

УДК 691.24:628.4

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ В БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, асп. М. В. Сташко,  
кандидати техн. наук А. В. Никитинський, В. В. Семенова-Куліш

## PROSPECTS OF USING MINERAL WOOL WASTE IN BUILDING MATERIALS

Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, postgrad. student M. Stashko,  
PhD (Tech.) A. Nykytynskyi, PhD (Tech.) V. Semenova-Kulish

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362541>



**Анотація.** У статті комплексно проаналізовано сучасні підходи щодо переробки та повторного використання відходів мінеральної вати, включно з термохімічним плавленням, лужною активацією, синтезом аерогелів і використанням у цементних композитах. Показано, що методи глибокої переробки, хоча і дають змогу отримати матеріали з високими експлуатаційними характеристиками, є енергозатратними, технологічно складними та чутливими до варіацій хімічного складу відходів. Натомість використання мінеральної вати як волокнистого або пористого заповнювача в цементних розчинах і бетонах без попередньої хімічної модифікації демонструє стабільні переваги: покращення тріщиностійкості, підвищення міцності на згин, зменшення водопоглинання та значне підвищення вогнестійкості матеріалів. Зроблено висновок, що найбільш раціональним і екологічно доцільним напрямом повторного використання відходів мінеральної вати є їх безпосереднє включення до складу будівельних матеріалів як армуючого або легкого заповнювача.

**Ключові слова:** мінеральна вата, будівельні та демонтажні відходи, цементні композити, міцність на вигин, міцність на стиск, вогнестійкість, теплоізоляція, циркулярна економіка.

**Abstract.** Mineral wool is one of the most widely used thermal insulation materials in the construction sector, and its waste constitutes a significant portion of construction and demolition debris. This article provides a comprehensive review of current approaches to the recycling and reuse of mineral wool waste, including thermochemical melting, alkaline activation, silica aerogel synthesis, and direct incorporation into cementitious composites. Although advanced recycling methods can yield high-performance materials, they are technologically complex, energy-intensive, and highly sensitive to variations in the chemical composition of waste. Thermochemical processing requires temperatures above 850–1000 °C and is hindered by uncontrolled furnace-lining dissolution, while alkaline activation relies on concentrated NaOH solutions (6–10 M), limiting scalability and increasing environmental risks. Silica aerogel synthesis offers exceptional material properties but demands specialized equipment and is unsuitable for large-scale waste management.

In contrast, numerous studies confirm the effectiveness of using recycled mineral wool as a fibrous or porous filler in cement mortars and concrete without prior chemical or thermal

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Трикоз Л. В., Сташко М. В.,

Никитинський А. В., Семенова-Куліш В. В., 2026.

modification. The addition of 0.5–1.5 % fibres improve crack resistance, elastic modulus, flexural strength, and water resistance while reducing thermal conductivity and enhancing fire performance. Quantitative results demonstrate that flexural strength can increase by 40–50% compared with reference mixes, rising from approximately 0.60 MPa to 0.88 MPa in mortars and from 1.0 MPa to 1.2–1.4 MPa in concrete. Tensile strength also improves due to fibre bridging, while compressive strength decreases moderately. For example, mortars with 1 % mineral wool retain 88 % of the reference compressive strength (9.8 MPa vs. 11.2 MPa), and mixes with 1.5 % fibres retain about 68 % (7.6–7.8 MPa). In concrete, compressive strength reductions of 10–30 % are observed but remain within acceptable limits for non-structural and some structural applications.

Fire-resistance studies show particularly strong benefits. After exposure to 700 °C, fibre-reinforced mortars retain more than 50 % of their initial flexural strength (3.7–4.8 MPa), whereas the reference mix loses over 90 % (from 7.09 MPa to 0.48 MPa). Compressive strength after fire remains between 13 and 21 MPa, meeting regulatory requirements. Thermal conductivity decreases from 1.17 W/m·K in the reference mix to 0.69–0.93 W/m·K in fibre-reinforced composites, confirming improved insulation performance. Temperature-profiling experiments show that fibre-reinforced mortars reach peak internal temperatures 100–250 °C lower than the reference, preventing explosive spalling.

These findings demonstrate that direct incorporation of mineral wool waste into cementitious materials is the most rational, cost-effective, and environmentally sustainable reuse pathway. It enhances flexural performance, crack resistance, thermal stability, and fire resistance while maintaining acceptable compressive strength. Future research should focus on optimizing fibre dosage and morphology for different material types, modelling long-term performance under moisture, freeze–thaw cycles, and high temperatures, and developing standardized classification and preparation methods for mineral wool waste to ensure safe and efficient use in the construction industry.

**Keywords:** mineral wool, construction and demolition waste, cement composites, flexural strength, compressive strength, fire resistance, thermal insulation, circular economy.

