

УДК 66.097.5

*В.Є. Ведь, О.В. Ведь, С. Широков***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ,
ОДЕРЖАНИХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ, НА ПРОЦЕС ОКИСНЕННЯ
МОНООКСИДУ ВУГЛЕЦЮ НА НОСІЇ З МУЛІТОКРЕМНЕЗЕМУ****Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна**

Здійснено дослідження каталітичної активності різних за технологією формування шарів скла, створених на основі колоїдних розчинів системи оксидів елементів марганець–алюміній–кремній (MAS) на поверхні мулітокремнезему в реакції перетворення вуглець(II) оксиду у вуглець(IV) оксид. Встановлено залежність між структурно-хімічним станом створеної технологічними впливами поверхні вторинних носіїв та їх каталітичними і енергетичними властивостями. Мулітокремнезем практично не виявив каталітичної активності, що свідчить про відсутність або низьку схильність активних центрів до проведення реакцій на його поверхні. Нанесення одного шару аморфної структури на мулітокремнезем суттєво підвищує ступінь перетворення CO, що вказує на наявність активних центрів на новій реакційній поверхні. Максимальну реакційну здатність і найвище значення енергії активації виявила структура аморфної поверхні, утворена двома шарами, яка отримана в умовах швидкого випалу. Профілограми такої поверхні дозволили припустити, що такий режим випалу сприяє формуванню більшої кількості високоенергетичних реакційноздатних центрів. Модифікування поверхні мулітокремнезему аморфним складом скла дозволяє цілеспрямовано регулювати його каталітичну активність. Доведено, що істотний вплив має не лише кількість скла, а й спосіб його нанесення та термічне оброблення, що має враховуватись при розробці каталітичних нейтралізаторів на основі керамічних носіїв.

Ключові слова: ступінь перетворювання, каталітичне окиснення CO, мулітокремнезем, вторинний носій, аморфна структура, шари зі скла.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-163-6-133-140

Вступ

Кераміка є матеріалом, сформованим на основі неметалевих сполук — оксидів, їхніх сумішей та сполук, нітридів і карбідів. У минулому столітті кераміка широко використовувалася в багатьох сферах застосування у побуті та промислових галузях.

В епоху нанотехнологій визначення та застосування матеріалів змінилися, особливо у ви-

падку кераміки. Розвиток різних методів виробництва наноструктурованої кераміки радикально змінив сферу застосування керамічних матеріалів, зробивши їх найперспективнішими серед усіх, коли-небудь розроблених для низки критично важливих галузей. Виробництво керамічних наноструктур є складною матеріалознавчою задачею з промислової точки зору, оскільки багато методів виробництва вимагають

© В.Є. Ведь, О.В. Ведь, С. Широков, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Study of the influence of sol-gel coating formation technology on the carbon monoxide oxidation process on a mullite-silica carrier

створення нових технологій, складного обладнання, кваліфікованого персоналу, чистоти хімічних речовин, специфічного середовища, контрольованої атмосфери тощо.

Нанесення «тонких» та «товстих» плівок на основі кераміки належить до технологій, розвиток яких зумовив розроблення сучасних деталей та вузлів, що забезпечують функціональні характеристики працездатності та надають нові властивості виробам, що створюються. Наприклад, перспективним напрямом у розвитку сучасних методів очищення випускних газів у двигунобудуванні є каталітична нейтралізація шкідливих з'єднань. Робочим органом нейтралізатора слугує первинний носій, на розвинену поверхню якого наносяться, якщо необхідно, плівкові шари вторинного носія і, відповідно, самого каталізатора.

Методика експерименту

Протягом останніх кількох десятиліть суттєвий розвиток отримали два методи одержання плівок: технології Sol-Gel (золь-гель) та CVD (chemical vapor deposition – хімічне осадження з парової фази). Оціночні властивості покриттів, сформованих цими методами, наведено в табл. 1.

Аналіз даних табл. 1 свідчить про значно нижчу температуру формування покриттів, одержаних золь-гель методом на виробках, порівняно з методом CVD. Однак щільність та адгезійні показники покриттів, одержаних за технологією CVD, відповідають максимальним значенням їх властивостей, оскільки високі температури та використання вакууму під час формування призво-

дять до видалення повітря з шарів структур, що створюються, та зон адгезійного контакту. Це забезпечує ущільнення матеріалів покриттів, які формуються, та дає можливість проникати структуроутворювальним молекулам покриттів у можливі дефекти поверхні покриваних деталей.

