електромагнітного випромінювання відбувається перехід валентних електронів зі зв'язаного стану у вільний [5]. Фотокаталізатор поглинає фотони з енергією, яка є вищою за енергію забороненої зони, електрони у валентній зоні (ВЗ) можуть збуджуватися та переміщуватися в зону провідності (ЗП), де утворюється дірка (h⁺):



Фотогенеровані електрони та дірки ефективно відокремлюються та переміщуються на поверхню фотокаталізатора, запускаючи вторинні реакції. Утворюються вільні радикали, які беруть участь в окисненні органічних сполук з утворенням проміжних продуктів та призводять до деградації токсичних домішок. Кінцевий результат процесів можна описати таким рівнянням:



Таким чином, фотокаталізатори прискорюють хімічну реакцію та розширюють спектр довжин хвиль світла, під дією яких відбувається реакція [5; 6].

Популярний фотокаталізатор TiO_2 має широку заборонену зону ($\sim 3,2$ eV), тому його активація відбувається під впливом ультрафіолетового випромінювання ($\lambda < 385$ nm), яке становить лише 3...5 % сонячного спектра. Після збудження часто відбувається швидка рекомбінація електронів та дірок, що зумовлює зменшення кількості активних радикалів ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{O}_2^-$). Отже, цей фотокаталізатор є неефективним під час використання природного світла. Низька селективність та потенційна токсичність наночастинок є іншими негативними факторами. Модифіковані форми TiO_2 , доповані домішками йонів металів або напівпровідниками з меншою шириною забороненої зони та оптимізованою мікроструктурою, є складними у виробництві та дорогими. Усе це значно звужує можливості використання титан (IV) оксиду [6; 7].

Постановка проблеми. Актуальним завданням є пошук нових стабільних фотокаталізаторів, які активуються світлом видимого діапазону. Дослідження недорогих та доступних напівпровідників на основі купрум (I, II) оксидів відкриває перспективу для широкого їх застосування в деструкції полімерних матеріалів та дозволяє зробити цю технологію дешевою та безпечною.

Аналіз досліджень та публікацій. Створення композитів з двох напівпровідників є одним із напрямків для збільшення ефективності фотокаталізу завдяки кращому розподілу зарядів і розширенню діапазону активуючого випромінювання, зниженню швидкості рекомбінації електронів та дірок.

Фотокаталізатори на основі купрум (I, II) оксидів є ефективними для окиснення органічних речовин та виробництва відновлюваної енергії [8; 9]. Показано, що фотокаталітична активність композитів суттєво залежить від їхнього складу та структури, які впливають на площу поверхні та пористість матеріалів [10, 11].

Згідно з літературними даними [12], купрум (I, II) оксиди мають наступні властивості (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика властивостей купрум (I, II) оксидів

Характеристики напівпровідників	Cu_2O	CuO
Тип напівпровідника	Прямозонний	Непрямозонний
Оптична глибина поглинання (nm)	≈ 1000	≈ 500
Оптична ширина забороненої зони (eV)	2,1	1,7
Довжина дифузії носіїв (nm)	≈ 500	≈ 200

Джерело: розроблено авторами.

Cu_2O використовувався як фотокаталізатор видимого світла безпосередньо для розщеплення води та деградації органічних забруднень. Існує кілька переваг використання Cu_2O як фотокаталізатора. По-перше, він має низьку токсичність, є екологічно безпечним, недорогим та легкодоступним. По-друге, ширина забороненої зони Cu_2O може коригуватись розміром його частинок. Cu_2O здатний адсорбувати молекулярний кисень O_2 , який може поглинати фотоелектрони та обмежувати взаємодію електронів і дірок [11].

Cu_2O здатний окиснюватись до CuO , якщо фотогенеровані дірки не можуть бути ефективно видалені. Проведені дослідження показали, що частинки Cu_2O можна стабілізувати за допомогою пасивуючої тонкої плівки CuO на їх поверхні, що запобігає подальшому окисненню [10; 11]. Отже, $\text{CuO-Cu}_2\text{O}$ композит зазвичай є гетероструктурою двох р-типових напівпровідників.

Таким чином, на фотокаталітичну активність часток суміші оксидів купруму впливає їх розмір, який визначає й основні фізичні властивості матеріалу: площа поверхні, густина, в'язкість, текучість, пористість, ступінь кристалічності, швидкість каталітичної

реакції та хімічна активність. Ці характеристики є важливими і в процесі синтезу речовин, оскільки дають можливість контролювати процес та створювати нові матеріали з унікальними властивостями.