**Вступ.** Накопичення відходів будівництва та знесення (ВБЗ) не тільки в Україні через бойові дії, але і в усьому світі через стихійні лиха, геополітичні конфлікти або масштабні програми реновації викликає необхідність визначення нових способів їх використання як перероблених матеріалів. Наразі такий вид відходів є одним із найбільших у Європейському Союзі і, за різними оцінками, становить 25–30 % усіх утворених відходів. Директива ЄС про відходи 2008/98/ЄС вимагала від держав-членів переробляти 70 % своїх БВЗ як сировину до 2020 року [1]. Однак поточний рівень переробки становить лише приблизно 46 % через недостатню інформацію про перероблені матеріали, їх негативне сприйняття, несподівано високу вартість порівняно з первинними матеріалами та суперечливу інформацію

про їхню доступність, довговічність, якість і функціональність. Хоча повторне використання будівельних відходів у бетоні широко вивчали в останні роки, повторне використання інших відходів знесення не було всебічно досліджено. Для досягнення цілей переробки та повторного використання 70 % ВБЗ необхідні нові способи використання широкого спектра перероблених матеріалів – деревини, паперу, картону, металу, скла, мінеральної вати, гіпсу та кераміки як вихідних компонентів для композиційних матеріалів. Це дослідження зосереджено на вивченні можливостей повторного використання мінеральної вати із відходів знесення зруйнованих будинків, пропонуючи екологічно значущий шлях інтеграції відходів мінеральної вати у виробництво будівельних матеріалів, зменшуючи

навантаження на сміттєзвалища та сприяючи досягненню цілей скорочення викидів CO<sub>2</sub>.

**Аналіз попередніх досліджень.** Мінеральна вата є широко використовуваним матеріалом для ізоляції будівель, що забезпечує тепловий комфорт, а також вогнестійкість і акустичний комфорт для всіх типів будівель. Відходи мінеральної вати, що утворилися під час виробництва або під час реконструкції чи знесення будівель, можна переробити знову в розплав для подальшого виробництва вати. У дослідженні [2] порівнюють теплову реакцію та поведінку плавлення звичайної мінеральної вати і відходів мінеральної вати. Дослідження показує, що звичайна шихта і відходи мінеральної вати мають принципово різні теплові реакції, де шихта зазнає виділення газу, фазового переходу та плавлення окремих сировинних матеріалів. На противагу цьому, відходи мінеральної вати зазнають склування, кристалізації та остаточного плавлення. Вимірювання показують, що відходи вати починають плавитися за нижчої температури (850 °C), ніж звичайна сировина (більше 1000 °C). Крім того, відходи вати потребують на 23 % менше енергії для нагрівання та плавлення, ніж звичайна шихта, що робить переробку відходів доцільною як екологічно, так і технологічно. Наступним кроком була термохімічна обробка з використанням корегувальних матеріалів для корегування хімічного складу з подальшим швидким охолодженням для виготовлення нової вати з її відходів за допомогою процесу прядіння [3]. Було проаналізовано хімічний склад виробленої мінеральної вати і показано, що цільовий склад не може бути досягнутий для всіх елементів виготовленої вати в межах дозволених варіацій, які були зумовлені розчиненням футеровки печі, що мало більш значний вплив на експеримент, ніж очікували.

У роботі [4] досліджено переробку мінеральної вати із ВБЗ в активовані лугом легкі ізоляційні агрегати, призначені для

ізоляції ґрунтового покриття. Різні пропорції подрібненої вати активували лугом для отримання заповнювачів, які мають насипну щільність у діапазоні від 720 до 850 кг/м<sup>3</sup> і теплопровідність у сухому стані від 0,075 до 0,094 Вт/(м·К) із помірною водосорбційною здатністю. Морфологія волокон мінеральної вати впливає на реологію, утворюючи більшу кількість пор або дефектів, що призводить до зниження механічної міцності. Але гідротермальне моделювання показало, що підлога із заповненням виготовленими агрегатами демонструє зменшення вмісту води та підвищення температури поверхні. Це свідчить про потенційні переваги для збереження структурної цілісності будівель і підвищення комфорту мешканців.

Основний виклик для повторного використання ВБЗ – це непостійність їхнього складу і, відповідно, властивостей. Автори статті [5] оцінювали теплову поведінку мінераловатної ізоляції, отриманої з 30-річної будівлі, і порівнювали з еталонними зразками мінераловатного утеплювача без забруднень. Дослідження переробленого матеріалу охоплювало три форми: необроблені відходи знесення, мікроподрібнені волокна та подрібнені волокна. Еталонний зразок продемонстрував найкращі показники, маючи мінімальну теплопровідність 0,0379 Вт/м·К за щільності 64 кг/м<sup>3</sup>. Зразки з перероблених матеріалів мали підвищену теплопровідність, проте залишались у прийнятних межах для теплоізоляції. Значення  $\lambda$  для мікроподрібнених і подрібнених матеріалів варіювалися від 0,040 до 0,055 Вт/м·К залежно від щільності та морфології волокон. Встановлено, що поведінка перероблених зразків відрізняється від еталонного; первинний матеріал підтримував майже постійний коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda \approx 0,038$  Вт/м·К) по всьому діапазону щільності, тоді як подрібнені і мікроподрібнені зразки демонстрували зниження  $\lambda$  зі збільшенням щільності до 120 кг/м<sup>3</sup>, що відображає

баланс між конвекцією, спричиненою пористістю за низьких щільностей, і домінуванням теплопровідності за вищих щільностей. Мікроподрібнений матеріал найбільше відповідає тепловим характеристикам еталонної ізоляції і є оптимальним для заповнення порожнин, у той час як подрібнений матеріал забезпечує адекватну роботу лише за підвищеної щільності завдяки щільній структурі коротких волокон. Схожі результати були отримані в роботі [6]: незважаючи на вплив зовнішнього середовища на мінеральну вату протягом 18 місяців, випробування підтвердили відсутність значного впливу атмосферних умов на коефіцієнт теплопровідності. Вимірний параметр знаходився в межах граничних значень, зазначених виробником і включених до технічних паспортів продукції.

