

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПОТРЕБ ЕКОКАТАЛІЗУ

Ненастіна Т. О.<sup>1</sup>, Сахненко М. Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Анотація.** У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему створення ефективних каталітичних матеріалів для зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря в умовах трансформації енергетичного сектору та зростання використання автономних джерел живлення. Метою роботи є дослідження каталітичної активності електролітичних покриттів на основі перехідних металів у реакції окиснення карбон(II) оксиду до карбон(IV) оксиду з подальшим оцінюванням можливості їх застосування як альтернативи традиційним платиновим каталізаторам. Об'єктами дослідження були покриття складу  $Pd_{80}Ni_{20}$ ,  $Co_{80}Mo_{17}ZrO_2$  та  $Co_{82}Mo_{17}ZrO_2$ , отримані методом електролітичного осадження з водних розчинів електролітів. Установлено, що каталізатори, які містять благородні метали визначаються найнижчою температурою початку інтенсивного окиснення та забезпечують практично повну конверсію CO вже за умови 270–280 °C. Електролітичні композиційні покриття системи  $CoMoZrO_2$  демонструють високу каталітичну активність у середньотемпературному діапазоні, досягаючи 98–100 % перетворення, якщо 360–400 °C. Продемонстровано, що введення цирконію позитивно впливає на функціональні властивості матеріалів, сприяє стабілізації активних центрів і підвищенню кисневої мобільності, що інтенсифікує окисно-відновні процеси на поверхні. Досягнуті результати підтверджують перспективність використання електролітичних композиційних покриттів на основі перехідних металів як економічно доцільної альтернативи платиновим системам у процесах очищення газових викидів. Розроблені матеріали відповідають принципам сталого розвитку, сприяють зниженню шкідливих викидів і можуть бути інтегровані в сучасні еко- та енерготехнології для підвищення екологічної безпеки енергетичних установок.

**Ключові слова:** каталітичне окиснення, карбон(II) оксид, електролітичні покриття, метали,  $CoMoZrO_2$ ,  $PdNi$ , очищення газових викидів.

### Вступ

Співробітництво України з Європейським Союзом у сфері енергетики спрямоване на зміцнення енергетичної безпеки, підвищення конкурентоспроможності та забезпечення сталого розвитку держави [1, 2]. Одним із ключових напрямів цієї взаємодії є розвиток відновлюваної енергетики, альтернативних видів палива [3] й упровадження сучасних еко- та енерготехнологій, що відповідають принципам економічної доцільності та екологічної безпеки [4].

У контексті сталого розвитку особливого значення набувають екологічні технології – комплекс інженерних рішень, спрямованих на задоволення потреб суспільства за умови мінімального негативного впливу на довкілля. Вони поєднують принципи «екології техніки» й «техніки екології», передбачаючи раціональне використання ресурсів, зниження викидів забруднювачів, підвищення енергоефективності та впровадження систем очищення. Важливим напрямом є розвиток

водневої енергетики, паливних елементів і систем накопичення енергії, що дають змогу зменшити залежність від викопного палива й скоротити викиди парникових газів [5].

Особливої актуальності впровадження екологічних технологій набуває в умовах енергетичної нестабільності, коли внаслідок пошкодження енергетичної інфраструктури застосовуються графіки обмеження або аварійного відключення електроенергії. За таких умов значно зростає використання автономних джерел живлення – бензинових і дизельних генераторів. Хоча вони забезпечують тимчасову енергетичну незалежність, їх активна експлуатація супроводжується додатковими викидами карбон(II) оксиду (CO), оксидів нітрогену ( $NO_x$ ), твердих частинок і вуглеводнів, що погіршує якість атмосферного повітря, особливо в густонаселених міських районах.

Отже, питання енергетичної безпеки тісно пов'язане з екологічним складником. Тимчасові рішення, зокрема масове використання генераторів, не можуть розглядатися як дов-

гострокова стратегія розвитку. Альтернативою є впровадження комплексних екотехнологічних підходів: інтеграція відновлюваних джерел енергії із системами накопичення, застосування водневих технологій, використання каталітичних систем очищення викидів, а також розроблення нових матеріалів і покриттів [6] для підвищення ефективності енергетичних установок.

