

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБКИ ТА ІНТЕГРАЦІЇ МАГНЕЗІАЛЬНИХ В'ЯЖУЧИХ МАТЕРІАЛІВ У СУЧАСНІ БУДІВЕЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Здійснено огляд теоретичних засад розробки та сфери застосування будівельних матеріалів на основі магнезійних в'язучих. Детально проаналізовано їхній хімічний склад, механізми твердіння та структуроутворення. Окреслено основні переваги магнезійних в'язучих порівняно з традиційними цементними матеріалами, зокрема їх екологічність, швидке твердіння та можливість зменшення енергоспоживання під час виробництва. Також проаналізовано їх потенціал у створенні легких конструкцій, декоративних елементів та термоізоляційних покриттів.

Ключові слова: викиди CO_2 , цемент, магнезійні в'язучі, механізм твердіння, екологічність, енергоефективність, інноваційні технології, стійкість до корозії

Постановка проблеми

Будівельна індустрія є одним із найбільших споживачів природних ресурсів та вагомим джерелом антропогенних викидів парникових газів, що спричиняє значне екологічне навантаження на довкілля [1,2]. Основна причина цього полягає у домінуванні традиційного портландцементу, виробництво якого супроводжується високим енергоспоживанням і значними викидами CO_2 [3]. З метою зниження негативного впливу на навколишнє середовище особливої уваги заслуговують магнезійні в'язучі (MgO), які мають істотно нижчий рівень викидів парникових газів порівняно з портландцементом та низку унікальних фізико-хімічних властивостей [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Будівельна галузь є однією з основних сфер, що спричиняє значний екологічний вплив через надмірне використання природних ресурсів та високі викиди парникових газів. Виробництво портландцементу, що домінує на ринку будівельних матеріалів, супроводжується значними енергозатратами та викидами CO_2 (на основі проаналізованої інформації [6,7], була побудована діаграма, Рис.1), які становлять до 7% від загальносвітових викидів. Це створює потребу у впровадженні більш екологічних та енергоефективних матеріалів.

Згідно з дослідженнями, стійке зростання глобального ринку магнезійних в'язучих обумовлено посиленням екологічних стандартів та прагненням до зниження вуглецевого сліду в будівництві.

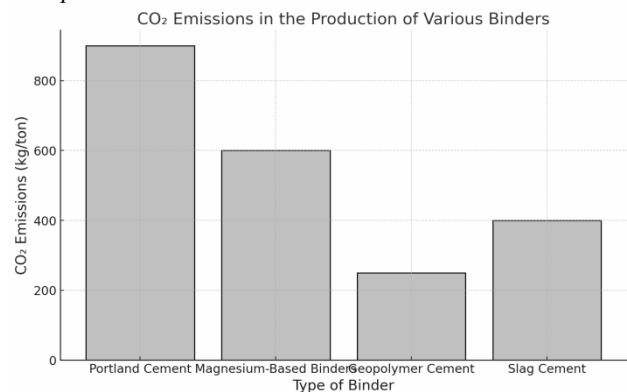


Рис. 1. Викиди CO_2 у виробництві різних в'язучих матеріалів

Згідно з даними Grand View Research, глобальний ринок магнезійних в'язучих досяг \$968 мільйонів у 2022 році та зростатиме (Рис.2) в середньому на 25% щорічно з 2023 по 2030 рік [8].

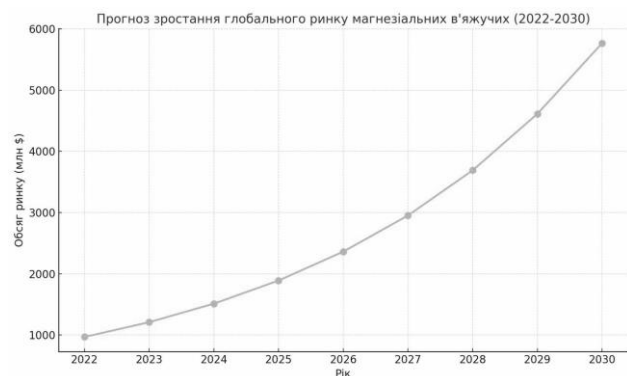


Рис. 2. На основі проаналізованої інформації [8,9], була побудована діаграма “Прогноз зростання глобального ринку магнезійних в'язучих матеріалів”

