

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.4>

УДК 544.47

КИСЛОВА О. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАНОКАТАЛІЗАТОРІВ

**Мета.** Узагальнити інформацію про особливості будови та властивості нанокаталізаторів, принцип їх дії, ефективність, специфічність, переваги застосування та перспективні напрямки розвитку.

**Методика.** Аналіз літературних даних щодо залежності властивостей нанокаталізаторів від їх просторової розмірності, впливу особливостей структури на ефективність нанокаталізу, перспектив розвитку.

**Результати.** Нанокаталізатори характеризуються сукупністю специфічних фізичних та хімічних властивостей, які обумовлені суттєвим зростанням їх питомої поверхні внаслідок зменшення розмірів часточок, зміною кристалічної структури та будови електронних рівнів. Механізм дії нанокаталізаторів відрізняється від дії класичних каталізаторів. На ефективність каталізу значно впливає розмір наночастинок та їх взаємодія з носієм. Активні центри нанокаталізаторів мають неоднорідну поверхню та ненасичені валентні зв'язки, які сприяють легкому протіканню електронного або протонного обміну. Широкого застосування набувають нанокаталізаторні матеріали на основі нанокластерів металів та модифікованих поліелектролітів, вуглецевих матеріалів, цеолітів, які стабілізують структуру нанооб'єктів та збільшують їх каталітичну активність.

**Наукова новизна.** Аналіз літературних даних показав, що ефективність дії нанокаталізаторів залежить від просторової розмірності нанооб'єктів, наявності дефектів у їх структурі. Створення композитних наноматеріалів дозволяє стабілізувати наночастинки каталізаторів, зберегти їх унікальні властивості та технологічно модифікувати організацію каталітичних процесів.

**Практична значимість.** Нанокаталітичні системи дають можливість реалізовувати хіміко-технологічні процеси з більшою ефективністю, меншими енерговитратами та за вищими екологічними вимогами. Сучасні методи одержання нанокаталізаторів з оптимальними структурними та розмірними характеристиками сприяють підвищенню їх активності, селективності, зниженню собівартості.

**Ключові слова:** нанокаталітичні системи; просторова розмірність; поверхневі атоми; композитні наноматеріали.

**Вступ.** Каталізатори відіграють значну роль в оптимізації технологічних процесів, оскільки сприяють підвищенню ефективності умов їх проведення, знижують собівартість продукції. Сучасний етап розробки нових каталізаторів полягає в застосуванні нанооб'єктів, які характеризуються значною зміною фізичних та хімічних властивостей, наявністю значної частки поверхневих атомів, підвищеною реакційною здатністю [1, 2].

Дослідження каталітичної дії дрібнодисперсних частинок, зокрема благородних металів, розпочалось ще в середині минулого століття. Проте особливий інтерес до нанокаталізаторів з'явився після досліджень Nagata та його колег, які показали, що на відміну від звичайного золота окиснення киснем карбон(II) оксиду в присутності наночастинок золота розміром менше 5 нм протікає навіть при температурі до  $-70^{\circ}\text{C}$  [3].

Суттєва відмінність нанокаталізу пов'язана зі значним зростанням питомої поверхні каталізатора внаслідок зменшення розміру реакційноздатних частинок, зміною будови електронних рівнів, комплексом специфічних властивостей (теплових, магнітних, оптичних, адсорбційних, електрохімічних). Причиною виникнення таких розмірних ефектів є сумірність розмірів наночастинок з радіусом дії міжатомних сил. Комплексом зазначених специфічних властивостей володіють також композитні матеріали, до складу яких входять окремі ізольовані наночастинки [4].