Розроблення бездефектних електролітичних покриттів для енергетичних і екологічних потреб можливе лише за умови комплексної узгодженості параметрів процесу синтезу, складу електроліту й фізико-хімічних властивостей сформованих матеріалів. Системний підхід до створення таких матеріалів дає змогу забезпечити їх високу каталітичну активність, довговічність і стабільність, що є важливим складником сучасних еко- й енерготехнологій.

Отже, поєднання енергетичної модернізації з екологічно орієнтованими технологічними рішеннями є необхідною умовою сталого розвитку України та її інтеграції до європейського енергетичного простору.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із розробленням ефективних каталітичних матеріалів для очищення газових викидів, зокрема від CO та інших летких органічних сполук. Традиційно в автомобільних і промислових нейтралізаторах застосовуються каталізatori на основі благородних металів, наприклад Pt, Pd і Rh, які визначаються високою активністю в реакціях окиснення та відновлення [7, 8]. Проте їх висока вартість і чутливість до каталізаторних отрут зумовлюють активний пошук альтернатив.

Значна кількість досліджень підтверджує перспективність оксидів перехідних металів, зокрема  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{MnO}_2$  й  $\text{CuO-CeO}_2$ , які демонструють високу активність у низькотемпературному окисненні CO [9–11]. Зокрема автори дослідження [9] продемонстрували високу ефективність наноструктурованого  $\text{Co}_3\text{O}_4$  в реакції повного окиснення CO за температур нижчих ніж 200 °C. Аналогічно для системи  $\text{CuO-CeO}_2$  завдяки кисневій мобільності церій оксиду забезпечують покращені окиснювальні властивості [10]. Перспективними також є перовськітоподібні оксиди ( $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ ,  $\text{LaMnO}_3$ ), яким властиві стабільність структури й здатність до оборотних окисно-відновних перетворень [11]. Такі

матеріали розглядаються як економічно доцільна альтернатива благородним металам.

Окрему групу становлять металеві та композиційні оксидно-металеві покриття, отримані електролітичним осадженням або методами тонкоплівкових технологій. Системи Co-Mo, Ni-Mo, Co-W та їх модифікації оксидами ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) визначаються розвиненою поверхнею, підвищеною термостійкістю та значною каталітичною активністю в реакціях окиснення CO [12–14]. Зокрема бінарні та багатокомпонентні Co-Mo-O-каталізatori демонструють синергетичний ефект, пов'язаний із зміною електронної структури активних центрів [13].

Крім того, наноструктуровані покриття, отримані методами *sol-gel*, фізичним осадженням з пари або хімічним осадженням з пари, забезпечують контроль морфології та високий ступінь дисперсності активної фази, що позитивно впливає на швидкість окиснення CO [14].

Отже, результати сучасних досліджень свідчать про можливість створення ефективних і економічно доступних каталітичних матеріалів на основі перехідних металів і композиційних покриттів, здатних частково або повністю замінити традиційні платинові каталізatori в процесах очищення газових викидів.

Розв'язанню цієї проблеми присвячено цю роботу.

#### Мета статті

Метою цієї статті є дослідження електролітичних каталітичних покриттів на основі перехідних металів для підвищення ефективності процесів окиснення карбон(II) оксиду для зниження рівня шкідливих викидів і впровадження екологічно безпечних енерготехнологій.

#### Методика

Електролітичні покриття сплавом Pd80Ni20 і композитами  $\text{Co}_80\text{Mo}_17\text{ZrO}_2\text{3}$ ,  $\text{Co}_82\text{Mo}_17\text{ZrO}_2\text{1}$  отримували методом електролітичного осадження з водного електроліту [15, 16], що містив солі кобальту та молибдену, а також дисперсну фазу діоксиду цирконію. Перед осадженням підкладки (сталева основа, Ст3) піддавали механічному шліфуванню, знежиренню, промиванню дистильованою водою та активації в слабкому кислотному середовищі.

Електроосадження здійснювали в гальваностатичному та імпульсному режимах за

умови густини струму  $i = 3\text{--}12 \text{ А/дм}^3$ . Температуру електроліту підтримували в межах  $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тривалість процесу електроосадження оптимізували з метою отримання покриттів заданої товщини, яка для всіх зразків дорівнювала  $25 \text{ мкм}$ . Товщину контролювали з використанням мікрометра.