У роботі [13] досліджено фотокаталітичні властивості гетеросистеми $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$, отриманої шляхом одностадійного прожарювання мідної сітки на повітрі. Завдяки комбінації Cu_2O (хороший редуктор), CuO (підвищує стабільність та перенос електронів) та металічної міді (провідник електронів та проміжний шар) досягається вища ефективність фотокаталізу. Вузькі заборонені зони гетеропереходу $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ забезпечують широку смугу поглинання цієї суміші у видимій області та ефективне розділення електронів та дірок. Проте регулювати розмір частинок сполук утвореної суміші та їх відносну кількість у процесі окиснення неможливо [14,; 15].

Цей недолік можна усунути в результаті електрохімічного анодного окиснення металічної міді [16]. Показано, що синтезована гетеросистема $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ має фотокаталітичні властивості в реакції розкладу барвника метилового оранжевого у водному розчині.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перспективним є подальше вивчення потенційних фотокаталітичних властивостей суміші $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$, зокрема для фотоокисної деградації поліолефінових плівок, що погано піддаються звичайній біологічній деструкції у природних умовах.

Метою роботи було дослідження впливу гетеросистеми $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$, синтезованої електрохімічним методом, на швидкість деградації поліетиленової плівки під впливом видимого світла.

Виклад основного матеріалу. Електрохімічний синтез гетеросистеми $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ проводили в оптимізованих умовах (температура 70°C , вихід за струмом 96,25 %) [16]. Склад продукту (%) наведено на рис. 1.

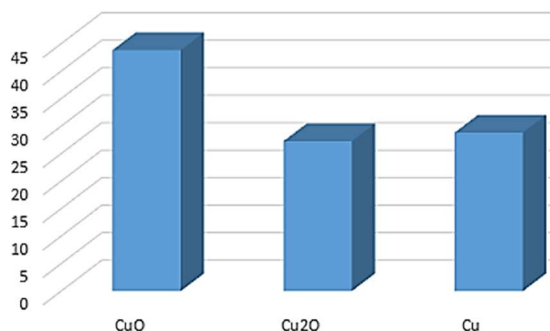


Рис. 1. Результати хімічного аналізу суміші $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ (%), отриманої електрохімічним методом

Джерело: розроблено авторами.

У результаті електрохімічного окиснення на аноді утворюються суміш купрум (I, II) оксидів, тоді як металічна мідь є продуктом часткового відновлення купрум оксидів на катоді, а також механічного руйнування мідного анода.

На рис. 2 представлена фотографія отриманого порошку. СЕМ-візуалізацію проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа Tescan Vega Compact (Tescan Vega, Брно, Чеська Республіка) під вакуумом 10 мПа. Зразки для скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) були покриті золотом за допомогою іонного розпилення JEOL Fine Coat JFC-1100 (JEOL Ltd., Токіо, Японія).

З рис. 2 видно, що часточки продукту мають різну форму. З літературних джерел відомо, що мідь має кубічну гранецентровану кристалічну ґратку, Cu_2O має кубічну (менш щільну) кристалічну ґратку, а CuO – моноклінну, яка характеризується найнижчим рівнем симетрії та складною структурою.

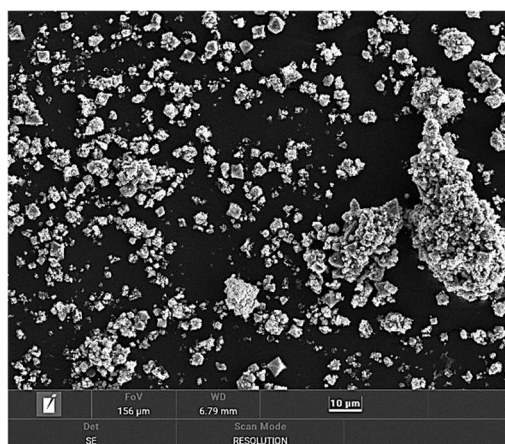


Рис. 2. Мікрофотографія продукту електролізу

Джерело: розроблено авторами.

Для вимірювання розмірів частинок використано метод лазерної дифракції, який ґрунтується на явищі розсіювання світла частинками в усіх напрямках: спостерігається дифракційна картина розподілу інтенсивності, яка залежить від розміру частинки. На основі розподілу енергії, виміряної в радіально розташованих сенсорних елементах, розраховується розподіл частинок за розмірами [17] (рис. 3).