Практичне застосування знайшли нанокластери перехідних металів, які закріплені на матриці органічної або неорганічної природи. Зокрема, каталізатори, що містять нанокластери Cu, Pd, Ni, Fe, Co використовуються у нафтохімічній промисловості в процесах гідрування, ізомеризації; наноструктури благородних металів – в електроніці для виробництва провідних покриттів; Pt, Pd – для відновлення кисню в паливних елементах; Al – для створення нового покоління сенсорної та конструкційної кераміки, сорбентів; Co, Ni в складі композитного каталізатора з TiO<sub>2</sub> – для видалення сірки з нафтопродуктів, синтезу органічних сполук [5, 6]. Мікропористі цеоліти застосовуються для селективного органічного синтезу (зокрема реакцій ізомеризації) [7], а різні типи нановуглецевих каталізаторів ефективні для окиснення сульфідів і тіолів, алкілування аренів, фотокаталітичного виробництва водню з води, перетворення CO<sub>2</sub> на метанол та інших [8].

**Постановка завдання.** Систематизувати дані щодо структурних та функціональних особливостей нанокаталізаторів, їх ефективності, чутливості, селективності, способів стабілізації, перспектив розвитку, переваг композитних каталітичних систем нового покоління на основі вуглецевісних, модифікованих полімерних та інших наноматеріалів.

**Результати дослідження.** Ефективні каталізатори характеризуються сукупністю наступних властивостей:

- 1) високою активністю (здатність збільшувати швидкість реакції);
- 2) селективністю;
- 3) стійкістю (термін його придатності);
- 4) здатністю до регенерації.

Особливістю нанорозмірних частинок, що впливає на їх фізичні та хімічні властивості, є зростання відносної частки поверхневих атомів. Відомо, що чим меншою є кількість атомів, що утворюють наночастинку, тим більший відсоток атомів у її складі розташований на поверхні. Розраховано, що у наночастинок діаметром 3 нм приблизно 50% всіх атомів належать поверхневому шару. Такі атоми або молекули оточені меншою кількістю сусідів, мають вільні ненасичені зв'язки та інші координаційні числа, симетрію локального оточення, характер взаємодії порівняно з атомами, розташованими в об'ємі речовини. В результаті зв'язки між поверхневими і підповерхневими атомами (або молекулами) стають слабкішими [9, 10].

При переході від макроскопічного тіла до кластерів нанорозмірних частинок у валентній зоні та в зоні провідності з'являються дискретні рівні, відстань між якими визначається розміром частинок. Це викликає збільшення реакційної здатності речовин, а також зміну їх властивостей, насамперед магнітних та електричних, зумовлених поведінкою електронів [4]. Оскільки розміри та просторова будова істотно впливає на фізичні та хімічні властивості нанооб'єктів, важливою є класифікація за їх просторовою розмірністю, яку наведено в табл. 1.

Зі зміною ступеня дисперсності частинок каталізатора до нанорозмірного діапазону загальна швидкість реакції зростає внаслідок значного збільшення площі реакційної поверхні. Проте при зменшенні розміру наночастинок нижче деякого значення суттєво знижується каталітична активність у розрахунку на одиницю поверхні, що обумовлює в результаті екстремальну залежність каталітичної активності матеріалу від розміру наночастинок [11]. В роботі Т. Імаока та інших показано, що в реакції відновлення кисню, яка грає важливу роль в перетворенні енергії в паливних елементах, каталітичну дію виявляють нанокластери благородних металів (Pt, Pd, Rh), кожний з яких має певну кількість атомів (від 12 до 20) та характеризуються оптимальною температурою [12]. Висока каталітична активність нанокластерів родію, що складалась з 20 атомів, була виявлена при дослідженні U. Heiz з колегами реакції окиснення карбон (II) оксиду при температурі 350 К, тоді як кластери з 8

атомів виявляли мінімальну каталітичну активність і реакція протікала з вищою енергією активації [13].