Як розв'язання проблеми утилізації відходів мінеральної вати було запропоновано переробити їх на геополімер [7]. Процес геополімеризації потребує розчинення вихідного матеріалу в розчині з високим рН (лужному). Результати досліджень показали, що оптимальна концентрація NaOH становить 8 М для найвищої міцності геополімеру на стиск. Геополімерні розчини на основі скловати з додаванням  $Al_2O_3$  отримали середню міцність на стиск 59 МПа, середня міцність на стиск геополімерного розчину на основі мінеральної вати становила близько 62 МПа. Автори статті [7] довели, що можна отримати міцність геополімеру до 100 МПа, стійкого до усадкової деформації, але після модифікації його складу. У дослідженні [8] подано новий метод переробки відходів мінеральної вати на кремнеземні аерогелі, синтезовані методом сушіння за атмосферного тиску. Аерогелі є відомими ізоляційними матеріалами завдяки своїм унікальним властивостям, таким як низька теплопровідність і щільність, висока площа поверхні та пористість, а також вогнестійкість. Кілька зразків відходів, які мають різний ступінь забруднення від

відходів знесення, протестовано для визначення впливу поширених забруднювачів на ефективність видобутку кремнезему. Отримані аерогелі є гідрофобними та мають теплопровідність 22-26 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>, питому площу поверхні 603-676 м<sup>2</sup>/г і щільність 86-136 кг/м<sup>3</sup>. Це дослідження демонструє новий підхід щодо вилучення кремнезему з відходів мінеральної вати, ураховуючи домішки, пов'язані зі знесенням.

Дослідження [9] демонструє, що відходи мінеральної вати можуть бути перетворені на реакційноздатний додатковий цементний матеріал через термохімічну обробку, утворюючи фракції шлаку, характеристики яких наближаються до характеристик звичайних цементзамісних матеріалів. Отримані шлаки демонструють високий вміст аморфних речовин, що перевищує 97 об.% після швидкої грануляції, що є важливим для гідравлічної реакційної здатності. Характеристики, пов'язані з міцністю, відображені в індексі активності, який коливається від 0,95 до 1,03 через 28 днів, що означає, що розчини, які містять 25 % переробленого шлаку, досягають міцності на стиск, що дорівнює 95–103 % еталонного розчину. Тобто якщо еталонний розчин досягне приблизно 50 МПа через 28 днів, то суміші, які містять шлак, досягнуть від 47,5 до 51,5 МПа, що підтверджує, що перероблений матеріал не знижує механічних характеристик. Дослідження виділення тепла додатково підтверджує цю реакційну здатність зі значеннями від 329,6 до 494,3 Дж/г, що значно перевищує контрольний показник 250 Дж/г, який зазвичай асоціюють із високоякісними цементзамісними матеріалами.

Аналіз літератури показує, що, хоча відходи мінеральної вати можуть бути перероблені в нові матеріали через термохімічну обробку, лужну активацію або синтез аерогелів, ці методи є складними, дорогими, енергозатратними та чутливими до домішок. Вони потребують високих

температур, концентрованих лугів або спеціалізованого обладнання, що суттєво обмежує їх практичне застосування у сфері масової переробки будівельних відходів. Через це використання мінеральної вати як заповнювача будівельних матеріалів без попередньої хімічної чи термічної модифікації є найбільш технологічно доцільним, економічно вигідним і екологічно сталим рішенням. Перероблена мінеральна вата зберігає прийнятні теплоізоляційні властивості, може бути використана як насипний заповнювач або армуючий компонент, покращує теплоту, звукоізоляцію конструкцій і не потребує складної підготовки. Це робить її перспективним компонентом для широкого впровадження у виробництво будівельних матеріалів нового покоління. Але суперечливість літературних даних про результати такого застосування не дає змогу вибрати оптимальний шлях переробки мінеральної вати в нові будівельні матеріали. Тому актуальним завданням є порівняння характеристик різних матеріалів, отриманих із рециклінгової мінеральної вати, для вибору найраціональнішого способу її повторного використання.