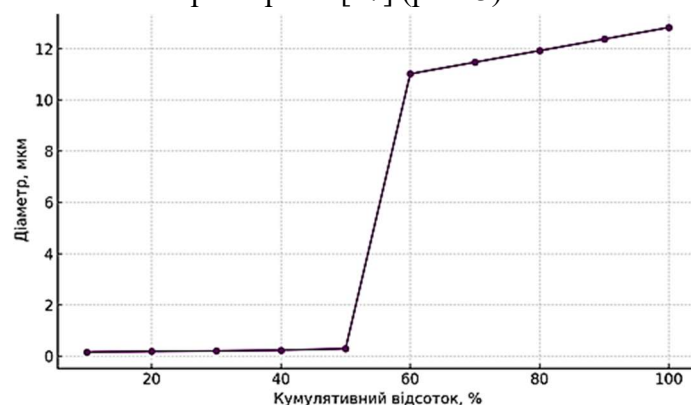


Рис. 3. Кумулятивна крива розподілу часток

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з отриманими даними, половина утворених часток до D50 має відносно компактний розмірний діапазон, тоді як після D60 спостерігається різке збільшення розміру частинок, що підтверджує наявність агломератів, які значно впливають на загальний розподіл. Синтезована композиція Cu/Cu₂O/CuO є хімічно стабільною, а можливість регулювати умови проведення електролізу дозволяє варіювати її фазовий склад та кристалічну структуру.

Розробка мікроструктурованих фотокаталізаторів, які проявляють активність під дією випромінювання світла, є перспективною для майбутніх досліджень та впровадження технологій переробки полімерних матеріалів. Використання як джерела енергії випромінювання видимого діапазону дозволить зробити технологію розкладання поліолефінів ефективною та економічно вигідною.

Для подальших досліджень фотокаталітичного впливу утвореного продукту було синтезовано поліетиленову плівку, модифіковану добавкою Cu/Cu₂O/CuO. Гранули поліетилену високого тиску (ДСТУ 16337-77) у кількості 0,5 г розчиняли в циклогексані при температурі 110 °C протягом 1 години [18]. Після повного розчинення поліетилену готували

серію зразків із добавками оксидних матеріалів (додавали 1 мас. %). Одержані зразки диспергували протягом 1 години в ультразвуковій ванні марки ВК – 90502 при потужності 50W. Застосування ультразвукової ванни дозволило підвищити ефективність диспергування внесених частинок оксидів та рівномірно розподілити їх по всьому об'єму реакційної маси. Після ультразвукової обробки розчин вносили в чашку Петрі і ставили до сушильної шафи при температурі 110 °C до повної готовності плівки, яка легко відставала від скляної підкладки. Для контролю готували чисті плівки поліетилену, які не містять композитних матеріалів. Готові поліетиленові плівки зважували на аналітичних терезах.

Проведення фотокаталітичної деструкції полімерних матеріалів у присутності добавок оксидних матеріалів є перспективним напрямком для зменшення забруднення навколишнього середовища. Фотокаталітичну деградацію одержаних поліетиленових плівок вивчали експрес-методом при опроміненні світлом. Встановлено, що на ефективність фотокаталізатора суттєво впливають умови його введення в полімерний матеріал, інтенсивність перемішування, концентрація активної фази та тривалість опромінення. При сумарному опроміненні близько 120 годин спостерігається збільшення швидкості деградації плівки, що містить суміш оксидів. Результати дослідження наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Втрата маси (мас. %) поліетиленової плівки з гетеросистемою Cu/Cu₂O/CuO залежно від тривалості опромінення

Час, години	Добавка оксидного матеріалу, (мас. %)			
	0	1	2	3
24	0	3	3	5
48	0	3	3	12
72	0	4	6	15
96	1	7	15	20
120	2	10	17	27

Джерело: розроблено авторами.

Додавання до поліетилену синтезованої суміші Cu/Cu₂O/CuO призводить до значного збільшення швидкості її деструкції. Деградація полімерної плівки обумовлена тим, що енергія дисоціації зв'язку C–C більшості полімерів становить близько 350 кДж·моль⁻¹, а енергія природних променів знаходиться в межах 400-600 кДж·моль⁻¹. Важливим для забезпечення зсуву активності фотокаталізатора у видимий діапазон є забезпечення максимальної гомогенізації всієї реакційної суміші, повне перемішування компонентів між собою. Причиною підвищення втрати маси може бути покращене розділення фотоініційованих носіїв заряду в присутності гетеросистеми Cu/Cu₂O/CuO.