Таблиця 1

**Характеристика нанокаталізаторів відповідно до просторової розмірності**

Тип нано-каталізатору	Просторова розмірність	Приклади
Нанодисперсні матеріали (до 10 нм)	0 D-вимірні (квазінуль-вимірні)	Нанопорошки, нанокристали, квантові точки: кераміка, метали (Au, Ag, Cu, Pt, Pd, Fe, Ni, Co та ін.), сплави на їх основі. Таким об'єктам властиве квантування, тобто розрив неперервності властивостей, що типово для структур атомно-молекулярного рівня.
Наноструктуровані матеріали (10–100 нм)	1 D-вимірні квазіодно-вимірні	Металеві нанодропи, нанострижні, одно- та багатостінні вуглецеві або полімерні нанотрубки, нанострічки, нановолокна. Їх довжина значно перевищує діаметр. Це наноструктури вуглецю, металів (Cu, Au, Ag, Ni, Pb), оксидів (TiO <sub>2</sub> , ZnO, SiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , MnO <sub>2</sub> , V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), нітридів (BN, AlN, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ).
Плівкові наноструктуровані матеріали	2 D-вимірні квазідво-вимірні	Надтонкі моно- та мультишарові наноплівки, наномембрани. Наноплівки органічної природи виявляють оптичні, електричні, оптоелектричні, механічні та хімічні властивості. Такі плівки можна порівняно легко модифікувати специфічними функціональними групами та змінити їх властивості.
Об'ємні наноструктуровані матеріали	3 D-вимірні квазітри-вимірні	Багатошарові структури, нанокластери, нанопористі матеріали. Вони характеризуються великою гнучкістю і легко змінюють форму під впливом зовнішніх факторів (тиск, температура, освітлення, розчинник).

Реакції фотокаталітичного розкладу води на нанострижнях CdS в присутності нанокластерів платини з кількістю атомів від 8 до 68 досліджено в роботі F. Schweinberger з'ясовано, що максимальне виділення водню спостерігалось у присутності кластера Pt<sub>46</sub> [14].

Отже, розмір кластера та його електронна структура визначають каталітичну активність. Взаємодія атомних кластерів з поверхнею носія здатні перешкоджати їх агрегації. Для стабілізації нанокластерів металів їх наносять на твердий носій (наприклад, тонку плівку оксидів MgO, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, вуглецевих та полімерних матеріалів). Товщина плівки та її структура, а також геометрія нанокластера на носії значно впливають на властивості каталізатора. Найбільш активними є кластери, які розташовані поблизу точкових дефектів плівки [4, 15]. Тому каталітичну активність можна збільшити, контролюючи не лише розмір кластера, але і його взаємодію з носієм.

Зокрема, в роботі T. Kawawaki та колег досліджено видалення лігандів із захищених 2-фенілетантіолатом металевих нанокластерів золота Au<sub>25</sub> з одночасним запобіганням їх агрегації. Показано, що процес десорбції ліганду складається з дисоціації ліганду на поверхні металевих нанокластерів, адсорбції утворених сполук на носії та наступній їх десорбції, а також визначено оптимальні температури, при яких відбувалися ці процеси [16]. Результатом роботи є створення високоактивного та стабільного фотокаталізатора в процесі розщеплення води.

Відомо, що активність різних кристалографічних площин металів може суттєво відрізнятись. Найбільшу каталітичну активність мають кристалографічні площини з невеликими індексами, які характеризуються покращеними умовами адсорбції. Активні центри нанокаталізаторів можна розглядати як групи атомів, які мають слабкі зв'язки з

поверхнею. Наявність у них ненасичених валентних зв'язків сприяє легкому протіканню електронного або протонного обміну [4, 10].