**Мета і завдання дослідження.** Метою цієї роботи є комплексне оцінювання потенціалу відходів мінеральної вати як вторинного ресурсу для будівельних матеріалів і визначення найбільш раціонального напрямку їх повторного використання. Дослідження спрямоване на порівняння ефективності різних підходів щодо переробки мінеральної вати – від термохімічної та лужної активації до безпосереднього включення в цементні композити – з акцентом на їхню технологічну складність, енергетичні витрати, стабільність властивостей і вплив на механічні, теплотехнічні, вогнестійкі характеристики матеріалів. Особливу увагу приділяють визначенню оптимальних умов, за яких перероблена мінеральна вата може бути використана як волокнистий або

пористий заповнювач без попередньої хімічної чи термічної модифікації, забезпечуючи підвищення тріщиностійкості, вогнестійкості та довговічності будівельних матеріалів зі збереженням прийняттого рівня міцності. Для досягнення мети необхідно з'ясувати і порівняти акустичні та теплові характеристики мінераловатних систем, гіротермічну поведінку та довговічність із тривалим зберіганням, органічні, неорганічні та гібридні системи в'язучих речовин, вогнестійкість і стійкість до високих температур, шляхи переробки та ресайклінгу відходів мінеральної вати.

**Методологія дослідження.** Цей огляд синтезує експериментальні та аналітичні результати рецензованих досліджень, опублікованих між 2018 і 2025 роками. Для порівняння методологій, виявлення спільних висновків і висвітлення прогалин в інших дослідженнях було використано підхід наративного синтезу, який починається з систематичного, комплексного, відтворюваного плану виявлення, оцінювання та синтезу існуючих літературних джерел. Після цього огляду поглиблено проаналізували сучасний стан справ для визначення тем для подальшого вивчення. Це дослідження зосереджено на комплексному огляді літератури щодо можливостей використання відходів будівництва і знесення у виробництві композитів як наповнювача та арматури або як матриці. Для обговорення потенціалу відходів у композитах було проведено дослідження літератури за допомогою пошукової системи Google Scholar, баз даних Science-Direct, Web of Science, Taylor & Francis, Research Gate і програми LIFE Європейської Комісії. Додаткові довідкові матеріали були використані для оцінювання впливу переробки на матеріали, економіку та вплив на навколишнє середовище перероблених матеріалів у композитах, а також на аспекти обробки. Межі огляду літератури були встановлені для визначення статей для подальшого вивчення. Валідність

вибраної літератури визначена на основі аналізу назви, методів, матеріалів та анотації дослідницької роботи, після чого нерелевантні дослідження були виключені. Роботи, що зосереджені на використанні перероблених заповнювачів у бетоні, не обговорювали, оскільки вони вже були ретельно вивчені та розглянуті [10]. Було підготовлено п'ять критеріїв, щоб визначити, чи є матеріал релевантним для дослідження. Вибрані роботи мали відповідати принаймні одному з критеріїв або доповнювати обговорення додатковою інформацією.

**Основна частина досліджень.** У дослідженні [11] оцінено цементні розчини, армовані відходами мінеральної вати у кількості 1,0 і 1,5 % маси цементу. Легкоукладальність знижувалася зі збільшенням вмісту волокна, при цьому осідання зменшувалося з 50 мм у контрольній суміші до 30–40 мм у сумішах, армованих волокном. Механічні характеристики показали протилежні тенденції: міцність на стиск постійно знижувалася, тоді як міцність на вигин покращувалася (табл. 1).

Таблиця 1

Міцність на вигин і стиск цементних зразків через 28 днів

Вміст волокна, %	Міцність на вигин, МПа	Зміна порівняно з контролем, %	Міцність на стиск, МПа	Зміна порівняно з контролем, %
0	0.60–0.65	–	≈11.2	–
1.0	≈0.75	+23 %	9.82	–12 %
1.5	0.88	+47 %	≈7.6	–32 %

Через 28 днів контрольний розчин досяг міцності на стиск приблизно 11,2 МПа. Найкраще значення міцності продемонструвала суміш з 1 % мінеральної вати (9,82 МПа), що становить зниження на 12 % порівняно з еталоном. Міцність на стиск суміші з 1,5 % мінеральної вати знизилася ще більше до 7,6–7,8 МПа, що становить зниження на 32 %. Результати міцності на згин різко контрастували з тенденціями стиску. Контрольний розчин досяг приблизно 0,60 МПа через 28 днів, тоді як суміш з 1,5 % досягла 0,88 МПа, що на 47 % більше. Усі суміші, армовані волокном, зберегли щонайменше 75 % міцності на згин у контрольному варіанті. Показники довговічності також показали неоднозначні результати. Водопоглинання через 28 днів коливалося від 0,031 % (для вмісту вати 1,5 %) до 0,178 % (контрольний варіант), що свідчить про покращену вологостійкість сумішей, армованих волокном. Об'ємна щільність дещо

зменшилася – із 18,6 кг/м<sup>3</sup> у контрольному варіанті до 17,6 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає збільшенню пористості та зниженню міцності на стиск. Загалом це дослідження демонструє, що відходи мінеральної вати, особливо в кількості 1,5 %, покращують міцність на згин і зменшують водопоглинання, хоча і за рахунок зниження міцності на стиск. Результати підтверджують вибіркоче використання волокон мінеральної вати в неконструкційних розчинах, де пріоритетом є екологічність.