Безперечною перевагою мікрочастинок у порівнянні з частинками більшого розміру є максимальна ймовірність виходу розділених зарядів на поверхню каталізатора та мінімальна – їх рекомбінації, відповідно. У зв'язку з тим, що глибина проникнення світла в частинки обмежена, зменшення розмірів частинок до мікророзмірних значень сприяє поглинанню світла у всьому об'ємі Cu/Cu₂O/CuO.

Однак слід враховувати й термічний вплив, що проявляється при занадто великих інтервалах часу опромінення. Отже, контрольований час опромінення є важливим параметром експерименту з фотокаталітичної деградації поліетиленових плівок.

Висновки. Досліджено дію гетеросуміші Cu/Cu₂O/CuO на швидкість деградації поліетиленової плівки під впливом сонячного світла експрес-методом. Показано, що зразки плівки з вмістом 3 % суміші при сумарному опроміненні 120 годин продемонстрували втрату маси до 27 %, тоді як для контрольної плівки цей показник становив 2 %. Встановлено, що на ефективність дії фотокаталізатора значно впливають умови його введення в полімерний матеріал, інтенсивність перемішування, концентрація активної фази, а також тривалість опромінення.

Отримані результати свідчать про можливість використання композиції Cu/Cu₂O/CuO як фотокаталізатора для прискорення процесу деструкції поліолефінових матеріалів під впливом сонячного світла. Гетеросистема Cu/Cu₂O/CuO має низку переваг при застосуванні її як фотокаталізатора: низька токсичність, екологічна безпечність, активація випромінюванням видимого діапазону світла, низька вартість та легкодоступність.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію умов синтезу суміші, удосконалення методів її введення в полімерні субстрати та вивчення механізму фотогенерованих процесів, що супроводжують руйнування поліетиленової матриці. Крім того, актуальним завданням є вивчення довгострокової стабільності каталізатора, перспектив його повторного використання та впливу продуктів фотодеструкції на довкілля.

Список використаних джерел

1. Cheneler, D., & Bowen, J. (2013). Degradation of polymer films. *Soft Matter*, 9, 344-358. <https://doi.org/10.1039/C2SM26502H>.
2. Tan, Y., Cheng, Y., Xu, J., & Wang, H. (2024). Catalytic chemical recycling and upcycling of polyolefin plastics. *Giant*, 19, 100307. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100307>.
3. Seitz, M., & Schröter, S. (2022). Catalytic depolymerization of polyolefinic plastic waste. *Chemie Ingenieur Technik*, 94, 720-726. <https://doi.org/10.1002/cite.202100182>.
4. Deng, L., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, X., Wei, D., Wei, Q., & Deng, S. (2023). Novel catalysts in catalytic upcycling of common polymer wastes. *Chemical Engineering Journal*, 144350. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144350>.
5. Hassaan, M., El-Nemr, M., Elkatory, M., Ragab, S., Niculescu, V., & Nemr, A. (2023). Review of Photocatalytic and Antimicrobial Properties of Metal Oxide Nanoparticles. *Topics in Current Chemistry*, 381:31. <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7>.
6. Ali, S. S., Qazi, I. A., Arshad, M., Khan, Z., Voice, T. C., & Mehmood, C. T. (2016). Photocatalytic degradation of low-density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 5, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001>.
7. Rafiq, A., Ikram, M., Ali, S., Niaz, F., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2021). Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 97, 111-128. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017>.
8. Goodarzi, N., Ashrafi-Peyman, Z., Khani, E., Moshfegh, A. (2023). Recent progress on semiconductor heterogeneous photocatalysts in clean energy production and environmental remediation. *Catalysts*, 13(7), 1102-1158. <https://doi.org/10.3390/catal13071102>.
9. Zindrou, A., Belles, L., Solakidou, M., Boukos, N., Deligiannakis, V. (2023). Non-graphitized carbon/Cu₂O/CuO nanohybrids with improved stability and enhanced photocatalytic H₂ production. *Scientific Reports*, 13 (1). 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41211-4>.
10. Liu, X., Chen, J., Liu, P., Zhang, H., Li, G., An, T., Zhao, H. (2016). Controlled growth of CuO/Cu₂O hollow microsphere composites as efficient visible-light-active photocatalysts. *Applied Catalysis A: General*, 521, 34-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2015.10.005>.
11. Pástrián, F., Silva, A., Dourado, A., Batista, A., Oliveira-Filho, A. et al. (2018). Why Could the Nature of Surface Facets Lead to Differences in the Activity and Stability of Cu₂O-Based Electrocatalytic Sensors? *ACS Catalysis*, 8(7), 6265-6272. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00726>.
12. Khiavi, N., Katal, R., Eshkalak, S. et al. (2019). Visible Light Driven Heterojunction Photocatalyst of CuO–Cu₂O Thin Films for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants. *Nanomaterials*, 9(7), 1011. <https://doi.org/10.3390/nano9071011>.
13. Li, H., Su, Z., Hu, S., & Yan, Y. (2017). Free-standing and flexible Cu/Cu₂O/CuO heterojunction net: A novel material as cost-effective and easily recycled visible-light photocatalyst. *Appl. Catal. B Environ.*, 207, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.013>.
14. Xie, J., Zhong, Y., Meng, W., Feng, X., & Zhu, T. (2024). Modulation of Cu/Cu₂O nanoparticles to promote the photocurrent response for light-enhanced pseudocapacitive charge storage. *Materials Advances*, 5(8), 3173-3176. <https://doi.org/10.1039/D4MA00147H>.