Для створення сучасних каталітичних систем широко використовуються вуглецеві наноматеріали, які мають переважно  $sp^2$  – тип гібридизації: нанотрубки, нановолокна та фулерени, вуглець-вуглецеві композиційні матеріали. Серед їх переваг слід зазначити наступні: більша активність, високі значення сумарного об'єму пор та питомої площі поверхні, можливість контролю за розподілом пор за розмірами в процесі синтезу та простота вилучення активних компонентів з відпрацьованих каталізаторів шляхом спалювання вуглецевої матриці, відносна хімічна інертність поверхні, що значно зменшує перебіг побічних реакцій, відповідність екологічним вимогам, можливість їх багаторазового використання без істотної втрати активності. Формування структури композитних вуглецевих матеріалів залежить від умов синтезу. Це відкриває можливість варіювати структуру вуглецевих матеріалів в широкому діапазоні шляхом зміни співвідношення атомів Карбону, що знаходяться в різних гібридних станах, та отримати сполуки з необхідними властивостями. В роботі А. Dasgupta та колег показано, що вуглецеві носії істотно відрізняються від носіїв на основі оксидів природою та кількістю функціональних груп на поверхні, термічною стабільністю. Ці відмінності впливають на характер взаємодії активного компонента та носія, доступність поверхні носія при обробці, дисперсність активних компонентів та визначають унікальність вуглецевмісних каталізаторів [17].

L. Zhang та співавтори проаналізували механізми збільшення каталітичної активності для різних типів нановуглецевих матеріалів (вуглецевих нанотрубок, матеріалів на основі графену та 3D-пористих нановуглеців) шляхом введення кільцевих структур, дефектів, легування гетероатомами, іммобілізації окремих атомів металу або окиснення поверхні. Перспективною стратегією є розробка тривимірної морфології пористого вуглецю з великою кількістю доступних активних центрів для транспорту/дифузії речовин [8].

Головною особливістю нових каталітичних систем є те, що і вуглецевмісний носій, і нанесений на його поверхню метал, складаються з частинок нанорозмірного діапазону. Так, дослідження проведені Т.А. Hansu та колегами показали, що каталізатори на основі вуглецевих нанотрубок та наночастинок металів Pt, Pd, Ni виявили високу активність у процесах селективного гідрування та гідроочищення [18]. Проте відсутність потужного промислового виробництва вуглецевих наноматеріалів стримує розвиток їх широкого застосування.

Для стабілізації наночастинок металів та модифікації їх оточення застосовують також поліелектроліти з різними зарядами. Використання полімерних матриць (наприклад, з поліетиленгліколю, полівінілпіролідону та поліакрилонітрилу) як носіїв у каталізі дозволяє контролювати процеси формування частинок за рахунок наявності нанорозмірних порожнин високого ступеня дисперсності. В роботі А. Saha та колег [19] показано, що для синтезу нанокаталізаторів на основі наночастинок металів, стабілізованих у міцелах амфіфільних блок-співполімерів, необхідно, щоб один із блоків містив функціональні групи ( $-NH_2$ ,  $-OH$ ,  $-COOH$ ), здатні реагувати зі сполуками металів з утворенням комплексу або солі. Вибір відновника також безпосередньо впливає на каталітичну активність і селективність нанокаталізатора. М. Vengatesan та V. Mittal [20] дослідили, що використання лігандів ( $-NH_2$ ,  $-OH$ ,  $-Cl$ ,  $-SH$ ,  $-COOH$ ) для модифікації поверхні нерозчинних поліелектролітів може змінити мікрооточення навколо поверхні металевих наночастинок та призводить до покращення міжфазного перенесення електронів та стабілізації проміжних сполук.

Іншим типовим прикладом високоселективних каталізаторів є мікропористі кристалічні алюмосилікати (цеоліти) – змішані оксиди алюмінію, кремнію та лужних або лужноземельних металів, які можуть містити кристалізаційну воду. Для цих сполук описано S. Abdo та S. Wilson [7] технології спрямованого синтезу з заданими нанометровими

розмірами каналів та порожнин. У них можуть розміщуватися йони або нейтральні молекули та протікати хімічні реакції. Такі каталізатори є особливо перспективними для селективного синтезу органічних сполук-ізомерів з визначеною просторовою будовою, яка структурно відповідає розмірам та конфігурації каналів цеоліту. Так, в роботі E. Gallego та інших [21] досліджено реакцію ізомеризації етилбензолу в ксилол за участю синтезованих селективних цеолітів як каталізаторів.