Дослідження [12] було зосереджено на розробленні найбільш екологічно чистого бетону через використання перероблених матеріалів, отриманих у результаті будівельних і демонтажних робіт. Як перероблений крупний заповнювач, так і перероблений дрібний заповнювач спочатку були використані для повної заміни натуральних крупних і дрібних заповнювачів у бетонній суміші. Багаті на

цемент ультрадрібні частинки, порошок переробленого скла та мінеральні волокна, отримані з будівельних і демонтажних відходів, додатково додавали в меншій кількості або як замітник цементу, або як додаткові добавки. Додавання ультрадрібного подрібненого матеріалу, багатого на цемент, ультрадрібного подрібненого скла та перероблених мінеральних волокон до переробленого бетону покращує модуль пружності.

Кінцевий бетон, який складається з понад 75 % перероблених матеріалів, вважають найбільш екологічною бетонною сумішшю. Механічні властивості та довговічність цього бетону були досліджені та відповідали прийнятним величинам, що вказує на потенціал перероблених заповнювачів та інших компонентів у формуванні практик сталого і циркулярного будівництва (табл. 2).

Таблиця 2

Механічні властивості бетону з додаванням ВБЗ і без них

Властивість	Без додавання ВБЗ	Із додаванням ВБЗ	Вплив ВБЗ
Міцність на стиск	Базова міцність переробленого бетону C30/37	Подібний діапазон; без значного збільшення	Неістотний
Міцність на розтяг	Нижча міцність на розтяг (3,5 МПа)	Вища міцність на розтяг завдяки наявності волокон (4,1 МПа)	↑ Покращення
Міцність на згин	Помірна (4,5 МПа)	Незначне покращення завдяки армуванню волокнами	↑ Покращення
Модуль пружності	Нижча жорсткість (25 ГПа)	Вищий модуль пружності (30 ГПа)	↑ Значне покращення
Усадка/розтріскування	Вищий ризик мікротріщин (77 %)	Знижена схильність до розтріскування (56 %)	↑ Покращення
Легкоукладальність	Прийнятна	Знижена	↓ Погіршення

Основні результати використання перероблених мінерально-ватних волокон, за даними цього дослідження, полягають у такому. Додавання рециклінгової вати у кількості 0,5 % за масою призводить до вищої міцності на розтяг (за рахунок перекриття мікротріщин і підвищення стійкості до розтріскування), вищого модуля пружності (суміші з волокнами демонструють чітке збільшення жорсткості порівняно із сумішами без волокон). Міцність на стиск залишається в допустимих межах, додавання волокон не збільшує міцність на стиск суттєво, але значення залишаються в межах конструкційних вимог. Також додавання волокон покращує

тріщиностійкість – зменшує крихкість і допомагає контролювати розтріскування від усадки. Легкоукладальність помітно знижується через велику площу поверхні та низьку щільність волокон. Саме тому дозування переробленої мінеральної вати обмежене кількістю 0,5 %.

Дослідження [13] було проведено з метою вивчення застосовності відходів скловати і мінеральної вати як волокнистої арматури в цементобетоні. Метою дослідження було оцінити властивості свіжого бетону, міцність і довговічність через додавання відходів скловати і відходів мінеральної вати до 0,5–2,0 % ваги цементу (табл. 3).

Механічні властивості та тенденції довговічності зразків бетону

Властивість	Портланд-цемент (ПЦ)	Кількість рециклінгових волокон, %					
		Скловата			Мінеральна вата		
		0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
Міцність на стиск, МПа	≈10.0	≈9.0	≈8.5	≈7.0	≈8.5	≈8.0	≈6.5
Зміна порівняно з ПЦ	–	↓10 %	↓15 %	↓30 %	↓15 %	↓20 %	↓35 %
Міцність на вигин, МПа	≈1.00	≈1.10	≈1.20	≈1.30	≈1.05	≈1.10	≈1.20
Зміна порівняно з ПЦ	–	↑10 %	↑20 %	↑30 %	↑5 %	↑10 %	↑20 %
Міцність на розтяг	Базова лінія	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Стійкість до заморожування-відтавання	Базова лінія	Покращено значно	Покращено	Покращено	Погіршено	Погіршено	Відповідає вимогам
Проникнення хлоридів	Базова лінія	Подібно до ПЦ	Подібно	Трохи гірше	Гірше	Гірше	Значно гірше
Осідання, мм	135	130	130	100	135	125	100

У дослідженні оцінювали, чи можна повторно використовувати відходи скловати і відходи мінеральної вати як армуючу фібру в бетоні з додаванням 0,5–2,0 % маси цементу. Свіжий бетон показав лише незначні зміни у вмісті повітря, але осідання зменшилося зі 135 мм в еталонній суміші до 100 мм, коли вміст волокон досяг 2,0 %, що відображає високе водопоглинання волокон. Щодо механічних характеристик, то міцність на стиск постійно знижувалася з додаванням волокон. Через 28 днів еталонний бетон перевищив 10 МПа, тоді як найкраща суміш волокон досягла приблизно 9–10 МПа, що є незначним зниженням. Суміші з мінеральною ватою показали сильніше зниження приблизно до 7–8 МПа, що підтверджує, що більший об'єм волокон створює порожнечу і послаблює матрицю. Однак характеристики розтягу та згину покращилися. Відходи скловати з концентрацією 1,0 і 2,0 % збільшили міцність на розтяг порівняно з еталонним