15. Yang, Y., Xu, D., Wu, Q., & Diao, P. (2016). Cu₂O/CuO Bilayered Composite as a High-Efficiency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction. *Sci. Rep.*, 6, 35158. DOI: 10.1038/srep35158.

16. Макєєва, І. С., Смірнов, М. О., & Гайдай, І. О. (2023). Фотокаталізатор на основі купрум оксидів, отриманих електролізом. *Технології та інжиніринг*, 4(15), 80-88. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.4.8.

17. Nascimento, C., Guardani, R., & Giulietti, M. (1997). Use of Neural Networks in the Analysis of Particle Size Distributions by Laser Diffraction. *Powder Technol.*, 90, 89-94.

18. Liu, G., Liao, S., Zhu, D., & Cui, J. (2011). Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene film with manganese oxide OMS-2. *Solid State Sciences*, 13(1), 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.014>.

References

1. Cheneler, D., & Bowen, J. (2013). Degradation of polymer films. *Soft Matter*, 9, 344-358. <https://doi.org/10.1039/C2SM26502H>.

2. Tan, Y., Cheng, Y., Xu, J., & Wang, H. (2024). Catalytic chemical recycling and upcycling of polyolefin plastics. *Giant*. V. 19, 100307. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100307>.

3. Seitz, M., & Schröter, S. (2022). Catalytic depolymerization of polyolefinic plastic waste. *Chem. Ing. Tech.*, 94, P. 720-726. <https://doi.org/10.1002/cite.202100182>.

4. Deng, L., Guo, W., Ngo, H., Zhang, X., Wei, D., Wei, Q., & Deng, S. (2023). Novel catalysts in catalytic upcycling of common polymer wastes. *Chem. Engin. J.*, 471, 144350. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144350>.

5. Hassaan, M., El-Nemr, M., Elkatory, M., Ragab, S., Niculescu, V., & Nemr, A. (2023). Review of Photocatalytic and Antimicrobial Properties of Metal Oxide Nanoparticles. *Topics in Current Chemistry*, 381, 31. <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7>.

6. Ali, S., Qazi, I., Arshad, M., Khan, Z., Voice, T., & Mehmood, C. (2016). Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes, *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 5, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001>.

7. Rafiq, A., Ikram, M., Ali, S., Niaz, F., Khan, M., Khan, Q., Maqbool, M (2021) Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *J/Ind. Eng. Chem.*, 97, 111-128. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017>.

8. Goodarzi, N., Ashrafi-Peyman, Z., Khani, E., Moshfegh, A. (2023). Recent progress on semiconductor heterogeneous photocatalysts in clean energy production and environmental remediation. *Catalysts*. 13(7), P. 1102-1158. <https://doi.org/10.3390/catal13071102>.

9. Zindrou, A., Belles, L., Solakidou, M., Boukos, N., & Deligiannakis, V. (2023). Non-graphitized carbon/Cu₂O/CuO nanohybrids with improved stability and enhanced photocatalytic H₂ production. *Scientific Reports*, 13(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41211-4>.

10. Liu, X., Chen, J., Liu, P., Zhang, H., Li, G., An, T., Zhao, H. (2016). Controlled growth of CuO/Cu₂O hollow microsphere composites as efficient visible-light-active photocatalysts. *Applied Catalysis A: General*. 521, P. 34-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2015.10.005>.