Хімічний склад отриманих покриттів аналізували методом рентгенофлуоресцентного аналізу з використанням портативного спектрометра «СПРУТ». Вимірювання проводили щонайменше в трьох різних точках із подальшим усередненням результатів.

Каталітичну активність покриттів оцінювали в модельній реакції окиснення карбон(II) оксиду (CO) до карбон(IV) оксиду (CO<sub>2</sub>). Дослідження проводили в трубчастому проточному реакторі з кварцового скла, обладнаному електричною нагрівальною спіраллю та системою контролю температури.

Через реактор пропускали газову суміш повітря з концентрацією CO  $1,0 \text{ об.}\%$  зі швидкістю  $0,025 \text{ л/хв}$ . Температуру в реакторі поступово підвищували від  $20$  до  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  зі швидкістю нагрівання  $5\text{--}10 \text{ }^\circ\text{C/хв}$ . Температуру контролювали термопарою, розташованою в зоні каталізатора. Концентрацію CO на вході та виході з реактора визначали за допомогою сигналізаторів-аналізаторів «Дозор». Ступінь перетворення CO розраховували за такою формулою:

$$X(\text{CO}) = \frac{\varphi(\text{CO}_2) - \varphi(\text{CO})}{\varphi(\text{CO}_2)} 100\%,$$

де  $\varphi(\text{CO}_2)$  і  $\varphi(\text{CO})$  – об'ємні частки відповідних оксидів у суміші на виході з реактора.

Температуру початку реакції (температуру запалення) визначали як таку, за якої ступінь перетворення досягав  $10 \%$ . Температуру повного перетворення встановлювали в разі досягнення  $99 \%$  конверсії.

Для забезпечення достовірності досягнутих результатів кожен експеримент проводили щонайменше тричі за ідентичних умов. Експериментальні показники статистично обробляли з використанням критерію Стьюдента для довірчої ймовірності  $P = 0,95$ . Похибка вимірювання температури становила  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , а відносна похибка визначення ступеня перетворення (конверсії) не перевищувала  $5 \%$ , що відтворено на відповідних графіках у вигляді планок похибок (*error bars*). Облік систематичних похибок виконували способом попереднього калібрування газоаналізаторів за еталонними сумішами перед кожною серією вимірювань.

### Результати та їх обговорення

На рис. 1 подано температурні залежності ступеня перетворення CO ( $X(\text{CO})$ , %) у реакції його каталітичного окиснення на платині та електролітичних покриттях різного складу.

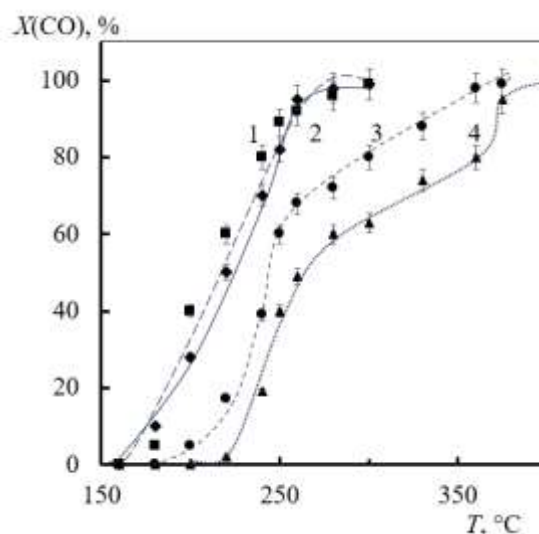


Рис. 1. Термограми окиснення CO на Pt (1) та електролітичних покриттях Pd80Ni20 (2), Co80Mo17ZrO<sub>2</sub>3 (3), Co82Mo17ZrO<sub>2</sub>1 (4)

Як видно з термограм, усі досліджені матеріали демонструють S-подібний характер залежностей, що є типовим для гетерогенно-каталітичних процесів окиснення. У низькотемпературній ділянці (до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) швидкість реакції є незначною через обмежену активацію кисню на поверхні каталізатора. Подальше підвищення температури призводить до різкого зростання ступеня перетворення CO, що відповідає досягненню температури «запалення» й переходу системи в режим ефективного каталізу.