бетоном, при цьому міцність на вигин зростає з приблизно 1,0 МПа в контролі до 1,2–1,4 МПа в сумішах, армованих волокном. Показники довговічності також змінилися: стійкість до заморожування-відтавання покращена для всіх сумішей скловати, зберігаючи динамічний модуль вище 80 % після 300 циклів, тоді як мінеральна вата потребувала додавання щонайменше 2,0 % для досягнення аналогічної стійкості. Проникнення хлоридів залишалося порівняним з еталонним бетоном для скловати, при цьому загальний пропущений заряд залишався в діапазоні 1000–2000 кулонів (низька проникність), тоді як мінеральна вата з вищими дозами перевищувала 4000 кулонів, що свідчить про високу проникність. Загалом дослідження показує, що відходи скловати є більш придатними, ніж відходи мінеральної вати, для армування бетону, пропонуючи помітне збільшення міцності на розтяг і вигин, зберігаючи при цьому довговічність, хоча зниження міцності на

стиск на 10–30 % необхідно враховувати в конструкційних застосуваннях.

Метою дослідження [14] є аналіз вогнестійкості цементних розчинів із мінеральною ватою, отриманою з перероблених будівельних і демонтажних відходів. Перероблені розчини піддавали впливу прямого вогню за максимальної температури 700 °С. Результати показують, що твердість поверхні всіх розчинів практично не змінюється після пожежі, тоді як включення залишків волокон призводить до значного покращення міцності на згин після випробування на вогнестійкість

порівняно з еталонним розчином. Значення міцності на стиск усіх розчинів знижуються після пожежі, хоча вони залишаються на оптимальних значеннях для використання відповідно до нормативних вимог. Значення теплопровідності нижчі або залишаються незмінними після випробування на вогнестійкість. Результати показують, що додавання цих перероблених волокон може бути стійкою альтернативою комерційним, що використовують зараз, покращуючи механіко-термічні властивості після пожежі та запобігаючи вибухонебезпечній поведінці розчинів (табл. 4).

Таблиця 4

Механічні та теплові властивості зразків цементного розчину з мінеральною ватою та без неї перед та після пожежі

Властивість	Контрольний зразок	50 % мінеральна вата	50 % скловолокно	50 % суміші
1	2	3	4	5
Міцність на згин до пожежі, МПа	7.09	7.33	6.57	6.46
Міцність на згин після пожежі, МПа	0.48	4.63	4.80	3.73
Втрата міцності на згин, %	-92.7 %	-36.8 %	-27.0 %	-42.2 %
Міцність на стиск перед пожежею, МПа	29.58	25.63	24.07	20.70
Міцність на стиск після пожежі, МПа	13.93	13.14	19.08	21.42
Втрата міцності на стиск, %	-52.9 %	-45.41 %	-20.7 %	+3.5 %
Твердість поверхні перед пожежею (за Шором D)	84.12	85.80	84.17	83.67
Твердість поверхні після пожежі (за Шором D)	79.78	79.90	83.30	79.90
Теплопровідність перед пожежею, Вт/м·К	1.17	0.93	0.93	0.90
Теплопровідність після пожежі, Вт/м·К	1.10	0.69	0.90	0.78
Максимальна температура, досягнута під час пожежі, °С	700	~600	~550–600	449.9

Механічні характеристики перед та після впливу вогню підтверджують

стабілізуючий ефект залишків мінеральної вати. Міцність на згин у контрольному

розчині зменшилася на 92,7 %, знизившись з 7,09 МПа до 0,48 МПа, тоді як розчини із залишками мінеральної вати зберегли понад 50 % своєї початкової міцності на згин, а значення після пожежі залишалися між 3,73 і 4,80 МПа. Міцність на стиск також зменшилася після пожежі, але всі армовані розчини підтримували значення вище 13,14 МПа, що повністю відповідає нормативним нормам 0,4–7,5 МПа для мурувальних розчинів. Перед впливом вогню міцність на стиск коливалася від 20,70 до 29,58 МПа, а після пожежі залишалася між 13,14 і 21,42 МПа, причому найбільше зниження спостерігали в розчинах із мінеральної вати на рівні 45,41 %. Значення теплопровідності ще раз підкреслюють ізоляційні переваги включення волокон. Перед пожежею армовані розчини показали нижчу провідність, ніж еталонний (1,17 Вт/мК), зі значеннями від 0,90 до 0,93 Вт/мК. Після пожежі провідність розчинів із мінеральної вати ще більше знизилася, досягнувши 0,69 Вт/мК, тоді як розчини зі скловолокна та змішаної вати зберегли свої значення перед пожежею. Твердість поверхні залишилася майже незмінною, з втратами менше 2 %, що підтверджує стабільність межі між волокном і матрицею, незважаючи на тепловий шок. Це дослідження показує, що включення перероблених волокон мінеральної вати до цементних розчинів значно покращує їхню поведінку під впливом вогню. Розчини піддавали прямому впливу полум'я, температура якого досягала 700 °С, при цьому контрольні зразки вибухнули протягом перших 15 хв, тоді як усі розчини, армовані волокном, залишилися неушкодженими. Вимірювання температури показали, що контрольний розчин досяг пікових температур, близьких до 700 °С, тоді як розчини із залишками мінеральної вати досягали пікових температур між 550 та 600 °С, а розчини зі змішаної суміші досягли лише  $\approx 450$  °С, що свідчить про зниження термічного

напруження через збільшення порових каналів, утворених плавленням волокон.