Аморфні та склокристалічні компоненти покриттів, сформованих золь-гель методом, своєю структурною піддатливістю дозволяють релаксувати напруження, прикладені ззовні, що забезпечує їх високу термостійкість. Методом CVD утворюються щільні «жорсткі» плівки, які схильні до процесів утворення структурних тріщин через різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) самих плівок та підкладок.

Золь-гель технологія дозволяє створювати мікрошорстку поверхню з високою адгезійною активністю як з первинними носіями, так і з каталізаторами без утворення крихких межфазних границь, одержувати покриття із заданою пористістю, керувати їх хімічним складом та властивостями поверхні.

Значна різниця у вартості обладнання для нанесення плівок порівнюваними методами визначає відповідну диференціацію цін на виробництво самих покриттів. Золь-гель є простим та масштабованим методом, ефективним для нанесення покриттів на великі площі за відносно низьких витрат.

Золь-гель синтез дозволяє одержувати оксидні та композитні аморфні, склокристалічні та кристалічні плівки (наприклад, на основі SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , інших оксидів та їхніх сумі-

Таблиця 1

Порівняння технологій Sol-Gel та CVD [1–6]

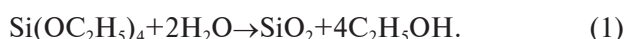
Параметр	Характеристика	
	Sol-Gel	CVD
Температура синтезу, °C	Низька на етапі формування (≤ 100), випал при 400–700	Висока (700–1200)
Структура покриття	Пориста, аморфна або нанокристалічна	Щільна, кристалічна
Контроль пористості	Високий, регулюється рН, прекурсорами та режимами термообробки	Обмежений, переважно щільні плівки
Адгезія до підкладки	Добра, можна функціоналізувати властивості поверхні	Надзвичайно висока завдяки високотемпературному осадженню у вакуумі
Релаксація напружень	Висока, завдяки пористій та частково аморфній структурі	Низька, щільні шари схильні до утворення тріщин
Термостійкість, °C	До 700–1200 (залежить від плівкотвірного оксиду)	До 1000–1500, іноді вище
Складність і вартість	Відносно низька, не потребує складного обладнання	Висока, потрібна вакуумна та газова апаратура
Застосування в каталізаторах	Вторинні носії блоків кераміки орієнтованої пористі, з металічної фольги	Тонкі металеві та оксидні плівки високої чистоти

шей), які мають високу термостабільність (витримують численні значні перепади температур від $+(700-1200)^{\circ}\text{C}$ до від'ємних значень залежно від складу). Контроль параметрів золю (рН, співвідношення прекурсорів, режимів сушіння та випалу) дозволяє формувати в плівках аморфні та аморфно-кристалічні структури, які можна стабілізувати випалом за певних температур і запобігти розвитку подальших структурних кристалізаційних процесів, що призводять до спікання (ущільнення) плівок.

Традиційна технологія отримання покриттів золь-гель методом [7] ґрунтується на тому, що алкоксиди металів зазнають часткового або повного гідролізу для проведення подальшої поліконденсації з метою формування колоїдних розчинів, у яких дисперсна фаза рівномірно розподілена в рідкому дисперсійному середовищі [8].

Можливі етапи утворення структури функціональних вторинних носіїв надані на прикладі розгляду реакцій, що призводять до утворення зольної системи Mn-Al-Si-O .

У процесі проведення золь-гель синтезу тетраетоксисилан $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ гідролізується водою з утворенням діоксиду кремнію SiO_2 та етанолу:



До складу вихідної рідкої суміші входить $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, який реакцією зі спиртом перетворюється на алкоголят (алкоксид):



утворюючи структурні тетраедри AlO_4^- .

Аналогічною за типом реакцією $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ зі спиртом, нітрат марганцю(II) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ утворює ацетат марганцю (II) $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, який є ініціатором утворення структурних іонів Mn^{2+} .