Найнижча температура початку інтенсивного окиснення спостерігається для платини й сплаву Pd80Ni20. Для цих каталізаторів уже за температури  $240\text{--}260 \text{ }^\circ\text{C}$  ступінь перетворення CO перевищує  $90 \%$ , а в разі  $270\text{--}280 \text{ }^\circ\text{C}$  досягає практично повної конверсії. Висока активність цих систем зумовлена здатністю благородних металів ефективно адсорбувати й активувати молекулярний кисень і CO з утворенням реакційно-активних поверхневих комплексів.

Електролітичні композиційні покриття системи CoMoZrO<sub>2</sub> визначаються дещо вищими температурами запалення, проте забезпечують високий рівень конверсії в середньотемпературному інтервалі. Для зразка Co80Mo17ZrO<sub>2</sub>3 інтенсивне зростання  $X(\text{CO})$  спостерігається за умови  $220\text{--}230 \text{ }^\circ\text{C}$ , а сту-

пінь перетворення 98–100 % досягається, якщо 360–380 °С. Покриття  $\text{Co}_{82}\text{Mo}_{17}\text{ZrO}_2$  демонструє більш поступове зростання активності, і повна конверсія CO спостерігається за температур, близьких до 400 °С.

Досягнуті результати свідчать про важливу роль цирконію у формуванні активної поверхні. Імовірно, присутність  $\text{ZrO}_2$  сприяє стабілізації дисперсних активних центрів, підвищенню кисневої мобільності та формуванню дефектних структур, що інтенсифікують окисно-відновні процеси на межі поділу фаз. Молибден зі свого боку може брати участь у механізмі перенесення кисню, тоді як кобальт забезпечує активні центри адсорбції CO. Ці припущення узгоджуються з результатами досліджень інших авторів, які також наголошують на визначальній ролі оксидів перехідних металів і модифікуючих компонентів у формуванні дефектної структури, підвищенні рухливості кисню та активності в окисно-відновних процесах [17, 18].

Порівняльний аналіз демонструє, що хоча каталізатори з благородних металів забезпечують нижчу температуру запалення, композиційні покриття  $\text{CoMoZrO}_2$  за температур вищих ніж 350 °С демонструють активність і є цілком прийнятними для практичного застосування в сучасній енергетиці. З огляду на те, що температура вихлопних газів промислових дизель-генераторів і газопоршневих установок у номінальних режимах роботи зазвичай становить 450–600 °С, каталітична активність композиційних систем повністю вписується в робочий температурний діапазон реальних об'єктів. Зважаючи на значно нижчу вартість і можливість електролітичного формування покриттів на різних підкладках, такі матеріали можуть розглядатися як перспективна альтернатива платиновим каталізаторам у системах очищення газових викидів і низькотемпературного окиснення CO.

### Висновки

Унаслідок дослідження встановлено, що електролітичні сплави й композиційні покриття систем  $\text{Pd}_{80}\text{Ni}_{20}$  і  $\text{CoMoZrO}_2$  виявляють високу каталітичну активність у реакції окиснення карбон(II) оксиду. Визначено температурні інтервали ефективної роботи матеріалів та їх здатність забезпечувати високий ступінь перетворення CO у широкому діапазоні температур.

Доведено, що благороднометалеві каталізатори (Pt,  $\text{Pd}_{80}\text{Ni}_{20}$ ) мають найнижчу температуру «запалення» та забезпечують практи-

чно повну конверсію CO вже за умови 270–280 °С. Водночас синтезовані електролітичні покриття  $\text{CoMoZrO}_2$  демонструють зіставну ефективність у середньотемпературній ділянці, досягаючи 98–100 % перетворення в разі 360–400 °С. Встановлено позитивний вплив цирконію на каталітичні властивості композиційних систем, що пов'язано з підвищенням кисневої мобільності та стабілізацією активних центрів.

Зі збільшенням об'ємної швидкості газового потоку ступінь конверсії дещо зменшується, однак залишається на високому рівні (88–99 %), що свідчить про достатню стабільність і ефективність каталізаторів за інтенсивних умов експлуатації.

Досягнуті результати підтверджують можливість використання електролітичних композиційних покриттів як економічно доцільної альтернативи традиційним платиновим каталізаторам у системах очищення газових викидів і екотехнологіях зниження техногенного навантаження на атмосферу.