Цеоліти також використовують як тверді носії в складі композитних матеріалів. D. Xu та співавтори [22] вивчали активність каталізаторів на основі цеолітів з впорядкованими мезопорами, всередині каркасу яких іммобілізовано наночастинки перехідних металів. Спостерігалась підвищена активність таких каталізаторів в реакціях органічного синтезу порівнянно з іншими наноматеріалами-носіями (оксиди металів, вуглецеві та полімерні матеріали). Цеоліти, що містять нанорозмірні порошки металів (нікель, кобальт) володіють біфункціональними властивостями: за участю кислотних центрів цеоліту йдуть реакції крекінгу, ізомеризації, ароматизації, а активні центри, що містять катіони модифікуючих металів, сприяють інтенсифікації реакцій перенесення Гідрогену.

L. Liu та його колеги [23] розробили нову стратегію високотемпературної окисно-відновної генерації окремих атомів і кластерів Pt та їх стабілізації під час трансформації двовимірного цеоліту в трьохвимірний, які виявляють селективні каталітичні властивості, обумовлені розміром пор, в реакціях гідрування і дегідрування алкенів.

**Висновок.** Пошук нових каталітичних систем, що дозволяють реалізовувати хіміко-технологічні процеси з більшою ефективністю, селективністю, меншими енерговитратами та за вищими екологічними вимогами, є нагальним завданням. Останнім часом значну увагу приділено створенню нових гетерогенних каталізаторів на основі унікальних електронно-геометричних структур малих металевих нанокластерів. Основні завдання полягають в розробці нанокompозитних матеріалів, які утримують наночастинки металів від агрегації, втрати їх унікальних властивостей, а також модифікують організацію каталітичних процесів. Для створення таких нанокompозитів широко застосовуються матеріали неорганічного (вуглецеві матеріали, цеоліти) та органічного (модифіковані полімерні матеріали) походження.

Сучасні методи синтезу дають можливість отримувати носії з заданими нанометровими розмірами каналів та порожнин, у яких можуть розміщуватися йони або нейтральні молекули та протікати селективні хімічні реакції. Оскільки активність каталізаторів за участю наночастинок металів можна збільшити, контролюючи не тільки розмір кластерів, але й взаємодію між нанокластерами та носієм, тому перспективним напрямком є впровадження нових методів одержання каталізаторів з оптимальними структурними та розмірними характеристиками з метою підвищення їх активності, селективності та довгострокової стабільної роботи.

## References

1. Astruc, D. (2020). Introduction: Nanoparticles in Catalysis. *Chem. Rev.*, 120, 2: 461–463. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00696
2. Wang, A., Li, J., Zhao, T. (2018). Heterogeneous Single Atom Catalysis. *Nat. Rev. Chem.*, 2: 65–81. DOI: 10.1038/s41570-018-0010-1.
3. Haruta, M., Kobatashi, T., Sano, H., Yamada, N. (1987). Novel gold catalysts for the oxidation of carbon monoxide at a temperature far below 0°C. *Chem. Lett.*, 16: 405–408.

## Література

1. Astruc D. Introduction: Nanoparticles in Catalysis. *Chem. Rev.* 2020. 120 (2). P. 461–463. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00696.
2. Wang A., Li J., Zhao T. Heterogeneous Single Atom Catalysis. *Nat. Rev. Chem.* 2018. No. 2. P. 65–81. DOI: 10.1038/s41570-018-0010-1.
3. Haruta M., Kobatashi T., Sano H., Yamada N. Novel gold catalysts for the oxidation of carbon monoxide at a temperature far below 0°C. *Chem. Lett.* 1987. No. 16. P. 405–408.