11. Pástrián, F., Silva, A., Dourado, A., Batista, A., Oliveira-Filho, A. et al. (2018). Why Could the Nature of Surface Facets Lead to Differences in the Activity and Stability of Cu₂O-Based Electrocatalytic Sensors? *ACS Catalysis*, 8(7), 6265-6272. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00726>.

12. Khiavi, N., Katal, R., Eshkalak, S. et al. (2019). Visible Light Driven Heterojunction Photocatalyst of CuO–Cu₂O Thin Films for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants. *Nanomaterials*, 9(7), 1011. <https://doi.org/10.3390/nano9071011>.

13. Li, H., Su, Z., Hu, S., & Yan, Y. (2017). Free-standing and flexible Cu/Cu₂O/CuO heterojunction net: A novel material as cost-effective and easily recycled visible-light photocatalyst. *Appl. Catal. B Environ.*, 207, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.013>.

14. Xie, J., Zhong, Y., Meng, W., Feng, X., Zhu, T. (2024). Modulation of Cu/Cu₂O nanoparticles to promote the photocurrent response for light-enhanced pseudocapacitive charge storage. *Materials Advances*, 5(8), 3173-3176. <https://doi.org/10.1039/D4MA00147H>.

15. Yang, Y., Xu, D., Wu, Q., & Diao, P. (2016). Cu₂O/CuO Bilayered Composite as a High-Efficiency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction. *Sci. Rep.*, 6, 35158. DOI: 10.1038/srep35158.
16. Makyeyeva, I.S., Smirnov, M. A., & Gaidai, I. A. (2023). Fotokatalizator na osnovi kuprum oksydiv, otrymanykh elektrolizom [The photocatalyst based on copper oxides obtained by electrolysis]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technologies and engineering*, 4(15), 80-88. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.4.8.
17. Nascimento, C., Guardani, R., & Giulietti, M. (1997). Use of Neural Networks in the Analysis of Particle Size Distributions by Laser Diffraction. *Powder Technol.*, 90, 89-94.
18. Liu, G., Liao, S., Zhu, D., Cui, J. (2011). Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene film with manganese oxide OMS-2. *Solid State Sciences.*, (13(1)), 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.014>.

Отримано 17.07.2025

UDC 544.4:504

Iryna Makyeyeva¹, Olha Kyslova²

¹PhD, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

E-mail: makyeyeva.is@knutd.com.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>

Researcher ID: X-2580-2018. SCOPUS Author ID: 7003994762

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

E-mail: kislova.ov@knutd.com.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0223-1860>. Scopus Author ID: 22034723000

INFLUENCE OF ELECTROCHEMICALLY SYNTHESIZED MIXTURE Cu/Cu₂O/CuO ON THE DESTRUCTION OF POLYETHYLENE FILM

Photocatalytic degradation of polymeric materials in the presence of oxide material additives is a promising direction to reduce environmental pollution. The electrochemically synthesized composition consisting of Cu/Cu₂O/CuO microparticles is chemically stable. The ability to regulate the electrolysis conditions allows to vary its phase composition and crystal structure.

The study of the mixture influence on the rate of polyethylene film degradation under the sunlight irradiation by express method showed that the best results were demonstrated by samples with a mixture content of 3% under conditions of mechanical mixing and prolonged irradiation. The results obtained indicate the possibility of the Cu/Cu₂O/CuO composition using as a photocatalyst to accelerate the degradation of polyolefin materials under the influence of sunlight. It was established that the efficiency of the photocatalyst is significantly affected by the conditions of its introduction into the polymeric material, the intensity of mixing, the concentration of the active phase, and the duration of irradiation.

The Cu/Cu₂O/CuO heterosystem has a number of advantages when used as a photocatalyst, namely: low toxicity, environmental safety, activation by visible light radiation, low cost and easy availability. Further research is aimed at optimizing the synthesis conditions of the mixture, improving the methods of its introduction into polymer substrates and studying the mechanism of photogenerated processes that accompany the polyethylene film destruction. In addition, it is relevant to study the long-term stability of the catalyst, the prospects for its reuse and the photodegradation products impact on the environment.

Keywords: photocatalytic degradation; polyethylene film; Cu/Cu₂O/CuO composition; electrochemical methods; environmental protection.

Fig.: 3. Table: 2. References: 18.