### Література

1. Zvarych R., Kharkovskiy B. SMART-integration of Ukraine's energy system into the single energy market of the EU: challenges and prospects. *Journal of European Economy*. 2025. Vol. 24. No. 2. P. 246–266. <https://doi.org/10.35774/jee2025.02.246>
2. Меморандум про взаєморозуміння щодо співробітництва у галузі енергетики. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_003-16#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_003-16#Text)
3. Kryl I. Hydrogen energy in Ukraine: preconditions, potential and prospects for European integration. *Economy of Industry*. 2024. No. 4. P. 122–136. <http://doi.org/10.15407/econindustry2024.04.049>
4. Zvarych R., Masna O. Ukraine's national policy on RES: analysis of international obligations and integration into European energy markets. *Herald of Economics*. 2025. No. 4. P. 122–136. <https://doi.org/10.35774/visnyk2024.04.122>
5. Руш О. С., Войтко С. В. Розвиток міжнародного співробітництва України та ЄС у сфері альтернативної енергетики. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 3 (82) С. 200–203. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.3.28>
6. Nenastina T. A., Ved' M. V., Sakhnenko N. D. et al. Effect of Electrolysis Conditions on the Composition and Microhardness of Ternary Cobalt Alloy Coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. No. 57. P. 59–66. <https://doi.org/10.3103/S1068375521010099>
7. Heck R. M., Farrauto R. J., Gulati S. T. Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology. 3<sup>rd</sup> ed. Wiley. *Platinum Metals Review*. 2010.