4. Daniel, M.-C., Astruc, D. (2004). Gold Nanoparticles: Assembly, Supramolecular Chemistry, Quantum-Size-Related Properties, and Applications toward Biology, Catalysis, and Nanotechnology. *Chem. Rev.*, 104: 293–346.
5. Sápi, A., Rajkumar, T., Kiss, J. et al. (2021). Metallic Nanoparticles in Heterogeneous Catalysis. *Catal. Lett.*, 151: 2153–2175. DOI: 10.1007/s10562-020-03477-5.
6. Qiao, B., Wang, A., Yang, X., Allard, L. F., Zheng, J., Cui, Y., Liu, J., Li, J., Zhang, T. (2011). Single-atom catalysis of CO oxidation using Pt1/FeO<sub>x</sub>. *Nat. Chem.*, 3: 634–641. DOI: 10.1038/nchem.1095.
7. Abdo, S. F., Wilson, S. T. (2017). Zeolites in Industrial Catalysis. *Zeolites in Catalysis: Properties and Applications. Royal Society of Chemistry: UK*, Ch. 9: 310–350.
8. Zhang, L., Shi, Y., Wang, Y., Shiju, N. (2020). Nanocarbon Catalysts: Recent Understanding Regarding the Active Sites. *Adv. Sci.*, 7(5): 1–14. DOI: 10.1002/advs.201902126.
9. Liu, L., Corma, A. (2018). Metal Catalysts for Heterogeneous Catalysis: From Single Atoms to Nanoclusters and Nanoparticles. *Chem. Rev.*, 118: 4981–5079. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00776.
10. Kwangjin, A., Somorjai, G. A. (2012). Size and Shape Control of Metal Nanoparticles for Reaction Selectivity in Catalysis. *ChemCatChem. Special Issue: Synthesis of Nanocatalysts*, 4 (10): 1512–1524. DOI: [10.1002/cctc.201200229](https://doi.org/10.1002/cctc.201200229).
11. Watanabe, Y. (2014). Atomically Precise Cluster Catalysis Towards Quantum Controlled Catalysts. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 15(6): 2–13. DOI: [10.1088/1468-6996/15/6/063501](https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/6/063501).
12. Imaoka, T., Kitazawa, H., Chun, W.-J., Yamamoto, K. (2015). Finding the Most Catalytically Active Platinum Clusters with Low Atomicity. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 54: 9810–9815. DOI: 10.1002/anie.201504473.
13. Heiz, U., Sanchez, A., Abbet, S., Schneider, W. (2000). Tuning the oxidation of carbon monoxide using nanoassembled model catalysts. *Chem. Phys.*, 262: 189–200.
14. Schweinberger, F. et al. (2013). Cluster size effects in the photocatalytic hydrogen evolution reaction. *J. Am. Chem. Soc.*, 135(36): 13262–13265. doi/10.1021/ja406070q.
4. Daniel M.-C., Astruc D. Gold Nanoparticles: Assembly, Supramolecular Chemistry, Quantum-Size-Related Properties, and Applications toward Biology, Catalysis, and Nanotechnology. *Chem. Rev.* 2004. Vol. 104. P. 293–346.
5. Sápi A., Rajkumar T., Kiss J. et al. Metallic Nanoparticles in Heterogeneous Catalysis. *Catal. Lett.* 2021. Vol. 151. P. 2153–2175. DOI: 10.1007/s10562-020-03477-5.
6. Qiao B., Wang A., Yang X., Allard L. F., Zheng J., Cui Y., Liu J., Li J., Zhang T. Single-atom catalysis of CO oxidation using Pt1/FeO<sub>x</sub>. *Nat. Chem.* 2011. Vol. 3. P. 634–641. DOI: 10.1038/nchem.1095.
7. Abdo S. F., Wilson S. T. Zeolites in Industrial Catalysis. *Zeolites in Catalysis: Properties and Applications. Royal Society of Chemistry: UK*. 2017. Ch. 9. P. 310–350.
8. Zhang L., Shi Y., Wang Y., Shiju N. Nanocarbon Catalysts: Recent Understanding Regarding the Active Sites. *Adv. Sci.* 2020. Vol. 7(5). P. 1–14. DOI: 10.1002/advs.201902126.
9. Liu L., Corma A. Metal Catalysts for Heterogeneous Catalysis: From Single Atoms to Nanoclusters and Nanoparticles. *Chem. Rev.* 2018. Vol. 118, P. 4981–5079. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00776.
10. Kwangjin A., Somorjai G. A. Size and Shape Control of Metal Nanoparticles for Reaction Selectivity in Catalysis. *ChemCatChem. Special Issue: Synthesis of Nanocatalysts*. 2012. Vol. 4 (10). P. 1512–1524. DOI: [10.1002/cctc.201200229](https://doi.org/10.1002/cctc.201200229).
11. Watanabe Y. Atomically Precise Cluster Catalysis Towards Quantum Controlled Catalysts. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2014. 15(6). P. 2–13 DOI: [10.1088/1468-6996/15/6/063501](https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/6/063501).
12. Imaoka T., Kitazawa H., Chun W.-J., Yamamoto K. Finding the Most Catalytically Active Platinum Clusters with Low Atomicity. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2015. Vol. 54. P. 9810–9815. DOI: 10.1002/anie.201504473.
13. Heiz U., Sanchez A., Abbet S., Schneider W. Tuning the oxidation of carbon monoxide using nanoassembled model catalysts. *Chem. Phys.* 2000. Vol. 262. P. 189–200.
14. Schweinberger F. et al. Cluster size effects in the photocatalytic hydrogen evolution reaction. *J. Am. Chem. Soc.* 2013. 135(36). P. 13262–13265. doi/10.1021/ja406070q.

15. Habibpour, V., Wang, Z., Palmer, R., Heiz, U. (2011). Size-selected Metal Clusters: New Models for Catalysis with Atomic Precision. *J. of Applied Sciences*, 11: 1164–1170. DOI: 10.3923/jas.2011.1164.1170.
16. Kawawaki, T., Kataoka, Y., Hirata, M. et al. (2021). Creation of high-performance heterogeneous photocatalysts by controlling ligand desorption and particle size of gold nanocluster. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 60 (39): 21340–21350. DOI: 10.1002/anie.202104911.
17. Dasgupta, A., Rajukumar, L. P., Rotella, C., Lei, Y., Terrones, M. (2017). Covalent three-dimensional networks of graphene and carbon nanotubes: synthesis and environmental applications. *Nano Today*, 12: 116–135.
18. Hansu, T., Caglar, A., Khan, A., Kivrak, H. (2022). Nano Carbon-Based Carbon Catalysts: Types, Preparation, and Characterization. In: Jawaid, M., Khan, A. (eds), *Carbon Composite Catalysts*. Singapore. P. 41–55.
19. Saha, A., Deb, M., Mahilang, M., Kurrey, R., Sinha, S. (2020). Polymeric resins as nano-catalysts. *J. Indian Chem. Soc.*, 97(9b): 1442–1454.
20. Vengatesan, M., Mittal, V. (2015). Surface Modification of Nanomaterials for Application in Polymer Nanocomposites. *Materials Science*. P. 1–27. DOI: [10.1002/9783527670260.CH1](https://doi.org/10.1002/9783527670260.CH1).
21. Gallego, E., Portilla, M., Paris, C. et al. (2017). “Ab Initio” Synthesis of Zeolites for Preestablished Catalytic Reactions. *Science*, 355: 1051–1054.
22. Xu, D., Lv, H., Liu, B. (2018). Encapsulation of Metal Nanoparticle Catalysts Within Mesoporous Zeolites and Their Enhanced Catalytic Performances: *Front. Chem.*, 6: 1–13. DOI:10.3389/fchem.2018.00550.
23. Liu, L., Díaz, U., Arenal, R. et al. (2017). Generation of subnanometric platinum with high stability during transformation of a 2D zeolite into 3D. *Nat. Mater.*, 16: 132–138. DOI: 10.1038/nmat4757.
15. Habibpour V., Wang Z., Palmer R., Heiz U. Size-selected Metal Clusters: New Models for Catalysis with Atomic Precision. *J. of Applied Sciences*. 2011. Vol. 11. P. 1164–1170. DOI: 10.3923/jas.2011.1164.1170.
16. Kawawaki T., Kataoka Y., Hirata M. et al. Creation of high-performance heterogeneous photocatalysts by controlling ligand desorption and particle size of gold nanocluster. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2021. 60 (39). P. 21340–21350. DOI: 10.1002/anie.202104911.
17. Dasgupta A., Rajukumar L. P., Rotella C., Lei Y., Terrones M. Covalent three-dimensional networks of graphene and carbon nanotubes: synthesis and environmental applications. *Nano Today*. 2017. 12. P. 116–135.
18. Hansu T. A., Caglar A., Khan A., Kivrak H. Nano Carbon-Based Carbon Catalysts: Types, Preparation, and Characterization. In: Jawaid, M., Khan, A. (eds), *Carbon Composite Catalysts*. Singapore, 2022. P. 41–55.
19. Saha A., Deb M., Mahilang M., Kurrey R., Sinha S. Polymeric resins as nano-catalysts. *J. Indian Chem. Soc.* 2020. Vol. 97(9b). P. 1442–1454.
20. Vengatesan M., Mittal V. Surface Modification of Nanomaterials for Application in Polymer Nanocomposites. *Materials Science*, 2015. P. 1–27. DOI: [10.1002/9783527670260.CH1](https://doi.org/10.1002/9783527670260.CH1).
21. Gallego E., Portilla M., Paris C. et al. “Ab Initio” Synthesis of Zeolites for Preestablished Catalytic Reactions. *Science*. 2017. Vol. 355. P. 1051–1054.
22. Xu D., Lv H., Liu B. Encapsulation of Metal Nanoparticle Catalysts Within Mesoporous Zeolites and Their Enhanced Catalytic Performances: *Front. Chem.* 2018. 6. P. 1–13. DOI: 10.3389/fchem.2018.00550.
23. Liu L., Díaz U., Arenal R. et al. Generation of subnanometric platinum with high stability during transformation of a 2D zeolite into 3D. *Nat. Mater.* 2017. 16. P. 132–138. DOI: [10.1038/nmat4757](https://doi.org/10.1038/nmat4757).