Спрощена структурна модель розподілу іонів Mn та Al у матриці SiO_2 у процесі золь-гель синтезу системи Mn-Al-Si-O надана на рис. 1. Основою структури є аморфна матриця SiO_2 , яка утворена тетраедрами SiO_4^{4-} , з'єднаними через місткові атоми кисню (Si-O-Si). Структура є неупорядкованою, що дозволяє вбудовуватися в неї чужорідним іонам (Al^{3+} та $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$). Al^{3+} заміщує частину Si^{4+} у тетраедрах, утворюючи тетраедри AlO_4^- . Це створює негативний заряд у структурі, який може компенсуватися як протонами (H^+), так і катіонами Mn^{2+} .

Текстура золю – рухлива, текуча, подібна до звичайної рідини. Золі є відносно стійкими, але можуть переходити у гель. Гелеутворення

може відбуватися при зміні температури, рН або внаслідок додавання електролітів; під впливом цих факторів золь втрачає текучість і перетворюється на гель.

Результати та обговорення

Описаними технологічними операціями розроблені вторинні носії каталітичних нейтралізаторів [9–12] на основі колоїдних розчинів систем оксидів елементів: марганець–алюміній–кремній (MAS), нікель–алюміній–кремній (NAS), кобальт–алюміній–кремній (CAS), марганець–бор–кремній (MBS), нікель–бор–кремній (NBS), марганець–алюміній–бор (MAB), нікель–алюміній–бор (NAB), кобальт–алюміній–бор (CAB).

З метою визначення параметрів функціонування вторинних носіїв – кількості та будови їхніх шарів – було здійснено дослідження каталітичної активності щодо перетворення оксиду вуглецю(II) (CO) в оксид вуглецю(IV) (CO_2).

Експерименти проводили на первинних носіях із мулітокремнезему, на поверхню яких наносили вторинні носії на основі аморфної золь-гель композиції, що являє собою високотемпературне скло складу MAS, нанесене в один або два шари. Кінцевою технологічною операцією процесів нанесення шарів вторинних носіїв була термообробка, яку проводили при температурі 700°C протягом 15 хв (для зразків з одним і двома шарами скла) та тривалістю 1 хв для нанесення на зразки скла другим шаром (швидкий випал). Результати експериментів наведено на рис. 2. Аналіз цих даних свідчить про те, що первинний носій, мулітокремнезем, практично не виявляє активності щодо окиснення CO . Про це

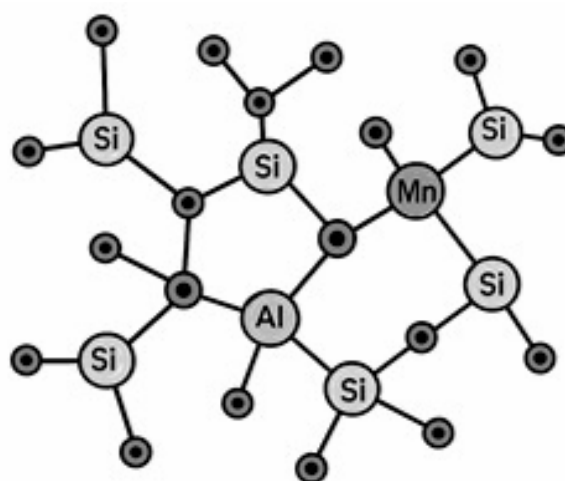


Рис. 1. Структурна модель розподілу іонів Mn та Al у матриці SiO_2 золь-гель синтезу системи Mn-Al-Si-O

свідчить дуже низький досягнутий ступінь конверсії $\approx 0,06$ при максимальних температурах (рис. 2, крива 1).

Наявність скла MAS різко підвищує каталітичну активність поверхні мулітокремнезему: один шар аморфної фази підвищує ступінь конверсії CO до $\approx 0,29$. Це пов'язано з процесом утворення каталітично активних центрів на поверхні скла за рахунок присутності іонів 3d-перехідного металу – Mn (рис. 2, крива 3). Процес одношарового нанесення скла призводить також до певного відтворення – повторення поверхнею цієї аморфної фази поверхневих дефектів структури первинного носія. При цьому відбувається певне збільшення площі робочої поверхні одношарового скла та формування на виломах зовнішньої робочої поверхні додаткових активних центрів, які також вносять свій вклад у підвищення каталітичної активності такого вторинного носія (рис. 2, крива 3).