- P. 180–183. [https://doi.org/10.1595/14710\\_6710\\_X511015](https://doi.org/10.1595/14710_6710_X511015)
- Ved M., Sakhnenko M., Nenastina T. Corrosion and catalytic properties of galvanic binary d<sup>6-8</sup> metal alloys. *Physicochemical Mechanics of Material*. 2008. No. 7. P. 346–353.
  - Xie X., Li Y., Liu Z.-Q., Haruta M., Shen W. Low-temperature oxidation of CO catalysed by Co(3)O(4) nanorods. *Nature*. 2009. Vol. 458. P. 746–749. <https://doi.org/10.1038/nature07877>
  - Liu X., Zhou K., Wang L., Wang B., Li Y. Oxygen vacancy clusters promoting reducibility and activity of ceria nanorods. *Journal of the American Chemical Society*. 2009. Vol. 131 (9). P. 3140–1. DOI: 10.1021/ja808433d
  - Peña M. A., Fierro J. L. G. Chemical structures and performance of perovskite oxides. *Chemical Reviews*. 2001. Vol. 101. P. 1981–2017.
  - Trasatti S. Electrocatalysis in the anodic evolution of oxygen and chlorine. *Electrochimica Acta*. 1984. Vol. 29. Is. 11. P. 1503–1512. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(84\)85004-5](https://doi.org/10.1016/0013-4686(84)85004-5)
  - Liotta L. F. Catalytic oxidation of volatile organic compounds on supported noble metals. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010. Vol. 100. P. 403–412. DOI: 10.1016/j.apcatb.2010.08.023
  - Scott L. Swartz. Catalysis by Ceria and Related Materials Edited by Alessandro Trovarelli (Università di Udine, Italy). Catalytic Science Series. Vol. 2. Series Edited by Graham J. Hutchings. *Journal of the American Chemical Society*. 2002. 124(43):12923-12924 DOI: 10.1021/ja025256e
  - Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., and Nenastina T. Composition electrolytic coatings with given functional properties. *Applied Surface Science*, London: InTechOpen, 2019. P. 93–109. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84519>
  - Ведь М. В., Сахненко М. Д., Штефан В. В., Ненастіна Т. О., Байрачна Т. М., Желавський С. Г. Функціональні покриття сплавами d<sup>4-8</sup> елементів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічні технології та екологія*. 2008. № 15. С. 25–31.
  - Bulavchenko O. A., Konovalova V. P., Sarav A. A., Kremneva A. M., Rogov V. A., Gerasimov E. Yu., Afonassenko T. N. The Catalytic Performance of CO Oxidation over MnOx-ZrO<sub>2</sub> Catalysts: The Role of Synthetic Routes. *Catalysts*. 2023. 13(1). 57. <https://doi.org/10.3390/catal13010057>
  - Lin Ch. H., Sun Z. Y., Liu C. G. Mars-van Krevelen mechanism for CO oxidation on the polyoxometalates-supported Rh single-atom catalysts: An insight from density functional theory calculations. *Molecular Catalysis*. 2021. Vol. 512. 111761. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111761>
  - Zvarych R., Kharkovskiy B. SMART-integration of Ukraine's energy system into the single energy market of the EU: challenges and prospects. *Journal of European Economy*. 2025. Vol. 24. No. 2. P. 246–266. <https://doi.org/10.35774/jee2025.02.246>
  - Memorandum of understanding on a Strategic Energy Partnership. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_003-16#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_003-16#Text)
  - Kryl I. Hydrogen energy in Ukraine: preconditions, potential and prospects for European integration. *Economy of Industry*. 2024. No. 4. P. 122–136. <http://doi.org/10.15407/econindustry2024.04.049>
  - Zvarych R., Masna O. Ukraine's national policy on RES: analysis of international obligations and integration into European energy markets. *Herald of Economics*. 2025. No. 4. P. 122–136. <https://doi.org/10.35774/visnyk2024.04.122>
  - Rush O. S., Voitko S. V. Rozvytok mizhnarodnoho spivrobitnytstva Ukrainy ta YeS u sferi alternatyvnoi enerhetyky. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2022. No. 3 (82) P. 200–203. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.3.28>
  - Nenastina T. A., Ved' M. V., Sakhnenko N. D. et al. Effect of Electrolysis Conditions on the Composition and Microhardness of Ternary Cobalt Alloy Coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57. P. 59–66. <https://doi.org/10.3103/S1068375521010099>
  - Heck R. M., Farrauto R. J., Gulati S. T. Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology. 3<sup>rd</sup> ed. Wiley. *Platinum Metals Review*. 2010. P. 180–183. <https://doi.org/10.1595/147106710X511>
  - Ved M., Sakhnenko M., Nenastina T. Corrosion and catalytic properties of galvanic binary d<sup>6-8</sup> metal alloys. *Physicochemical Mechanics of Material*. 2008. No. 7. P. 346–353.
  - Xie X., Li Y., Liu Z.-Q., Haruta M., Shen W. Low-temperature oxidation of CO catalysed by Co(3)O(4) nanorods. *Nature*. 2009. Vol. 458. P. 746–749. <https://doi.org/10.1038/nature07877>
  - Liu X., Zhou K., Wang L., Wang B., Li Y. Oxygen vacancy clusters promoting reducibility and activity of ceria nanorods. *Journal of the American Chemical Society*. 2009. Vol. 131 (9). P. 3140–1. DOI: 10.1021/ja808433d
  - Peña M. A., Fierro J. L. G. Chemical structures and performance of perovskite oxides. *Chemical Reviews*. 2001. Vol. 101. P. 1981–2017.
  - Trasatti S. Electrocatalysis in the anodic evolution of oxygen and chlorine. *Electrochimica Acta*. 1984. Vol. 29. Is. 11. P. 1503–1512. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(84\)85004-5](https://doi.org/10.1016/0013-4686(84)85004-5)
  - Liotta L. F. Catalytic oxidation of volatile organic compounds on supported noble metals. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010. Vol. 100. P. 403–412. DOI: 10.1016/j.apcatb.2010.08.023
  - Scott L. Swartz. Catalysis by Ceria and Related Materials Edited by Alessandro Trovarelli (Università di Udine, Italy). Catalytic Science Series. Vol. 2. Series Edited by Graham J. Hutchings. *Journal of the American Chemical Society*. 2002. 124(43):12923-12924 DOI: 10.1021/ja025256e
  - Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., and Nenastina T. Composition electrolytic coatings with given functional properties. *Applied*

- Surface Science*, London: InTechOpen, 2019. P. 93–109. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84519>
16. Ved M. V., Sakhnenko M. D., Shtefan V. V., Nenastina T. O., Bairachna T. M., Zhelavskiy S. H. Funktsionalni pokryttia splavamy d4-8 elementiv. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Khimiia, khimichni tekhnolohii ta ekolohiia*. 2008. № 15. P. 25–31.
17. Bulavchenko O. A., Konovalova V. P., Saraev A. A., Kremneva A. M., Rogov V. A., Gerasimov E. Yu., Afonassenko T. N. The Catalytic Performance of CO Oxidation over MnO<sub>x</sub>-ZrO<sub>2</sub> Catalysts: The Role of Synthetic Routes. *Catalysts*. 2023. 13(1). 57. <https://doi.org/10.3390/catal13010057>
18. Lin Ch. H., Sun Z. Y., Liu C. G. Mars-van Krevelen mechanism for CO oxidation on the polyoxometalates-supported Rh single-atom catalysts: An insight from density functional theory calculations. *Molecular Catalysis*. 2021. Vol. 512. 111761. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111761>