Мета статті

Базуючись на зростаючих вимогах до екологічності, довговічності та енергоефективності в'яжучих будівельних матеріалів, метою статті є загальний аналіз останніх досліджень ринку в'яжучих матеріалів та їх фізико - хімічних характеристик, з ціллю висвітлити перспективи розвитку та інтеграції магнезійних матеріалів у сучасні будівельні технології. Зазначимо, що подальше вивчення властивостей магнезійних в'яжучих та розробка нових технологічних рішень може забезпечити їхнє широке застосування в індустрії будівництва

Виклад основного матеріал

Магнезійні в'яжучі характеризуються високою термостійкістю, швидким набором міцності, хімічною стійкістю до агресивних середовищ та здатністю утворювати міцну кристалічну структуру. Це робить їх перспективними для створення вогнестійких та вологостійких конструкцій, спеціальних бетонів для агресивних умов експлуатації, а також енергоефективних оздоблювальних матеріалів. На відміну від традиційних цементів, магнезійні в'яжучі здатні поглинати CO₂ з атмосфери під час твердіння, що забезпечує їхню додаткову екологічну перевагу [10, 11]. Подальший розвиток технологій виробництва магнезійних матеріалів відкриває нові можливості для вдосконалення їхніх характеристик, зокрема зниження усадку, підвищення адгезії до різних типів наповнювачів та розширення діапазону їх застосування у будівництві. У контексті сучасних екологічних викликів, магнезійні в'яжучі є важливим елементом у розробці сталих будівельних матеріалів, що відповідають концепції “зеленого” будівництва.

Магнезійні в'яжучі (MgO) є одними з найперспективніших альтернатив традиційному цементу. Їхні переваги включають низький рівень викидів CO₂ під час виробництва, здатність до карбонізації, високу термостійкість та хімічну стійкість до агресивних середовищ. Ці властивості дозволяють використовувати магнезійні матеріали у широкому спектрі будівельних застосувань: від виготовлення вогнестійких конструкцій до створення екологічних бетонів та теплоізоляційних покриттів.

Прогнозується, що попит на магнезійні в'яжучі зростатиме в найближчі десятиліття через суворіші екологічні стандарти, а також завдяки їхнім високим властивостям, таким як вогнестійкість, зносостійкість і стійкість до хімічних впливів. Багато розвинених країн, зокрема в Європі та Північній Америці, вже активно інтегрують ці матеріали у свою

будівельну практику, застосовуючи їх у промисловому будівництві та в інфраструктурних проєктах.

Зростаючий попит (Рис.3 [3]) на екологічно чисті та енергоефективні будівельні матеріали стимулює розвиток ринку магнезійних в'яжучих.

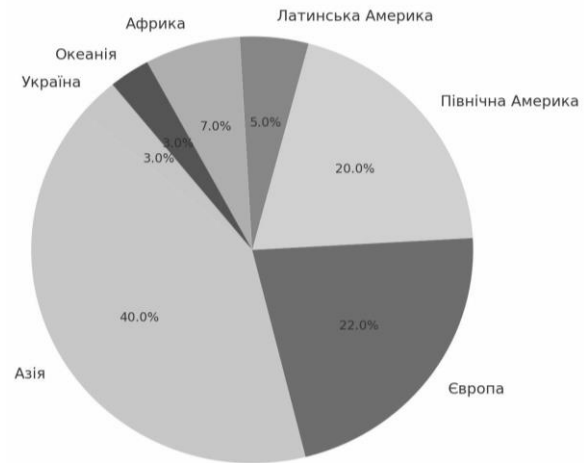


Рис. 3. Попит на магнезійні в'яжучі в різних країнах за 2024 р.

Згідно з дослідженнями, стійке зростання глобального ринку магнезійних в'яжучих обумовлено посиленням екологічних стандартів та прагненням до зниження вуглецевого сліду в будівництві. Останні дослідження також показали, що додавання наноматеріалів до магнезійних в'яжучих значно покращує їхні фізико-механічні властивості, зокрема підвищує термостійкість та знижує усадку. Усе це свідчить про високий потенціал магнезійних в'яжучих у сучасному будівництві та вимагає подальших досліджень для оптимізації їхнього складу і технологій виробництва.

Ситуація в Україні

В Україні ринок магнезійних в'яжучих перебуває на стадії активного розвитку, хоча поки що їх використання залишається обмеженим через недостатню обізнаність споживачів і виробників. Проте зростання інтересу до екологічно чистих будівельних матеріалів створює сприятливі умови для популяризації магнезійних в'яжучих.