**Висновки.** Найбільш раціональним напрямом застосування відходів мінеральної вати, зважаючи на узагальнення наведених досліджень, є використання їх як волокнистого або пористого заповнювача в цементних і бетонних матеріалах без складної попередньої обробки. Усі роботи, що оцінювали механічні, реологічні, теплотехнічні та вогнестійкі властивості таких композитів, мають стабільний позитивний ефект від включення перероблених волокон у помірних дозуваннях, тоді як методи глибокої переробки (термохімічне плавлення, лужна активація або синтез аерогелів) виявляються технологічно складними, енергозатратними та чутливими до домішок. У випадку цементних розчинів і бетонів додавання 0,5–1,5 % переробленої мінеральної вати покращує тріщиностійкість, модуль пружності та міцність на згин, водночас знижуючи водопоглинання і підвищуючи вогнестійкість. Навіть після впливу температур до 700 °С такі розчини зберігають понад половину початкової міцності на згин, тоді як контрольні суміші руйнуються вибухоподібно. Це підтверджує, що волокна створюють канали для розсіювання пари і зменшують термічні напруження. Зниження міцності на стиск, характерне для всіх волокнистих композитів, залишається в межах нормативних вимог для неконструкційних і частини конструкційних застосувань, а в бетоні з переробленими заповнювачами та волокнами міцність і модуль пружності залишаються прийнятними для практичного використання.

Отже, найраціональнішим, технологічно простим і екологічно виправданим шляхом повторного використання мінеральної вати є її включення до складу цементних розчинів і бетонів як волокнистого заповнювача або модифікатора структури без попередньої хімічної чи термічної обробки. Такий підхід забезпечує покращення тріщиностійкості,

вогнестійкості, теплотехнічних властивостей і довговічності матеріалів, зберігаючи при цьому прийнятний рівень міцності та мінімізуючи витрати на переробку. Подальші перспективи досліджень полягають у визначенні оптимальних дозувань і морфології волокон для різних типів будівельних матеріалів,

модельованні довготривалої поведінки таких композитів за дії вологи, циклів заморожування-відтавання та високих температур, а також у розробленні стандартизованих методів підготовки та класифікації відходів мінеральної вати для їх безпечного та ефективного використання в будівельній індустрії.

### Список використаних джерел

1. Sormunen, P. & Kärki, T. (2019). Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering*, 24, 100742. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100742>
2. Schultz-Falk, V., Agersted, K., Jensen, P.A. & Solvang, M. (2018). Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 485, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.035>
3. Sattler, T., Doschek-Held, K., Krammer, A., Pomberger, R. & Vollprecht, D. (2024). Recycling of potential hazardous stone wool into a non-hazardous new stone wool. *Detritus*, 26, 60–68. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2024.18355>
4. Koh, C. H., Luo, Y., Schollbach, K., Gauvin, F. & Brouwers, H. J. H. (2024). A circular approach to stone wool: Alkali-activated lightweight aggregates. *Developments in the Built Environment*, 19, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100506>
5. Domonkos, M., Zobal, O., Prošek, Z. & Trejbal, J. (2022). Thermal properties of mineral wool insulation recovered from construction and demolition waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 34, 6–10. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.34.0006>
6. Noszczyk, P., Schabowicz, K. & Tunkiewicz, M. (2025). The influence of storing mineral wool on its thermal conductivity in an open space. *Open Engineering*, 15, 20240094. <https://doi.org/10.1515/eng-2024-0094>
7. Łazniewska-Piekarczyk, B., Czop, M. & Smyczek, D. (2022). The Comparison of the Environmental Impact of Waste Mineral Wool and Mineral in Wool-Based Geopolymer. *Materials*, 15, 2050. <https://doi.org/10.3390/ma15062050>
8. Borzova, M., Gauvin, F. & Schollbach, K. (2025). Upcycling Waste Mineral Wool into Ambient Pressure-Dried Silica Aerogels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13, 7. P. 2955–2965. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c09976>
9. Doschek-Held, K., Krammer, A. C., Steindl, F. R., Sattler, T. & Juhart, J. (2024). Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 42(9), 806–813. <https://doi.org/10.1177/0734242x241237199>
10. Трикоз, Л. В., Зінченко, О. С., Калінін, О. А., Никитинський, А. В. (2024). Вплив виду обробки рециклінгових заповнювачів на міцність бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*, 4(022), 126–133.
11. Awoyera, P. O., Odutuga, O. L., Effiong, J. U., De Jesus Silvera Sarmiento, A., Mortazavi, S. J. & Hu, J. W. (2022). Development of Fibre-Reinforced Cementitious Mortar with Mineral Wool and Coconut Fibre. *Materials*, 15, 4520. <https://doi.org/10.3390/ma15134520>
12. Gebremariam, A. T., Vahidi, A., Di Maio, F., Moreno-Juez, J., Vegas-Ramiro, I., Łagosz, A., Mróz, R. & Rem, P. (2021). Comprehensive study on the most sustainable concrete design made

of recycled concrete, glass and mineral wool from C&D wastes. *Construction and Building Materials*, 273, 121697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121697>

