УДК 666.3-405.8

С.С. Любарський [1]
К. В. Мащук [2]
В. П. Ковальський[2]

Високопористі керамічні матеріали

[1] ВСП Вінницький фаховий коледж будівництва, архітектури та дизайну КНУБА;
[2]Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто основні методи отримання високопористих керамічних матеріалів (пінокераміки), їхні фізико-хімічні властивості та ключові сфери застосування в промисловості. Особливу увагу приділено трьом технологічним підходам: реплікаційному методу, методу прямого спінювання та методу використання сакрифікальних темплатів. Проаналізовано переваги та обмеження кожного методу. На основі порівняльного аналізу визначено пріоритетний напрямок промислового використання пінокераміки. Проведено порівняльну характеристику пінокераміки з пінобетоном та газобетоном за показниками теплопровідності, теплоємності та міцності.

Ключові слова: пінокераміка, високопориста кераміка, реплікаційний метод, пряме спінювання, фільтрація розплавів, теплоізоляція, пінобетон, газобетон, теплопровідність, міцність.

Abstract

The main processing methods for obtaining highly porous ceramic materials (ceramic foams), their physicochemical properties, and key industrial applications are reviewed. Special attention is paid to three technological approaches: the replica method, the direct foaming method, and the sacrificial template method. The advantages and limitations of each method are analyzed. Based on a comparative analysis, the priority direction for industrial use of ceramic foam is determined. A comparative characterization of foam ceramics with foam concrete and aerated concrete in terms of thermal conductivity, heat capacity and strength is carried out.

Keywords: ceramic foam, highly porous ceramics, replica method, direct foaming, melt filtration, thermal insulation, foam concrete, aerated concrete, thermal conductivity, strength.

ВСТУП

Високопористі керамічні матеріали, відомі як пінокераміка, являють собою клас матеріалів із пористістю від 20% до 97% та розмірами пор від нанометрів до кількох міліметрів. Поєднання властивостей кераміки — термічної та хімічної стійкості — з легкою пористою структурою відкриває широкі перспективи для застосування цих матеріалів у металургії, каталізі, теплоізоляції та акустиці [1-4]. Українські дослідники підтверджують ефективність використання пінокерамічних фільтрів для очищення рідкого алюмінію[5-8]. Для розуміння потенціалу цих матеріалів необхідно, по-перше, проаналізувати технологічні підходи до їх отримання, по-друге, оцінити їхні властивості у порівнянні з традиційними пористими будівельними матеріалами (газобетоном та пінобетоном), та по-третє, визначити найбільш ефективні галузі промислового використання на основі наукових даних та виробничого досвіду [8-12].

У сучасному матеріалознавстві існує три основні підходи до створення високопористих керамічних структур. Реплікаційний метод є найпоширенішим у промисловості способом, запатентованим Шварцвальдером і Сомерсом у 1963 році. Технологія полягає у просоченні полімерної губки (зазвичай поліуретанової) керамічною суспензією з подальшим видаленням полімерного темплату при випалі. Реплікаційний метод забезпечує пористість у діапазоні 40– 95% та розміри пор від 200 мкм до 3 мм. Обмеженнями цього методу є утворення порожнин і тріщин у розпірках через термічне розкладання полімеру, а також виділення шкідливих газів (NO, HCN, CO) під час випалювання темплату. Для підвищення міцності виробів застосовують повторне покриття, контроль піролізу та модифікацію складу суспензії. Метод використання сакрифікальних темплатів передбачає додавання до керамічної суміші легковипарюваних матеріалів-заповнювачів —

крохмалю, воску, полімерних сфер або парафіну. При випалі ці матеріали видаляються, утворюючи пори. Цей метод забезпечує пористість у діапазоні 20–90% та розміри пор від 1 до 700 мкм. Його перевагою є можливість точного контролю пористості через регулювання кількості та розміру порозаповнювачів.

Аналітичні дослідження

Метод прямого спінювання принципово відрізняється від двох попередніх: він полягає у введенні повітря в керамічну суспензію з подальшою фіксацією піни при затвердінні та спіканні. Пористість, досягнута цим методом, становить 40–97% при розмірах пор 35 мкм – 1,2 мм. Ключовою проблемою цього підходу є термодинамічна нестабільність вологих пін, що призводить до коалесценції бульбашок та руйнування структури. Вирішенням цієї проблеми стало використання частинково-стабілізованих пін. Цей метод був розроблений у 2006 році Гауклером та співавторами і базується на принципі піни Пікерінга. Гідрофобізовані наночастинки адсорбуються на межі поділу рідина-газ, створюючи стабільну систему, що дозволяє отримувати пінокераміку з пористістю понад 95% та вузьким розподілом пор за розмірами.