- Стан виробництва:

Національні виробники поступово впроваджують технології виробництва магнезійних матеріалів, орієнтуючись на будівництво житлових і промислових об'єктів. Основні регіони виробництва — Київська, Харківська та Дніпропетровська області. Однак більшість сировини для виготовлення оксиду магнію імпортується, що збільшує собівартість продукції.

- Попит та застосування:

Попит на магнезіальні в'язучі в Україні формується переважно в галузях, де потрібна висока стійкість до корозії, таких як будівництво портів, хімічних підприємств і складів. Також вони активно використовуються в реставраційних роботах через їхню сумісність із традиційними матеріалами [13]

Запаси:

В Україні є поклади як магнезиту, так і доломіту, хоча їхні масштаби та ступінь промислового освоєння відрізняються.

Магнезит ($MgCO_3$) — важлива сировина для виробництва оксиду магнезю. В Україні його поклади є незначними і локалізовані переважно в Західній Україні, зокрема в Закарпатській області. Проте більшість сировини для виробництва магнезіальних матеріалів в Україні імпортується, оскільки місцеві родовища магнезиту малопридатні для масштабного промислового використання.

Доломіт ($CaMg(CO_3)_2$) широко поширений в Україні і має значно більший промисловий потенціал.

Основні родовища доломіту розташовані в таких регіонах:

- Закарпатська обл. (Берегівське родовище)
- Донецька обл. (Новотроїцьке родовище)
- Рівненська обл. (Клесівське родовище)
- Криворізький залізрудний басейн

Доломіт активно використовується в металургійній промисловості, будівництві, а також як сировина для виготовлення магнезіальних в'язучих матеріалів.

Доломітові родовища в Україні мають значний промисловий потенціал і є перспективними для розвитку виробництва магнезіальних матеріалів. У той же час магнезит вимагає значних інвестицій у розвідку та освоєння нових родовищ для зниження залежності від імпорту [14].

Теорія розробки будівельних матеріалів на основі магнезіальних в'язучих

Унікальні фізико-хімічні властивості магнезіальних в'язучих зумовлюють їх екологічність, високу міцність і стійкість до впливу агресивних середовищ [10,14].

Твердіння магнезіальних в'язучих відбувається внаслідок реакції MgO з водою та утворення гідроксиду магнезю ($Mg(OH)_2$). При додаванні водного розчину хлориду магнезю ($MgCl_2$) утворюються додаткові гідратовані фази, які сприяють підвищенню міцності матеріалу. У процесі експлуатації відбувається карбонізація — поглинання CO_2 з утворенням магнезиту, що ще більше зміцнює матеріал [1].

До складу магнезіальних в'язучих зазвичай входять:

- Оксид магнезю (MgO), отриманий випалом магнезиту або доломіту при $750-850^\circ C$;

- Сольовий розчин (наприклад, $MgCl_2$), який активує процес тверднення;

- Мінеральні або органічні наповнювачі (пісок, зола, тирса).

Залежно від складу та способу тверднення, матеріали на основі магнезіальних в'язучих можуть мати різні властивості, такі як висока міцність, низька теплопровідність, вогнестійкість

У процесі твердіння формується дрібнокристалічна структура, яка забезпечує:

- Високу міцність на стиск (до $40-60$ МПа)
- Низьку усадку, що зменшує ризик утворення тріщин
- Стійкість до вологого середовища та впливу солей

Таблиця 1

Порівняльний аналіз властивостей магнезіальних та цементних в'язучих [11]

Властивість	Магнезіальні в'язучі	Портландцемент
Щільність, $кг/м^3$	1600	1800
Теплопровідність, $Вт/м \cdot K$	0,2	0,3
Викиди CO_2 , $кг/тонна$	400	900
Час твердіння, годин	6-8	10-12
Міцність на стиск, МПа	50-80	30-50

Матеріали на основі магнезіальних в'язучих знаходять застосування у виготовленні:

- Оздоблювальних матеріалів (штукатурки, декоративні плити);
- Теплоізоляційних конструкцій (фіброліт, ксилоліт);
- Жаростійких та хімічно стійких покриттів;
- Будівельних елементів для реставрації історичних об'єктів

Висновок

- Технічні переваги магнезіальних в'язучих
Магнезіальні в'язучі мають високі показники міцності, адгезії, а також здатність швидко тверднути. Вони демонструють відмінну водостійкість, морозостійкість та хімічну стійкість,

що дозволяє використовувати їх у різних кліматичних і технологічних умовах. Зокрема, ці властивості є критичними для створення матеріалів, які експлуатуються в агресивних середовищах

- Екологічний аспект

Сучасне будівництво вимагає зниження вуглецевого сліду матеріалів, що виробляються. У порівнянні з традиційними цементними в'язучими, виробництво магнезійних матеріалів характеризується нижчим рівнем викидів CO₂, оскільки їх отримання потребує менших енергетичних затрат. Крім того, магнезійні в'язучі здатні абсорбувати CO₂ з атмосфери під час тверднення, що сприяє боротьбі зі змінами клімату.

- Сировинна база

Оксид магнію широко розповсюджений у природі та доступний для видобутку в багатьох регіонах світу. Розробка технологій для переробки цієї сировини сприятиме раціональному використанню природних ресурсів і зменшенню залежності від традиційних цементних матеріалів.

- Інноваційний потенціал

Завдяки унікальним властивостям магнезійних в'язучих, вони мають широкий потенціал застосування у сферах реставрації та збереження культурної спадщини. Крім того, їх можна комбінувати з іншими компонентами для отримання матеріалів із покращеними характеристиками.

- Економічні перспективи

Розробка технологій на основі магнезійних в'язучих відкриває можливості для створення більш конкурентоспроможних матеріалів із зниженими виробничими затратами. Це дозволяє будівельній галузі задовольняти попит на високоякісні матеріали за доступною ціною. Вони здатні значно знизити викиди CO₂ і підвищити ефективність будівельних процесів завдяки швидкому твердінню. Незважаючи на те, що в Україні використання магнезійних в'язучих матеріалів поки що не набуло широкого поширення, для подальшого розвитку цієї галузі необхідно провести додаткові дослідження, розробити національні стандарти.

Література

1. Шабанова Г.М., Тараненкова В.В., Гапонова О.О. / Високоєфективні магнезійні в'язучі матеріали на основі вітчизняної сировини // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2013. – Вип. 138. – С. 148–154.
2. Гасан Ю.Г., Пащенко Т.М. / Будівельні матеріали // Київ: КНУБА, 2013. — 528 с.
3. Пушкарьова К.К., Дворкін Л.Й., Градобоев О.В. та ін. / Енергоресурсозберігаючі мінеральні в'язучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі // – Київ, 2014.
4. Гасан Ю. Г., Пащенко Т. М. / Будівельні матеріали у 2 ч. Київ // Київський національний університет будівництва та архітектури, 2013.

5. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.С. / Модифіковані композиційні цементні : монографія // Львів: ЛП, 2010.
6. Durastanti C., Moretti L. Environmental Impacts of Cement Production: A Statistical Analysis. Applied Sciences, 2020.
7. Onyekwena C.C., Xue Q., Li Q., Umeobi H.I., Ghaffar A., Fasihnikoutalab M.H. Advances in the carbonation of MgO-based binder and CO₂ utilization in the construction industry. Clean Technologies and Environmental Policy, 2023.
8. Building Materials Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Aggregates, Bricks, Cement, Others), 2023 To 2030
9. Construction & Building Materials Market by Material Type (Bricks & Blocks, Concrete & Cement, Insulation Materials), Category (Architectural Materials, Auxiliary Materials, Structural Materials), Sales Channel, Application, Construction Type - Global Forecast 2025-2030
10. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Барановський В.Б. та ін. / Будівельне матеріалознавство // — Київ: Видавництво Ліра-К, 2015. — 624 с.
11. Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Христич О.В. В'язучі матеріали / Практикум з дисципліни «ЗТТНСМ». - Харків: Підручник НТУ «ХПІ», 2014.
12. 2020 Global Magnesia Refractory & Industrial Internet Promotion Conference”, China.
13. Плугін А.А., Плугін А.М., Кагановський О.С. та ін. / Енергоресурсозберігаючі мінеральні в'язучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі // Київ: Наук. думка, 2012.
14. Лівінський О.М., Курок О.І., Пушнін О.М., Савицький М.В., Дудар І.Н., Бондаренко М.І., Хоменко О.Г., Патапова Т.Е. / Будівельні матеріали та вироби : підручник / - К. : «МП Леся», 2016.