13. Lim, C.-S., Jang, D.-S., Kim, J.-C., Kim, H.-S. & Lee, J.-J. (2023). A Study on the Applicability of Waste Glass Wool and Waste Mineral Wool as Fiber Reinforcement. *Applied Sciences*, 13, 10738. <https://doi.org/10.3390/app131910738>

14. Piña Ramírez, C., Vidales Barriguete, A., Serrano Somolinos, R., del Río Merino, M. & Atanes Sánchez, E. (2020). Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. *Construction and Building Materials*, 265, 120349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120349>

### References

1. Sormunen, P. & Kärki, T. (2019). Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering*, 24, 100742. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100742>

2. Schultz-Falk, V., Agersted, K., Jensen, P.A. & Solvang, M. (2018). Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 485, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.035>

3. Sattler, T., Doschek-Held, K., Krammer, A., Pomberger, R. & Vollprecht, D. (2024). Recycling of potential hazardous stone wool into a non-hazardous new stone wool. *Detritus*, 26, 60–68. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2024.18355>

4. Koh, C. H., Luo, Y., Schollbach, K., Gauvin, F. & Brouwers, H. J. H. (2024). A circular approach to stone wool: Alkali-activated lightweight aggregates. *Developments in the Built Environment*, 19, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100506>

5. Domonkos, M., Zobal, O., Prošek, Z. & Trejbal, J. (2022). Thermal properties of mineral wool insulation recovered from construction and demolition waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 34, 6–10. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.34.0006>

6. Noszczyk, P., Schabowicz, K. & Tunkiewicz, M. (2025). The influence of storing mineral wool on its thermal conductivity in an open space. *Open Engineering*, 15, 20240094. <https://doi.org/10.1515/eng-2024-0094>

7. Łazniewska-Piekarczyk, B., Czop, M. & Smyczek, D. (2022). The Comparison of the Environmental Impact of Waste Mineral Wool and Mineral in Wool-Based Geopolymer. *Materials*, 15, 2050. <https://doi.org/10.3390/ma15062050>

8. Borzova, M., Gauvin, F. & Schollbach, K. (2025). Upcycling Waste Mineral Wool into Ambient Pressure-Dried Silica Aerogels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13, 7. P. 2955–2965. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c09976>

9. Doschek-Held, K., Krammer, A. C., Steindl, F. R., Sattler, T. & Juhart, J. (2024). Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 42(9), 806–813. <https://doi.org/10.1177/0734242x241237199>

10. Trykoz, L. V., Zinchenko, O. S., Kalinin, O. A., Nikitinsky, A. V. (2024). Vplyv vydu obrobky retsyklinhovoykh zapovnyuvachiv na mitsnist' betonu [The influence of the type of processing of recycled aggregates on the strength of concrete]. *Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, 4(022), 126–133. [in Ukrainian].

11. Awoyera, P. O., Odutuga, O. L., Effiong, J. U., De Jesus Silvera Sarmiento, A., Mortazavi, S. J. & Hu, J. W. (2022). Development of Fibre-Reinforced Cementitious Mortar with Mineral Wool and Coconut Fibre. *Materials*, 15, 4520. <https://doi.org/10.3390/ma15134520>

12. Gebremariam, A. T., Vahidi, A., Di Maio, F., Moreno-Juez, J., Vegas-Ramiro, I., Łagosz, A., Mróz, R. & Rem, P. (2021). Comprehensive study on the most sustainable concrete design made

of recycled concrete, glass and mineral wool from C&D wastes. *Construction and Building Materials*, 273, 121697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121697>

13. Lim, C.-S., Jang, D.-S., Kim, J.-C., Kim, H.-S. & Lee, J.-J. (2023). A Study on the Applicability of Waste Glass Wool and Waste Mineral Wool as Fiber Reinforcement. *Applied Sciences*, 13, 10738. <https://doi.org/10.3390/app131910738>

14. Piña Ramírez, C., Vidales Barriguete, A., Serrano Somolinos, R., del Río Merino, M. & Atanes Sánchez, E. (2020). Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. *Construction and Building Materials*, 265, 120349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120349>

---

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68.

E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Сташко Микола Валерійович, здобувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: stashko.mykola@gmail.com. ORCID 0009-0009-1995-8327.

Никитинський Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-63. E-mail: NykytynskyiAV@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-4923-8568.

Семенова-Куліш Вікторія Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-55. E-mail: semenova.vit@kart.edu.ua. ORCID 0000-0003-4807-0625.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Stashko Mykola, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: stashko.mykola@gmail.com. ORCID 0009-0009-1995-8327.

Nykytynskyi Andrii, PhD, associate professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-63. E-mail: NykytynskyiAV@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-4923-8568.

Semenova-Kulich Victoria, PhD, associate professor, Mechanical Engineering and Technical Service of Machines Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-55. E-mail: semenova.vit@kart.edu.ua. ORCID 0000-0003-4807-0625.

Дата надходження статті 17.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY