

Нестеренко М.Б.<https://orcid.org/0009-0007-9974-6150>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ (ВАПНЯКУ ТА ПІСКУ) НА ФОРМУВАННЯ ПОРОВОЇ СТРУКТУРИ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Інтенсивний розвиток будівельної галузі зумовлює необхідність підвищення довговічності й експлуатаційної надійності сухих будівельних сумішей, що застосовуються в мурувальних, штукатурних і ремонтних технологіях. Одним із ключових чинників, що визначає стійкість таких матеріалів до кліматичних впливів, є особливості формування їх порової структури. Мікроструктура цементного каменю безпосередньо впливає на водопоглинання, проникність та стійкість до циклів заморожування і відтавання. У цьому контексті важливого значення набуває дослідження ролі мінеральних наповнювачів природного походження, зокрема піску та вапняку, в процесах структуроутворення цементних композицій. Метою дослідження є встановлення впливу фізико-хімічних і гранулометричних характеристик мінеральних наповнювачів на формування порової структури та морозостійкість сухих будівельних сумішей у складі модифікованих в'язучих систем. Методологічною основою дослідження є узагальнення сучасних наукових підходів до аналізу структури цементних композицій, порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень та систематизація наукових даних щодо впливу гранулометричних і мінералогічних характеристик наповнювачів на структуру цементного каменю. У результаті проведеного дослідження узагальнено закономірності впливу дисперсності та мінералогічного складу піску і вапняку на формування мікроструктури цементних композицій. Показано, що використання дрібнодисперсного вапнякового порошку сприяє ущільненню структури цементного каменю та зменшенню об'єму капілярних пор. Доведено, що поєднання полідисперсних фракцій кварцового піску забезпечує більш ефективне пакування зерен і формування рівномірної мікропористої структури. Установлено взаємозв'язок між параметрами пористості та морозостійкістю цементних композицій, адже зменшення кількості відкритих капілярних пор і формування системи мікропор сприяє підвищенню стійкості матеріалу до циклічних температурних впливів. На основі узагальнення отриманих результатів сформовано рекомендації щодо оптимізації складу сухих будівельних сумішей шляхом раціонального підбору мінеральних наповнювачів різної дисперсності. Перспективи подальших досліджень пов'язані з експериментальним вивченням мікроструктурних процесів у модифікованих в'язучих системах із використанням різних фракцій природних і техногенних мінеральних наповнювачів, а також із розробленням композицій будівельних матеріалів для експлуатації в умовах різких кліматичних коливань.

Ключові слова: мінеральні наповнювачі, цементні композиції, мікроструктура цементного каменю, гранулометричний склад, довговічність будівельних матеріалів, модифіковані в'язучі системи.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток будівельної галузі пов'язаний із широким застосуванням сухих будівельних сумішей, що використовуються для мурувальних, штукатурних і ремонтних робіт. Експлуатаційна надійність таких матеріалів значною мірою визначається їх мікроструктурою, зокрема параметрами порового простору, який формується в процесі тверднення в'язучих систем. Пористість безпосередньо впливає на водопоглинання, міцність

і стійкість матеріалу до циклічного заморожування-відтавання. Дослідження показують, що зміна гранулометричного складу та мінералогічної природи наповнювачів здатна істотно модифікувати структуру пор і, відповідно, довговічність цементних композицій [1; 2]. У зв'язку з цим підбір і модифікація мінеральних наповнювачів є одним із ключових напрямів підвищення експлуатаційних характеристик сухих будівельних сумішей.



Особливу увагу дослідників привертає використання природних мінеральних матеріалів (піску та вапняку) як функціональних компонентів цементних систем. Їхня мінералогічна структура, форма частинок і поверхнева активність можуть впливати не лише на ущільнення структури розчину, але і на процеси гідратації в'язучих речовин. За результатами сучасних експериментальних досліджень встановлено, що застосування вапнякового порошку або модифікованого піску може сприяти формуванню більш рівномірної порової структури та підвищенню морозостійкості цементних матеріалів [3; 4]. Водночас у науковій літературі відзначається, що вплив таких наповнювачів залежить від їхніх фізико-хімічних характеристик, дисперсності та взаємодії із компонентами в'язучої системи.

Незважаючи на значну кількість наукових праць у галузі композиційних будівельних матеріалів, питання формування порової структури сухих будівельних сумішей за участю різних мінеральних наповнювачів залишається недостатньо вивченим. Деякі роботи демонструють позитивний ефект використання альтернативних мінеральних порошоків або техногенних матеріалів, які здатні змінювати структуру цементного каменю та підвищувати його стійкість до впливу низьких температур. Водночас механізми впливу традиційних природних компонентів, таких як кварцовий пісок і вапняковий порошок, на мікроструктуру та морозостійкість сухих сумішей потребують подальшого системного аналізу.

Для української будівельної практики ця проблема має особливу актуальність, оскільки значна частина конструкцій експлуатується в умовах циклічних температурних коливань і підвищеної вологості. Раціональне використання мінеральних наповнювачів дозволяє як покращити структуру цементного каменю, так і знизити матеріаломісткість та підвищити довговічність будівельних матеріалів [5, с. 137–139; 6]. Отже, дослідження впливу характеристик піску та вапняку на формування порової структури і морозостійкість сухих будівельних сумішей є важливим науковим і практичним завданням у сфері хімічної технології композиційних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика формування порової структури цементних композицій та її впливу на морозостійкість будівельних матеріалів активно досліджується у світовій науковій літературі. Значна частина робіт присвячена вивченню ролі мінеральних наповнювачів у структуроутворенні цементного

каменю. Так, Х. Цзенг (H. Zeng) та Ю. Лі (Y. Li) встановили, що вапнякові та гранітні порошки у складі цементних композицій може зменшувати загальну пористість і підвищувати міцність матеріалу в умовах низьких температур. Науковці пояснюють це ефектом ущільнення структури цементного каменю [7]. Водночас М. Чжоу (M. Zhou) та В. Донг (W. Dong) доводять, що зміна гранулометрії піску призводить до трансформації порової системи та безпосередньо впливає на міцнісні характеристики бетону в умовах низьких температур [8]. Також Л. Фенг (L. Feng) та ін. дослідили синергетичний ефект гумового порошку та нанокремнезему, довівши, що така комбінація сприяє формуванню більш стабільної порової структури та підвищує морозостійкість бетону [9].

У сучасних міжнародних дослідженнях значна увага приділяється мікроструктурним механізмам деградації цементних матеріалів під час циклічного заморожування. Наприклад, Р. Ванг (R. Wang) та ін. встановили, що використання пустельного піску в сухих мурувальних розчинах змінює структуру капілярних пор, що впливає на характер руйнування матеріалу під час морозних циклів [10]. Подібні результати отримали Ц. Ву (Q. Wu) та ін., які довели, що синтетичний вапняковий пісок може підвищувати морозостійкість цементних систем на основі магній-калій-фосфатного цементу [11].

Питання використання вапнякових агрегатів і наповнювачів у цементних композиціях також розглянуто в роботах К. Сіамарді (K. Siamardi), С. Шабані (S. Shabani) та А. Мансуріана (A. Mansourian), які показали, що оптимізація складу сумішей із вапняковими агрегатами дозволяє покращити структурну однорідність цементного каменю [12]. У свою чергу, Д. Шен (D. Shen) та ін. встановили, що гумові частинки можуть змінювати еволюцію порової структури під час циклів заморожування-відтавання [13].

В українських дослідженнях також приділяється увага формуванню структури цементно-піщаних матеріалів. Зокрема, А. Бондар та ін. також відзначають перспективність використання вторинних мінеральних матеріалів у виробництві сухих будівельних сумішей [14]. Також С. Шарма (S. Sharma) та А. В'яс (A. Vyas) показують, що мінеральні порошки можуть ефективно використовуватися як дрібні агрегати у цементних розчинах [15].

Отже, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень зосереджена на бетонних композиціях або на окремих видах

модифікаторів. При цьому недостатньо вивченими залишаються питання взаємодії природних мінеральних наповнювачів, таких як кварцовий пісок і вапняковий порошок, у складі сухих будівельних сумішей та їх впливу на формування порової структури і морозостійкість матеріалів. Саме ця наукова проблема потребує подальшого дослідження, що і визначає актуальність та спрямованість представленої роботи.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження впливу характеристик мінеральних наповнювачів (піску та вапняку) на формування порової структури і морозостійкість сухих будівельних сумішей у складі модифікованих в'язучих систем. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Дослідити вплив гранулометричних і мінералогічних характеристик піску та вапняку на формування порової структури сухих будівельних сумішей.

2. Проаналізувати взаємозв'язок між параметрами пористості цементного каменю та морозостійкістю матеріалу.

3. Сформувані рекомендації щодо використання піску та вапняку для підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей.

Виклад основного матеріалу. Формування порової структури цементних композицій є складним багатофакторним процесом, який визначається співвідношенням компонентів суміші, гранулометричним складом наповнювачів та умовами гідратації в'язучих речовин. Мінеральні наповнювачі виконують не лише функцію інертного заповнювача, але і здатні істотно впливати на мікроструктуру цементного каменю. Дрібнодисперсні частинки піску та вапнякового порошку беруть участь у формуванні структури капілярних пор і впливають на щільність пакування зерен у композиції.

Зміна дисперсності мінеральних наповнювачів приводить до перерозподілу порового простору. Зокрема, збільшення частки тонкодисперсних фракцій сприяє зменшенню об'єму великих капілярних пор і формуванню більш рівномірної мікропористої структури. Подібні результати також отримані в дослідженнях цементних систем із використанням вапнякового наповнювача, де було встановлено підвищення щільності структури цементного каменю та зниження капілярної пористості матеріалу [3].

У дослідженнях, присвячених цементно-піщаним розчинам, також підтверджено важливу роль гранулометрії мінеральних компонентів.

Зокрема, встановлено, що оптимальне співвідношення крупних і дрібних фракцій наповнювача сприяє більш ефективному ущільненню структури матеріалу та зменшенню кількості відкритих пор [5, с. 138–139]. Аналогічні висновки наведені в статті М. Нестеренка, де доведено, що використання вапнякового порошку в модифікованих в'язучих сумішах сприяє формуванню більш стабільної мікроструктури цементного каменю [6].

Отримані результати дозволили систематизувати основні характеристики мінеральних наповнювачів, що впливають на формування порової структури сухих будівельних сумішей (табл. 1). Варто відзначити, що мінералогічні та гранулометричні характеристики піску і вапняку є визначальними чинниками формування порової структури сухих будівельних сумішей.

Морозостійкість цементних матеріалів безпосередньо пов'язана з параметрами порового простору, оскільки під час заморожування вода, що міститься в капілярах, збільшується в об'ємі та створює внутрішні напруження. Чим більший об'єм відкритих капілярних пор, тим вищий ризик руйнування структури матеріалу під час циклів заморожування-відтавання.

У сучасних дослідженнях встановлено, що оптимізація порової структури дозволяє істотно підвищити довговічність цементних композицій. Зокрема, в дослідженні Р. Ванга (R. Wang) показано, що матеріали з рівномірним розподілом мікропор демонструють значно кращу стійкість до циклічних температурних впливів [10]. Подібні результати отримані в статті Ц. Ву (Q. Wu) та ін., які встановили, що застосування вапнякових компонентів сприяє формуванню більш стабільної структури цементного каменю та підвищує морозостійкість розчинів [11].

У роботах, присвячених структурі бетонів, також доведено, що зменшення розміру капілярних пор сприяє зниженню проникності матеріалу для води. Це, у свою чергу, обмежує об'єм води, який бере участь у процесах заморожування. Крім того, встановлено, що використання мінеральних наповнювачів із високою дисперсністю дозволяє зменшити коефіцієнт водопоглинання та підвищити морозостійкість композицій. У таблиці 2 узагальнено взаємозв'язок між параметрами пористості та морозостійкістю матеріалів. Тому оптимізація порової структури цементного каменю є одним із ключових чинників підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей.

Підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей можливе в результаті оптимізації складу мінеральних наповнювачів. Основною умовою є забезпечення раціонального гранулометричного складу суміші, який дозволяє зменшити об'єм відкритих капілярних пор і сформувати більш стабільну мікроструктуру цементного каменю. Використання вапнякового порошку в складі сухих сумішей дозволяє підвищити щільність структури та покращити контакт між зернами цементу і піску. У результаті відбувається формування більш однорідної структури матеріалу, що позитивно впливає на його довговічність. Подібні результати також підтверджують дослідження, присвячені використанню альтернативних мінеральних компонентів у цементних системах [15].

Крім того, ефективним підходом є використання комбінованих мінеральних наповнювачів із різною дисперсністю. Такий підхід дозволяє забезпечити більш щільне пакування зерен і зменшити пористість матеріалу. Водночас застосування вторинних мінеральних матеріалів також

розглядається як перспективний напрям підвищення ефективності сухих будівельних сумішей. Основні рекомендації щодо використання мінеральних наповнювачів у складі сухих будівельних сумішей викладено в таблиці 3.

Враховуючи вищевикладене, оптимізація характеристик мінеральних наповнювачів є ефективним інструментом керування поровою структурою цементного каменю та підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей.

Висновки. Проблема підвищення довговічності сухих будівельних сумішей, що експлуатуються в умовах змінних температур і вологості, залишається важливим науковим та прикладним завданням сучасної будівельної матеріалознавчої науки. Використання природних мінеральних компонентів, зокрема піску та вапняку, відкриває можливості для керування структурою цементних систем і підвищення експлуатаційних характеристик сухих будівельних сумішей.

Досліджено вплив гранулометричних і мінералогічних характеристик піску та вапнякового

Таблиця 1

Вплив характеристик мінеральних наповнювачів на формування порової структури цементних композицій

Характеристика наповнювача	Прояв у структурі цементного каменю	Результат для порової структури
Дрібнодисперсний вапняковий порошок	Ущільнення структури	Зменшення капілярних пор
Полідисперсний кварцовий пісок	Оптимальне пакування зерен	Зниження загальної пористості
Тонкі мінеральні частинки	Заповнення міжзернового простору	Формування мікропористої структури
Однорідний гранулометричний склад	Стабільність структури	Рівномірний розподіл пор

Джерело: узагальнено автором на основі [3; 4; 5, с. 138–139; 6; 8].

Таблиця 2

Взаємозв'язок характеристик порової структури та морозостійкості цементних композицій

Параметр порової структури	Характер впливу на матеріал	Вплив на морозостійкість
Велика кількість капілярних пор	Підвищене водопоглинання	Зниження морозостійкості
Наявність мікропор	Компенсація внутрішнього тиску льоду	Підвищення морозостійкості
Нерівномірний розподіл пор	Локальні напруження в структурі	Прискорене руйнування
Рівномірна мікропориста структура	Зменшення проникності	Підвищення довговічності

Джерело: узагальнено автором на основі [2; 10; 11; 13].

Таблиця 3

Рекомендації щодо використання мінеральних наповнювачів для підвищення морозостійкості сухих будівельних сумішей

Напрямок оптимізації	Характеристика рішення	Очікуваний результат
Оптимізація гранулометричного складу	Використання полідисперсних фракцій піску	Зменшення пористості
Використання вапнякового порошку	Дрібнодисперсний мінеральний наповнювач	Ущільнення структури
Комбінування наповнювачів	Поєднання піску різної дисперсності	Стабільна мікропориста структура
Використання мінеральних добавок	Вторинні мінеральні матеріали	Підвищення довговічності

Джерело: власна розробка автора.

наповнювача на формування порової структури цементних композицій. Встановлено, що використання дрібнодисперсного вапнякового порошку та полідисперсного кварцового піску сприяє ущільненню структури цементного каменю і зменшенню об'єму капілярних пор. Проаналізовано взаємозв'язок між параметрами пористості та морозостійкістю матеріалу. Визначено, що рівномірний розподіл мікропор у структурі цементного каменю забезпечує зниження водопоглинання та підвищує стійкість матеріалу до циклів заморозування-відтавання. Сформовано рекомендації щодо оптимізації складу сухих будівельних сумішей шляхом раціонального підбору мінеральних наповнювачів різної дисперсності та використання вапнякового порошку як структуроутворювального компонента.

Практичне значення дослідження полягає в можливості підвищення морозостійкості та довговічності будівельних матеріалів за рахунок оптимізації мінерального складу наповнювачів. Наукова новизна роботи зводиться до систематизації впливу гранулометричних і мінералогічних характеристик піску та вапняку на формування порової структури сухих будівельних сумішей і визначенні їх ролі в підвищенні морозостійкості цементних композицій.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне вивчення мікроструктурних процесів у модифікованих в'язучих системах із використанням різних фракцій мінеральних наповнювачів, а також на розроблення композицій сухих сумішей із підвищеною морозостійкістю для експлуатації в умовах різких кліматичних коливань.

Список літератури:

1. Zhang J. et al. Effect of aeolian sand on pore structure and frost resistance of foam concrete. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 114. Article 114445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114445> (дата звернення: 10.03.2026).
2. Ding Z. et al. A study on the change in frost resistance and pore structure of concrete containing blast furnace slag under the carbonation conditions. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 331. Article 127295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127295> (дата звернення: 10.03.2026).
3. Zhang M. et al. Study on the frost resistance of composite limestone powder concrete against coupling effects of sulfate freeze-thaw. *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 11. Article 2776. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112776> (дата звернення: 10.03.2026).
4. Jiang Z. et al. Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand / *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 94. Article 109965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965> (дата звернення: 10.03.2026).
5. Трикоз Л., Зінченко О., Никитинський А. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Будівництво та цивільна інженерія*. 2024. № 111. С. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17> (дата звернення: 10.03.2026).
6. Нестеренко М. Використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у модифікованих цементних в'язучих сумішах. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Інженерні науки*. 2025. Т. 1. № 2 (93). DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.23> (дата звернення: 10.03.2026).
7. Zeng H., Li Y. Effect of waste stone powder on compressive strength and pore structure of concrete in extreme low temperature and complex environment. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. Article 110108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110108> (дата звернення: 10.03.2026).
8. Zhou M., Dong W. The relationship between pore structure and strength of aeolian sand concrete under low temperature. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. Article 108067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108067> (дата звернення: 10.03.2026).
9. Feng L., Cao H., Shi X., Wang D. Synergistic effect of rubber powder and nano-silica on pore structure and frost resistance of concrete. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. P. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36480-8> (дата звернення: 10.03.2026).
10. Wang R. et al. Freeze-thaw deterioration characteristics and microstructural mechanisms of desert sand dry-mixed masonry mortar. *Journal of Building Engineering*. 2026. Vol. 120. Article 115564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2026.115564> (дата звернення: 10.03.2026).
11. Wu Q. et al. Influence of synthetic limestone sand on the frost resistance of magnesium potassium phosphate cement mortar. *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 19. Article 6517. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196517> (дата звернення: 10.03.2026).
12. Siamardi K., Shabani S., Mansourian A. Optimization of concrete mixes using mixture approach for slip-formed concrete pavement incorporating blends of limestone aggregates. *Construction and Building Materials*.

2023. Vol. 397. Article 132377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132377> (дата звернення: 10.03.2026).

13. Shen D., Yu Y., Jin Z., Li N. Effects of crumb rubber particles on the evolution of pore structure in steam-cured concrete under freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 103. Article 112138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112138> (дата звернення: 10.03.2026).

14. Бондар А., Христич О., Бондар О., Сафроненко І. Перспективи використання вторинних відходів будівельної галузі у виробництві сухих будівельних сумішей. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т. 36. № 1. С. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70> (дата звернення: 10.03.2026).

15. Sharma S., Vyas A. K. A study on use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 93. Part 3. P. 176–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.115> (дата звернення: 10.03.2026).

Nesterenko M.B. INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF MINERAL FILLERS (LIMESTONE AND SAND) ON THE FORMATION OF THE PORE STRUCTURE AND FROST RESISTANCE OF DRY BUILDING MIXTURES

The intensive development of the construction industry necessitates increasing the durability and operational reliability of dry building mixtures used in masonry, plastering, and repair technologies. One of the key factors determining the resistance of such materials to climatic influences is the peculiarities of their pore-structure formation. The microstructure of cement stone directly affects water absorption, permeability and resistance to freezing and thawing cycles. In this context, the study of the role of mineral fillers of natural origin, in particular sand and limestone, in the structure-forming processes of cement compositions is of great importance. The study aims to establish the influence of the physicochemical and granulometric characteristics of mineral fillers on the formation of pore structure and frost resistance of dry building mixtures in modified binder systems. The methodological basis of the study is the generalization of modern scientific approaches to the analysis of the structure of cement compositions, the comparative analysis of the results of experimental studies, and the systematization of scientific data on the influence of granulometric and mineralogical characteristics of fillers on the structure of cement stone. As a result of the study, the patterns of influence of the dispersion and mineralogical composition of sand and limestone on the formation of cement microstructure were generalized. It was shown that the use of finely dispersed limestone powder contributes to the compaction of the cement stone structure and reduces the volume of capillary pores. It was proven that the combination of polydisperse quartz sand fractions provides more effective grain packing and the formation of a uniform microporous structure. The relationship between porosity parameters and frost resistance in cement compositions was established: a decrease in the number of open capillary pores and the formation of a micropore system increase the material's resistance to cyclic temperature effects. Based on the generalization of the obtained results, recommendations were formulated for optimizing the composition of dry building mixtures through the rational selection of mineral fillers with different dispersions. Prospects for further research include the experimental study of microstructural processes in modified binder systems using different fractions of natural and artificial mineral fillers, as well as the development of compositions for building materials for operation under conditions of sharp climatic fluctuations.

Keywords: *mineral fillers, cement compositions, microstructure of cement stone, particle size distribution, durability of building materials, modified binder systems.*

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026