Застосування прийому двократного нанесення скла в тривалому режимі термообробки під час його формування призвело до певного зниження ступеня конверсії (рис. 2, крива 2). Це може бути пов'язано з тим, що режим тривалого випалу другого шару скла сприяє певному заглибленню (загоєнню) дефектів структури першого шару скла за рахунок формування по його поверхні другого шару з меншою кількістю порушень суцільності. Тим самим декілька зменшується площа контактної поверхні, яка бере безпосередню участь у процесі конверсії CO.

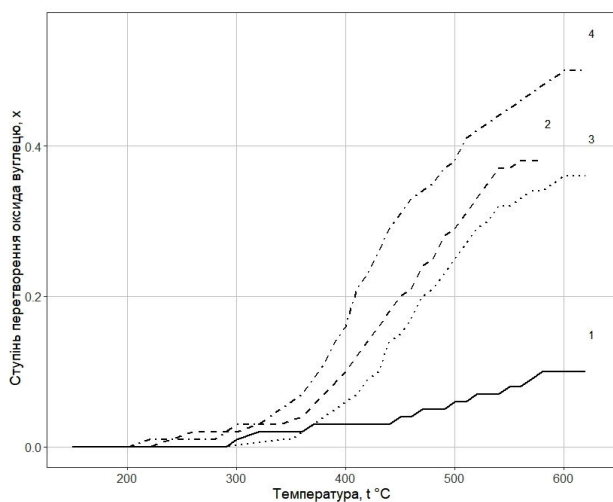


Рис. 2. Залежності зміни ступеня конверсії CO (у частках одиниці) від температури: 1 – первинний носій (мулітокремнезем); мулітокремнезем з вторинним носієм скла MAS, нанесеним: 2 – двома шарами; 3 – одним шаром; 4 – двома шарами (швидкий випал)

Підтвердженням цього явища можуть слугувати висновки, встановлені у роботі [13], про те, що зі збільшенням кількості аморфних шарів, особливо при повільному випалі, пористість зовнішнього шару зменшується. Про це свідчить аналіз профілограми поверхні (профілю поверхні), утвореною двома шарами скла (рис. 3).

Максимально досягнутий ступінь конверсії CO зафіксовано при випробуванні двошарового вторинного носія, одержаного за режимом швидкого випалу (рис. 2, крива 4). Таке термооброблення призводить до формування другого шару скла з великою кількістю «дефектів» структури поверхні, які можуть слугувати каталітично активними центрами (рис. 4).

За методикою, викладеною в роботі [14], було проведено розрахунки для визначення енергій активації реакції окиснення CO мулітокремнеземом

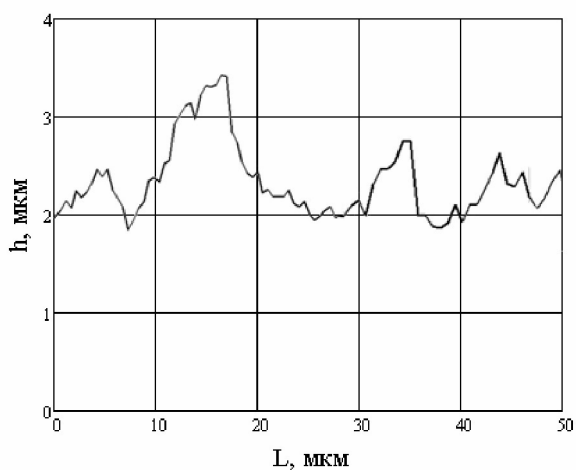


Рис. 3. Профілограма поверхні мулітокремнезему зі склопокриттям MAS двома шарами при тривалому випалі

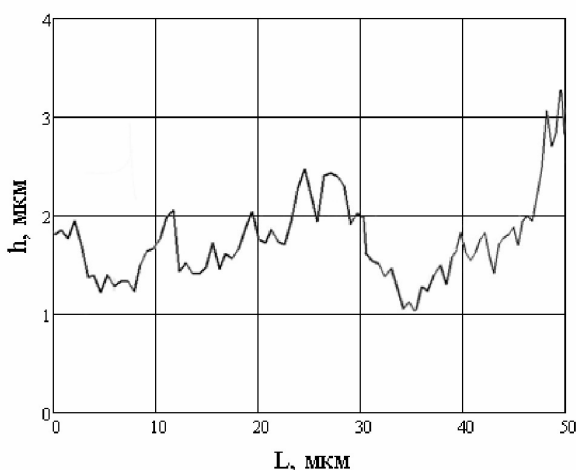


Рис. 4. Профілограма поверхні мулітокремнезему зі склопокриттям MAS двома шарами (швидкий випал)

та такого ж, але зі склом складу MAS, нанесеним різними технологічними особливостями на його поверхню (рис. 5).