**KYSLOVA OLHA**

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,  
Department of Chemistry and Electrochemical Energy,  
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0002-0223-1860>

Scopus Author ID:22034723000

E-mail: [kievkislova@gmail.com](mailto:kievkislova@gmail.com)

**KYSLOVA O. V.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

### **FEATURES AND PROSPECTS FOR THE NANOCATALYSTS DEVELOPMENT**

**Purpose.** Summarize information about the structural features and properties of nanocatalysts, the principle of their action, efficiency, specificity, advantages of application and promising areas of development.

**Methodology.** Analysis of literature data about the dependence of the nanoobjects catalytic properties on their spatial dimension, the influence of structural features on the nanocatalysis efficiency, development prospects.

**Findings.** Nanocatalysts are characterized by a combination of specific physical and chemical properties due to a significant increase in the specific surface due to a particle size decrease, a change in the crystal structure and electronic levels structure. The mechanism of nanocatalysts action differs from classical catalysts action. The efficiency of catalysis is significantly affected by the size of nanoparticles and their interaction with the support. Nanocomposite materials based on metal nanoclusters and modified polyelectrolytes, carbon materials and zeolites, which stabilize the nanoobjects structure and increase their catalytic activity, are widely used.

**Originality.** Literature data analysis have shown that the efficiency of nanocatalysts depends on the spatial dimension of nanoobjects and defects in their structure. The creation of composite nanomaterials stabilizes catalyst nanoparticles, preserves their unique properties and technologically modifies the organization of catalytic processes.

**Practical value.** Nanocatalytic systems make it possible to implement chemical-technological processes with greater efficiency and lower energy consumption in accordance with environmental requirements. Modern methods for obtaining nanocatalysts with optimal structural and dimensional characteristics contribute to an increase in their activity, selectivity and cost reduction.

**Keywords:** nanocatalytic systems; spatial dimension; surface atoms; composite nanomaterials.