Вагомий внесок у розвиток технологій отримання пінокераміки зробили українські дослідники. Зокрема, Нерубацький В.П. та співавтори (Гуцаленко Ю., Мельник О., Волошина Л.) запропонували економічний термічний цикл виробництва керамічних виробів із субмікронних порошків оксиду алюмінію, оксиду титану та оксиду марганцю. Реалізація запропонованого циклу передбачає введення в шихту спеціального алюмофосфатного зв'язуючого для зниження температури випалу. Як зазначають автори, виготовлені глиноземні фільтри стали гідною альтернативою відомим аналогам, а застосування діоксидів титану, марганцю та алюмофосфату дозволило збільшити продуктивність випалу приблизно на 220% порівняно з відомими технологіями. У 2022 році Геворкян Е., Нерубацький В.П. та співавтори опублікували дослідження щодо енергоефективності виробництва пінокерамічних фільтрів, яке дозволяє скоротити тривалість термічного циклу на 19% та знизити максимальну температуру нагрівання на 20% до 1350 °С, що дає змогу заощадити до 40% електроенергії. При температурі спікання в атмосфері повітря 1350 °С було отримано високі фізико-механічні властивості, що дозволило використовувати розроблені фільтри як носії каталізаторів для відпрацьованих газів транспортних засобів. Зазначимо також, що пінокераміка на основі Al_2O_3 (пінокорунд ПК-1) при об'ємній масі 0,8 г/см³ має границю міцності на згин 14,8 МПа.

Порівняльний аналіз пінокераміки з традиційними пористими будівельними матеріалами дозволяє об'єктивно оцінити її місце серед них. Газобетон марки D500 у сухому стані має теплопровідність 0,12 Вт/(м·К), що в 4 рази нижче, ніж у повнотілої цегли, та приблизно дорівнює теплопровідності дерева. Пінобетон демонструє дещо вищі показники: коефіцієнт теплопровідності 0,22 Вт/(м·К) у сухому стані та 0,37 Вт/(м·К) за умов експлуатації. Пінокераміка, своєю чергою, також має низьку теплопровідність, яка зменшується зі збільшенням пористості матеріалу; з підвищенням температури теплопровідність піноксидів знижується, оскільки при нагріванні спадає теплопровідність спечених оксидів. За теплоємністю газобетон має показник 0,84 кДж/(кг·К) у сухому стані, який зростає до 1,0-1,1 кДж/(кг·К) при експлуатаційній вологості, тоді як для пінокераміки цей параметр залежить від будови каркасу: чим тонша оболонка у порівнянні з розміром бульбашок, тим вищими є теплофізичні властивості. За міцністю при порівнянних значеннях густини матеріали є співставними: газобетон конструкційно-теплоізоляційних марок має міцність на стиск 2,5-5,0 МПа, пінобетон

— приблизно 3,5 МПа, а пінокераміка демонструє міцність на згин до 14,8 МПа при густині 800 кг/м³. Однак вирішальною перевагою пінокераміки перед газобетоном та пінобетоном є її висока термостійкість — матеріал витримує температуру до 1700°С, тоді як матеріали на цементній основі мають обмежену термостійкість і руйнуються при високих температурах.

ВИСНОВОК

У роботі розглянуто три основні технологічні підходи до отримання пінокераміки: реплікаційний метод, метод сакрифікальних темплатів та метод прямого спінювання. Реплікаційний метод є найпоширенішим у промисловості, незважаючи на його недоліки, тоді як метод частинково-стабілізованих пін (Pickering foam) є найперспективнішим для створення матеріалів з ультрависокою пористістю (понад 95%).

Проведений порівняльний аналіз пінокераміки, газобетону та пінобетону дозволяє стверджувати, що за теплопровідністю найкращі теплоізоляційні властивості в діапазоні звичайних

температур має газобетон D500 (0,12 Вт/(м·К)), що робить його енергоефективним будівельним матеріалом. За міцністю досліджувані матеріали є співставними при однаковій густині. Однак за термостійкістю пінокераміка має вирішальну перевагу (до 1700°С), що робить її незамінною для високотемпературних застосувань.

Подальший розвиток технологій має бути спрямований на здешевлення виробництва та розширення використання вторинної сировини, зокрема керамічних промислових відходів та летючої золи .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Studart, A.R., Gonzenbach, U.T., Tervoort, E., & Gauckler, L.J. (2006). Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review. Journal of the American Ceramic Society, 89(6), 1771- 1789.
2. Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." nternational Science Group. Boston : Primedia eLaunch, 616 . (2021).
3. Ковальський В. П. Сучасні тенденції у зведенні монолітних і цегляних житлових будинків / В. П. Ковальський, А. В. Бондар, Г. І. Лисій // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. - 2015. - № 1. - С.106-110.
4. Fey, T., Betke, U., Rannabauer, S., & Scheffler, M. (2017). Reticulated Replica Ceramic Foams: Processing, Functionalization, and Characterization. Advanced Engineering Materials, 19, 1700369. https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adem.201700369
5. Dammler, K., Sutygina, A., Scheffler, F., Scheffler, M., & Betke, U. (2024). Increased Microporosity in Ceramic and Metal Foams: A Novel Processing Combination. Advanced Engineering Materials, 26, 2300799. https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.202300799
6. Gevorkyan, E., Chmiel, J., Wiśnicki, B., Dzhuguryan, T., Rucki, M., & Nerubatskyi, V. (2022). Energy Efficiency Assessment of Sintering Technology of Foam Ceramic Filters for Smart Production Management. Energies, 15(17), 6443. https://www.mdpi.com/1996- 1073/15/17/6443
7. Лемешев, М. С., and О. В. Березюк. "Легкі бетони отримані на основі відходів промисловості." Научные труды SWorld 13.1 (2015): 111-114.
8. Tymoshenko, Vitaliy, and Viktor Kovalskiy. The processing technologies are considered and the possibility of using phosphogypsum for the production of dry building mixtures is substantiated. ВНТУ, 2025.
9. Ковальський В. П. Теплоізоляційні сухі будівельні суміші на перлітовому заповнювачі модифіковані поліпропіленовою фіброю [Текст] / В. П. Ковальський, Р. В. Варчук // Материали за XIII международна научна практична конференция «Найновите постижения на европейската наука - 2017»,15-22 юни 2017 г. – София : «Бял ГРАД-БГ», 2017. - Vol. 8. – С. 85-87.
10. Ковальський В. П. Теплоізоляційні сухі будівельні суміші на перлітовому заповнювачі модифіковані поліпропіленовою фіброю [Текст] / В. П. Ковальський, Р. В. Варчук // Материали за XIII международна научна практична конференция «Найновите постижения на европейската наука - 2017»,15-22 юни 2017 г. – София : «Бял ГРАД-БГ», 2017. - Vol. 8. – С. 85-87.
11. Khodetskyi O. Ash and slag waste utilization in construction [Text] / O. Khodetskyi, V. Kovalsky // Abstracts of XXXII International Scientific and Practical Conference «Science, modern trends and society», Bilbao, Spain, August 14-16, 2023. – 2023. – P. 8-10.
12. Ocheretnyi, V. P., V. P. Kovalskiy, and M. O. Postolatii. "Structures of composite concrete for sewerage." (2021).

Любарський Сергій Степанович- викладач, Вінницький фаховий коледж будівництва, архітектури та дизайну Київського національного університету будівництва і архітектури e-mail: sestls71@gmail.com

Мащук Кристіна Вадимівна — студентка групи БМ-24б, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, e-mail: kristinaastudy@gmail.com

Ковальський Віктор Павлович — канд. техн. наук, доцент кафедри міського будівництва та архітектури, Вінницький національний технічний університет, email: kovalskiy@vntu.edul.ua

Lyubarskyi Serhiy S – Lecturer, Vinnytsia Professional College of Construction, Architecture and Design Kyiv National University of Construction and Architecture e-mail: sestls71@gmail.com

***Krystina Mashchuk* –** student of Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kristinaastudy@gmail.com

***Kovalskyi Viktor P.* —** Ph.D. in Engineering, Associate Professor in the Department of Urban Construction and Architecture, Vinnytsia National Technical University., email: kovalskiy@vntu.edul.ua