Розраховані значення енергії активації реакцій окиснення CO на мулітокремнеземі та зі склом складу MAS, нанесеним різними технологічними варіантами на його поверхню, наведено в табл. 2.

Мулітокремнезем виявляє практично нульову каталітичну активність ($X=0,06$) та відрізняється низькою енергією активації ($E_a=25,4$ кДж/моль). Це вказує на практичну відсутність активних центрів, необхідних для перебігу процесу окиснення CO на поверхні мулітокремнезему – реакція протікає за слабким фоновим механізмом (можливо, через механізм фізичної сорбції CO).

Наявність одного шару скла MAS різко підвищує ступінь перетворення CO до $X=0,29$, при цьому E_a зростає до 35,0 кДж/моль. Це свідчить про формування каталітично активних центрів на поверхні скла, відповідальних за протікання реакції. Підвищення величини енергії активації вказує на те, що реакція протікає за енергетично вигіднішим механізмом та є активнішою, ймовірно, за рахунок певної кількості активних центрів на поверхні скла і зміни механізму процесу окиснення.

Два шари скла MAS, одержані в умовах «повільного» випалу, дещо знижують ступінь перетворення CO порівняно з даними для одношаро-

вого скла – до $X=0,25$. При цьому енергія активації E_a зростає до 40,9 кДж/моль. Ймовірно, розподіл другого шару скла по поверхні першого ініціює утворення нової реакційної поверхні з частково перекритими активними центрами розтіклим склом. А саме поверхневі дефекти відповідають за утворення активних центрів, на яких відбуваються акти каталітичних перетворень.

Два шари скла MAS після швидкого випалу призводять до найвищого серед порівнюваних ступеня перетворення CO – $X=0,38$, незважаючи на ще більше значення $E_a=43,6$ кДж/моль. Швидкий випал, ймовірно, сприяє модифікації структури поверхневого шару скла, формуючи більшу кількість дефектів та пор, отже, нових активних центрів.

Наявність позитивної кореляції (табл. 2) між X та E_a для розглянутої системи може здаватися парадоксальною: зазвичай висока реакційна активність асоціюється з низькою енергією активації. Однак у даному випадку підвищення E_a не може бути пов'язане зі зростанням реакційної активності. Ця обставина свідчить про зміну механізму реакції завдяки наявності скла на поверхні мулітокремнезему.

Підвищення значень E_a також може означати, що реакція протікає через активніші, але енергоємніші шляхи (механізми), які стають доступними завдяки утворенню нових, реакційноздатніших поверхневих структур.

Найвища активність досягається за раціональної структури скляного шару, створеної швидким випалом – це підкреслює важливість дотримання технологічних параметрів приготування матеріалу для проведення каталізу, а не лише його складу.

Висновки

Здійснені дослідження каталітичної активності вторинних носіїв мулітокремнезему – різних за технологією формування шарів аморфної фази в реакції конверсії оксиду вуглецю (CO) – виявили залежність ступеня перетворення та енергії активації від характеру та кількості поверхневих шарів.

Базовий носій, чистий мулітокремнезем, виявив надзвичайно низьку каталітичну активність ($X=0,06$) з мінімальною енергією активації ($E_a=25,4$ кДж/моль), що підтверджує його інертність в реакції окиснення CO, як наслідок відсутності значущих активних центрів. Нанесення одного поверхневого шару скла типу MAS різко підвищило ступінь перетворення до $X=0,29$, незважаючи на зростання енергії активації до $E_a=35,0$ кДж/моль. Це вказує на появу активних