References

1. Shabanova G.M., Taranenkova V.V., Gaponova O.O. / Highly efficient magnesium binders based on domestic raw materials // Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport. – 2013. – Issue 138. – P. 148–154.
2. Hasan Yu.G., Pashchenko T.M. / Building materials // Kyiv: KNUBA, 2013. — 528 p.
3. Pushkareva K.K., Dvorkin L.Y., Gradoboev O.V. et al. / Energy-saving mineral binders and composite building materials based on them // – Kyiv, 2014.
4. Hasan Yu. G., Pashchenko T.M. / Building materials in 2 parts. Kyiv // Kyiv National University of Construction and Architecture, 2013.
5. Sanitsky M.A., Sobol H.S., Markiv T.E. / Modified Composite Cements: Monograph // Lviv: LP, 2010.
6. Durastanti C., Moretti L. Environmental Impacts of Cement Production: A Statistical Analysis. Applied Sciences, 2020.
7. Onyekwena C.C., Xue Q., Li Q., Umeobi H.I., Ghaffar A., Fasihnikoutalab M.H. Advances in the carbonation of MgO-based binder and CO₂ utilization in the construction industry. Clean Technologies and Environmental Policy, 2023.
8. Building Materials Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Aggregates, Bricks, Cement, Others), 2023 To 2030
9. Construction & Building Materials Market by Material Type (Bricks & Blocks, Concrete & Cement, Insulation Materials), Category (Architectural Materials, Auxiliary Materials,

Structural Materials), Sales Channel, Application, Construction Type - Global Forecast 2025-2030

10. Kryvenko P.V., Pushkareva K.K., Baranovsky V.B. et al. / Building Materials Science // — Kyiv: Publishing House Lira-K, 2015. — 624 p.

11. Shabanova G.M., Korogodskaya A.M., Khrystych O.V. Binding Materials / Practical Course on the Discipline "ZTTNSM". - Kharkiv: Textbook of NTU "KhPI", 2014. 12. 2020 Global Magnesia Refractory & Industrial Internet Promotion Conference", China.

13. Plugin A.A., Plugin A.M., Kaganovsky O.S. et al. / Energy-saving mineral binders and composite building materials based on them // Kyiv: Nauk. Dumka, 2012.

14. Livinsky O.M., Kurok O.I., Pshynko O.M., Savitsky M.V., Dudar I.N., Bondarenko M.I., Khomenko O.G., Patapova T.E.

/ Building materials and products: textbook / - Kyiv: "MP Lesya", 2016.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедри технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Сторчай Надія Станіславівна, Український державний університет науки і технологій

Автор: МАЛИЙ Євгеній Миколайович
Аспірант кафедри будівельного виробництва та управління проектами

Національний університет «Запорізька політехніка»
e-mail: mal.eugene.cgi@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9654-6540>

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND INTEGRATION OF MAGNESIUM BINDING MATERIALS INTO MODERN BUILDING TECHNOLOGIES

Yevhenii Maliy

National University "Zaporizhzhia polytechnic, Ukraine

This study highlights the prospects for the development and integration of magnesian materials into modern construction technologies. Magnesian binders exhibit a rapid setting time, low shrinkage, good adhesion to surfaces, and resistance to aggressive environments. They outperform Portland cement in terms of strength, thermal stability, and crack resistance, while their production requires less energy. During the hardening process, they absorb CO₂, reducing greenhouse gas emissions and contributing to climate change mitigation. This unique feature makes them a promising material for sustainable and eco-friendly construction practices.

Magnesian materials are increasingly used in a variety of applications, including thermal insulation boards, fire-resistant coatings, decorative panels, and even in 3D printing for construction. In China, they are particularly popular due to their low cost and the abundant availability of magnesite. In the United States and Canada, magnesian binders are widely applied in fire-resistant structures, offering better durability and safety compared to traditional materials.

In Ukraine, however, magnesian binders are not produced on an industrial scale, despite the country's large reserves of dolomite, which is a primary raw material for their production. The development of this industry could significantly reduce the import of expensive cement, while also decreasing the environmental burden associated with cement production. The use of magnesian binders could become a sustainable alternative to traditional cement in construction, offering lower energy consumption, improved quality of building structures, and the ability to implement more modern and advanced technologies. Nevertheless, the widespread adoption of magnesian binders is currently hindered by a lack of investment, research, and technological advancement. Without significant state support and targeted investments in research and development, the market will remain dependent on imported analogs, and the potential of this promising material will not be fully realized. Magnesian binders could play a crucial role in the development of sustainable and energy-efficient construction solutions, contributing to the global efforts to reduce carbon footprints. The future of this technology depends on continued scientific research, the implementation of innovative approaches, and the expansion of production capacities. As the construction industry moves toward more eco-conscious practices, magnesian materials could become integral to realizing the goals of green architecture and energy-efficient building design.

Keywords: CO₂ emissions, cement, magnesia binders, hardening mechanism, environmental friendliness, energy efficiency, innovative technologies, corrosion resistance