**Ненастіна Тетяна Олександрівна**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри хімії та хімічної технології, тел. (057) 707-36-52, [chemistry@khadi.kharkov.ua](mailto:chemistry@khadi.kharkov.ua), ORCID: 0000-0001-6108-4023;

**Сахненко Микола Дмитрович**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри фізичної хімії, тел. (057) 707-63-27, [sakhnenko@kpi.kharkov.ua](mailto:sakhnenko@kpi.kharkov.ua).

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

### **Optimization of electrolytic composite materials for eco-catalytic applications**

**Abstract. Problem.** The article addresses the relevant scientific and applied problem of developing efficient catalytic materials to reduce anthropogenic impact on atmospheric air under conditions of transformation of the energy sector and increasing use of autonomous power sources. In the context of energy instability and infrastructure damage, the operation of gasoline and diesel generators has significantly increased, resulting in additional emissions of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), unburned hydrocarbons, and particulate matter. This situation highlights the urgent need for the implementation of modern eco-technologies for exhaust gas purification, particularly through the development of new catalytic systems capable of operating at reduced temperatures while ensuring a high conversion rate of toxic components.

**Methodology.** The aim of this work is to investigate the catalytic activity of electrolytic composite coatings based on transition metals in the oxidation reaction of carbon monoxide to carbon dioxide and to assess their potential application as an alternative to conventional platinum catalysts. The objects of study were coatings with compositions Pd<sub>80</sub>Ni<sub>20</sub>, Co<sub>80</sub>Mo<sub>17</sub>ZrO<sub>2</sub>3, and

Co<sub>82</sub>Mo<sub>17</sub>ZrO<sub>2</sub>1, obtained by electrolytic deposition from aqueous electrolytes. Prior to deposition, the substrates underwent standard surface preparation. The chemical composition of the coatings was controlled using X-ray fluorescence analysis. Catalytic tests were carried out in a tubular flow reactor within the temperature range of 20–450 °C at a CO concentration of 1.0 vol.% and a controlled gas flow rate. The degree of CO conversion was determined based on measurements of reactant and product concentrations at the reactor inlet and outlet. The ignition temperature was defined as the temperature corresponding to 10% conversion, while the temperature of complete conversion was taken at 99 %. **Originality.** It was established that noble-metal catalysts (Pt, PdNi) exhibit the lowest temperature of intensive oxidation onset and provide nearly complete CO conversion already at 270–280 °C. At the same time, electrolytic composite coatings of the CoMoZrO<sub>2</sub> system demonstrate high catalytic activity in the medium-temperature range, achieving 98–100 % conversion at 360–400 °C. The introduction of zirconium was shown to positively influence the structural and functional properties of the materials, contributing to the stabilization of active centers and enhanced oxygen mobility, which intensifies redox processes on the surface. The obtained results confirm the potential for using electrolytic composite coatings based on transition metals as a cost-effective alternative to platinum systems in exhaust gas purification processes. The developed materials comply with the principles of sustainable development, contribute to the reduction of harmful emissions, and can be integrated into modern eco- and energy technologies to improve the environmental safety of power installations.

**Keywords:** catalytic oxidation, carbon(II) oxide, electrolytic coatings, metals, CoMoZrO<sub>2</sub>, PdNi, gas emission purification.

**Nenastina Tetiana**<sup>1</sup>, Dr. Sci., prof., The department of Chemistry and Chemical Technology, tel. (057) 707-36-52, [chemistry@khadi.kharkov.ua](mailto:chemistry@khadi.kharkov.ua);

**Sakhnenko Mykola**<sup>2</sup>, Dr. Sci., Prof., department of physical chemistry, tel. (057) 707-63-27, [sakhnenko@kpi.kharkov.ua](mailto:sakhnenko@kpi.kharkov.ua);

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpichova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received: 08.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 17.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.