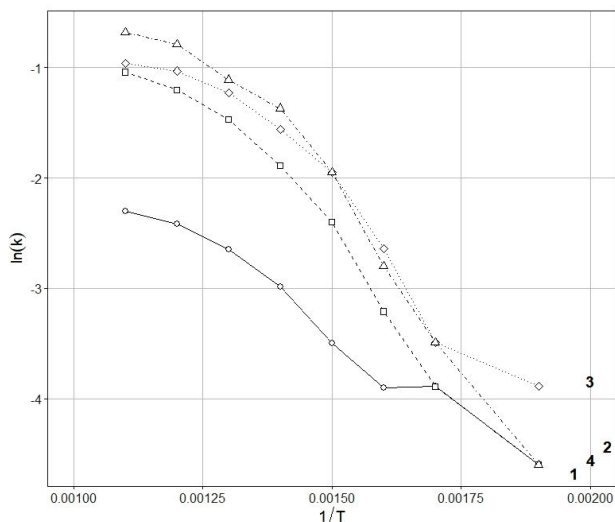


Рис. 5. Залежності логарифма константи швидкості реакції від оберненої температури: 1 – первинний носій (мулітокремнезем); мулітокремнезем з вторинним носієм складу MAS, нанесеним: 2 – двома шарами; 3 – одним шаром; 4 – двома шарами (швидкий випал)

центрів, здатних адсорбувати й активувати молекули CO та O₂, ймовірно, за рахунок модифікованих поверхневих кислотно-основних властивостей або утворення специфічних дефектних структур за рахунок наявності іонів 3d-перехідного металу, Mn, у складі аморфної фази.

Подвійний шар MAS сприяв деякому зниженню ступеня перетворення ($X=0,25$) при подальшому зростанні енергії активації ($E_a=40,9$ кДж/моль). Це може бути пов'язане з частковим блокуванням активних центрів першого шару склофази поверхневим шаром, який фізично їх закриває, а сам створює менш сприятливу морфологію поверхні. Однак швидкий випад подвійного скляного покриття призвів до максимального значення ступеня перетворення ($X=0,38$) та найвищої енергії активації ($E_a=43,6$ кДж/моль). Ймовірно, в умовах швидкого випадлу формується нова неупорядкована, за рахунок цього активна поверхнева структура, яка можливо ініціює створення нанокристалічних фаз або нерівноважних дефектів в склофазі – активних центрів, які сприяють процесу більш ефективнішому окисненню CO.

Отже, спостерігається часткова відповідність між зростанням ступеня перетворення CO та збільшенням величини енергії активації реакції окиснення при послідовному вивченні властивостей носіїв – від інертного до активованих одним покриттям за різними технологічними режимами. Максимальною каталітичною активністю з високою енергією активації характеризуються носії, отримані в умовах швидкого випадлу, який утворює відповідним чином формує просторові структури поверхні вторинного носія.

Це вказує на те, що особливості будови поверхні носія та характер активних центрів відіграють більш вирішальне значення у підвищенні ступеню перетворення, ніж абсолютні термодинамічні параметри деяких каталітичних процесів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Nazeri A., Bescher E., Mackenzi J.D.* Ceramic composites by the sol gel method: a review // A collection of papers on engineering aspects of fabrication of ceramics: ceramic engineering and science proceedings. – 1993. – Vol.14. – P.1-19.
2. *Stress and cracks in gel-derived ceramic coatings and thick film formation* / Kozuka H., Takenaka S., Tokita H., Hirano T., Higashi Y., Hamatani T. // J. Sol-Gel Sci. Technol. – 2003. – Vol.26. – P.681-686.
3. *A review on sustainable manufacturing of ceramic-based thin films by chemical vapor deposition (CVD): reactions kinetics and the deposition mechanisms* / Sabzi M., Mousavi Anijdan S.H., Shamsodin M., Farzam M., Hojjati-Najafabadi A., Feng P., et al. // Coatings. – 2023. – Vol.13. – Art. No. 188.
4. *Synthesis of glass nanocomposite powders: structure, thermal, and antibacterial study* / Catauro M., Blanco I., de Santis R., Russo T., Crescente G. // Macromol. Symp. – 2021. – Vol.395. – Art. No. 2000200.
5. *Kozuka H.* On ceramic thin film formation from gels: evolution of stress, cracks and radiative striations // J. Ceram. Soc. Jpn. – 2003. – Vol.111. – No. 1297. – P.624-632.
6. *Soma Raju K.R.C., Subasri R., Srinivasa Rao K.* Ceramic-polymer hybrid coatings for diverse applications // Front. Coat. Dyes Interface Eng. – 2024. – Vol.2. – Art. No. 1386920.
7. *Royer S., Duprez D.* Catalytic oxidation of carbon monoxide over transition metal oxides // ChemCatChem. – 2011. – Vol.3. – P.24-65.
8. *Influence of hybrid sol-gel crosslinker on self-healing properties for multifunctional coatings* / Lollivier G., Gressier M., Ansart F., Aufray M., Menu M.J. // Materials. – 2021. – Vol.14. – Art. No. 5382.
9. *Catalyst coatings carriers based on aluminium-silicon*

Таблиця 2

Зміна каталітичної активності (за даними рис. 4) та енергії активації первинного носія, мулітокремнезему, залежно від технології нанесення скляного шару на його поверхню

Зразок	Ступінь перетворення CO*, X, частка одиниці	Енергія активації**, E _a , кДж/моль
Мулітокремнезем	0,06	25,4
Мулітокремнезем з одним шаром скла MAS	0,29	35,0
Мулітокремнезем з двома шарами скла MAS	0,25	40,9
Мулітокремнезем з двома шарами скла MAS (швидкий випад)	0,38	43,6

Примітки: * – вказано максимально досягнутий ступінь перетворення кожним зразком при граничних температурах досліджень; ** – значення енергії активації визначено за рівнянням Арреніуса.

glass crystalline compositions / Krasnokutskiy E., Ved V., Tovazhnyansky L., Ved H. // *Chem. Eng. Trans.* – 2017. – Vol.61. – P.397-402.

10. *Calculation* of the operation parameters of the catalytic converters of the harmful gas impurities / Ved V., Krasnokutskiy E., Satayev M., Ved' A., Saipov A. // *Chem. Eng. Trans.* – 2016. – Vol.52. – P.91-96.

11. *Catalyst* coatings carriers based on boron-silicon glass crystalline compositions / Krasnokutskiy E., Ved V., Suigenbayeva A., Saipov A., Mussabekov A., Ponomarenko H., et al. // *Chem. Eng. Trans.* – 2019. – Vol.76. – P.841-846.

12. *Стендові дослідження блоку каталітичного перетворювача із шаром каталізатора на поверхні склокристалічних медіаторів* / Ведь В.Є., Краснокутський Є.В., Горбунов К.О., Миронов А.М., Ільченко М.В., Селіхов Ю.А. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2024. – № 1. – С.24-40.

13. *Nanostructured* mullite steam oxidation resistant coatings for silicon carbide deposited via atomic layer deposition / Hoskins A.L., Coffey A.H., Musgrave C.B., Weimer A.W. // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2018. – Vol.101. – P.2493-2505.

14. *Germgard U.* The Arrhenius equation is still a useful tool in chemical engineering // *Nord. Pulp. Pap. Res. J.* – 2017. – Vol.32. – No. 1. – P.21-24.

Надійшла до редакції 22.08.2025

STUDY OF THE INFLUENCE OF SOL-GEL COATING FORMATION TECHNOLOGY ON THE CARBON MONOXIDE OXIDATION PROCESS ON A MULLITE–SILICA CARRIER

*V.E. Ved *, O.V. Ved, S. Shyrokov*

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

* e-mail: valeriy.e.ved@gmail.com

A study was conducted on the catalytic activity of various glass layers formed using different technologies and prepared from colloidal solutions of the manganese–aluminum–silicon oxide (MAS) system on the surface of mullite–silica in the reaction of converting carbon monoxide (CO) to carbon dioxide (CO₂). A dependence was established between the structural and chemical state of the surface of secondary carriers created by technological influences and their catalytic and energetic properties. Mullite–silica exhibited practically no catalytic activity, indicating the absence or low propensity of active sites on its surface to conduct reactions. The application of a single amorphous layer onto the mullite–silica significantly increases the degree of CO conversion, indicating the presence of active sites on the new reaction surface. The maximum reactivity and the highest activation energy value were shown by the amorphous surface structure formed by two layers, obtained under conditions of rapid firing. The profilograms of such a surface indicated that this firing mode promotes the formation of a larger number of high-energy reactive centers. Modifying the surface of mullite–silica with an amorphous glass composition allows targeted control of its catalytic activity. It has been shown that not only the amount of glass but also the method of its application and thermal treatment have a significant influence, which must be taken into account when developing catalytic neutralizers based on ceramic carriers.

Keywords: conversion degree; catalytic oxidation of CO; mullite–silica; secondary carrier; amorphous structure; glass layers.

REFERENCES

1. Nazeri A, Bescher E, Mackenzi JD. Ceramic composites by the sol gel method: a review. In: Wachtman JB, editor. *A collection of papers on engineering aspects of fabrication of ceramics: ceramic engineering and science proceedings, volume 14*. 1993. p. 1-19. doi: 10.1002/9780470314272.ch1.
2. Kozuka H, Takenaka S, Tokita H, Hirano T, Higashi Y, Hamatani T. Stress and cracks in gel-derived ceramic coatings and thick film formation. *J Sol-Gel Sci Technol*. 2003; 26: 681-686. doi: 10.1023/A:1020773415962.
3. Sabzi M, Mousavi Anijdan SH, Shamsodin M, Farzam M, Hojjati-Najafabadi A, Feng P, et al. A review on sustainable manufacturing of ceramic-based thin films by chemical vapor deposition (CVD): reactions kinetics and the deposition mechanisms. *Coatings*. 2023; 13: 188. doi: 10.3390/coatings13010188.
4. Catauro M, Blanco I, de Santis R, Russo T, Crescente G. Synthesis of glass nanocomposite powders: structure, thermal, and antibacterial study. *Macromol Symp*. 2021; 395: 2000200. doi: 10.1002/masy.202000200.
5. Kozuka H. On ceramic thin film formation from gels: evolution of stress, cracks and radiative striations. *J Ceram Soc Jpn*. 2003; 111(1297): 624-632. doi: 10.2109/jcersj.111.624.

6. Soma Raju KRC, Subasri R, Srinivasa Rao K. Ceramic–polymer hybrid coatings for diverse applications. *Front Coat Dyes Interface Eng.* 2024; 2: 1386920. doi: 10.3389/frcdi.2024.1386920.
7. Royer S, Duprez D. Catalytic oxidation of carbon monoxide over transition metal oxides. *ChemCatChem.* 2011; 3: 24-65. doi: 10.1002/cctc.201000378.
8. Lollivier G, Gressier M, Ansart F, Aufray M, Menu MJ. Influence of hybrid sol-gel crosslinker on self-healing properties for multifunctional coatings. *Materials.* 2021; 14: 5382. doi: 10.3390/ma14185382.
9. Krasnokutskiy E, Ved V, Tovazhnyanskyy L, Ved H. Catalyst coatings carriers based on aluminium-silicon glass crystalline compositions. *Chem Eng Trans.* 2017; 61: 397-402. doi: 10.3303/CET1761064.
10. Ved V, Krasnokutskiy E, Satayev M, Ved' A, Saipov A. Calculation of the operation parameters of the catalytic converters of the harmful gas impurities. *Chem Eng Trans.* 2016; 52: 91-96. doi: 10.3303/CET1652016.
11. Krasnokutskiy E, Ved V, Suigenbayeva A, Saipov A, Mussabekov A, Ponomarenko H, et al. Catalyst coatings carriers based on boron-silicon glass crystalline compositions. *Chem Eng Trans.* 2019; 76: 841-846. doi: 10.3303/CET1976141.
12. Ved V, Krasnokutskiy E, Gorbunov KO, Myronov AM, Ilchenko MV, Selikhov YA. Stendovi doslidzhennia bloku katalitychnoho peretvoriuvacha iz sharom katalizatora na poverkhni sklokrystalichnykh mediatoriv [Bench research of a catalytic converter block with a catalyst sphere on the surface of glassy crystalline mediators]. *Integrated Technologies and Energy Saving.* 2024; (1): 24-40. (in Ukrainian). doi: 10.20998/2078-5364.2024.1.03.
13. Hoskins AL, Coffey AH, Musgrave CB, Weimer AW. Nanostructured mullite steam oxidation resistant coatings for silicon carbide deposited via atomic layer deposition. *J Am Ceram Soc.* 2018; 101: 2493-2505. doi: 10.1111/jace.15408.
14. Germgard U. The Arrhenius equation is still a useful tool in chemical engineering. *Nord Pulp Pap Res J.* 2017; 32(1): 21-24. doi: 10.3183/npprj-2017-32-01-p021-024.