

Трикоз Л. В., д-р техн. наук, проф.;

Сташко М. В., аспірант

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна

ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ З БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ: НОВІ МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Екологічні проблеми, спричинені промисловими відходами, мають універсальний характер, і досягнення належного управління будівельними та знесеними відходами стало одним із найбільших викликів сучасного суспільства. Застосування критеріїв циркулярної економіки для розробки нових, більш стійких будівельних матеріалів стало одним з головних викликів для суспільства майбутнього. В Україні зростання кількості зруйнованих або знесених будівельних конструкцій призводить до утворення значної кількості відходів, у тому числі мінеральної вати. Цей матеріал широко використовувався для ізоляції будівель, забезпечуючи тепловий та акустичний комфорт і вогнестійкість. Незважаючи на те, що повторне використання відходів руйнування широко досліджується останніми роками, повторне використання мінеральної вати не було ретельно вивчено. Ця стаття має на меті забезпечити комплексний огляд літератури, що стосується можливостей використання переробленої мінеральної вати у виробництві будівельних матеріалів, і при цьому покращити механічні властивості матеріалів, зменшити їхню теплопровідність та підвищити довговічність, що буде сприяти сталому розвитку будівельної галузі.

Один із можливих шляхів утилізації відходів мінеральної вати, що утворюються під час реконструкції чи знесення будівель, це переробка її назад у виробництво розплаву. У дослідженні [1] порівнюється теплова реакція та поведінка плавлення звичайної мінеральної вати та відходів знесення. Було показано, вони мають принципово різні теплові реакції, де звичайна сировина зазнає виділення газу, фазового переходу та плавлення окремих сировинних матеріалів, у той час як відходи зазнають склування, кристалізації та остаточного плавлення. Відходи вати починають плавитися при нижчій температурі, ніж звичайна шихта, і потребують менше енергії для нагрівання та плавлення, ніж звичайна сировина, що робить переробку рециклінгової мінеральної вати можливою як для екологічних, так і для технологічних цілей. Цікавим способом утилізації є переробка вати з будівельних відходів і відходів

знос у активовані лугом легкі ізоляційні заповнювачі [2]. Різні пропорції подрібненої вторинної вати активуються лугом для отримання заповнювачів теплоізоляційних матеріалів. Розроблені заповнювачі мали насипну щільність у діапазоні від 720 до 850 кг/м³ і теплопровідність у сухому стані від 0,075 до 0,094 Вт/м·К, з помірною водосорбційною здатністю. Морфологія волокон рециркульованої вати впливає на реологію, утворюючи більшу кількість пор або дефектів, що призводить до зниження механічної міцності. Гідротермальне моделювання показало, що улаштування теплоізоляційного шару на ґрунті із розроблених заповнювачів зменшило вміст води та підвищило температуру поверхні підлоги. Це дослідження свідчить про потенційні переваги цього способу утилізації та підвищення комфорту мешканців.

У літературі зустрічаються дані про використання подрібненої рециклінгової вати як наповнювача для цементних або композиційних матеріалів. Як показано у [3], використання перероблених матеріалів як матриці, наповнювача або волокна, як правило, призводить до виробництва матеріалів із слабшими механічними властивостями порівняно з первинними матеріалами. При цьому необхідно враховувати можливі забруднення, щоб запобігти поширенню шкідливих речовин. Встановлено, що найбільш перспективними переробленими будівельними відходами для виготовлення композиційних матеріалів є термопласти, мінеральна вата, гіпс і деревина. Стаття [4] спрямована на вивчення теплових і структурних властивостей переробленої ізоляції з мінеральної вати, отриманої з відходів будівництва та знесення. Дослідні зразки різної об'ємної щільності (в діапазоні 50...120 кг/м³) виготовляли з подрібнених відходів облицювання 30-річної будівлі. Отримані результати порівнювали з еталонними зразками мінерально-ватного утеплювача. Зразки, виготовлені з переробленої ізоляції, мали вищі коефіцієнти теплопровідності, ніж еталонні зразки, проте вони все ще демонстрували прийнятні ізоляційні властивості, оскільки їх коефіцієнт теплопровідності знаходився в діапазоні 0,040–0,055 Вт/(м·К). Подрібнений матеріал видається перспективним для використання як засипної ізоляції, так і як наповнювач для екструдованих матеріалів.

Після завершення терміну служби мінеральна вата класифікується як небезпечні відходи, які зазвичай захороняються на сміттєзвалищах, що є складним завданням через низьку насипну щільність і нестабільність розмірів. Ця обставина підкреслює необхідність альтернативних методів переробки, які збільшують безпечність переробки відходів будівництва та знесення. У статті [5] описано можливості термохімічної переробки відходів мінеральної вати для виробництва

додаткового цементного матеріалу. Після розплавлення відходів при температурі 1400 °C методом мокрої грануляції отримували гранули, які подрібнювали до розміру 0,1 мм. Отриманий матеріал є аморфною склоподібною фазою, який характеризується гідравлічною реакційною здатністю та індексом активності, ідентичними до портландцементу. Результати цього дослідження продемонстрували, що відходи вати після термохімічної обробки придатні для використання в якості реакційноздатних компонентів в'язучого. Цей вид переробки є доволі енерговитратним, тому потрібно шукати більш економні шляхи повторного використання мінеральної вати, наприклад, подрібнення для отримання мікронаповнювача [6]. У цьому документі представлені нові можливості переробки мінераловатних плит з системи утеплення 30-річної будівлі, які були піддані мікрофрезеруванню, щоб отримати наповнювач і коротко подрібнені волокна для штукатурних розчинів. Показано, що розчини з вмістом до 1,2 мас. % таких відходів продемонстрували зниження міцності при стиску на десятки відсотків порівняно з еталонною сумішшю. З іншого боку, їхня міцність на вигин та теплопровідність покращилися, що демонструє можливі шляхи використання рециклінгової вати як теплоізоляційного матеріалу.

Завдяки високому вмісту аморфного кремнезему рециркульовані плити можуть служити сировиною для кремнеземних аерогелів, синтезованих методом сушіння при атмосферному тиску [7]. Аерогелі є дуже добрими ізоляційними матеріалами завдяки своїм унікальним властивостям, таким як низька теплопровідність і щільність, висока площа поверхні та пористість, а також притаманна їм вогнестійкість. Однак нинішня висока ціна на аерогелі перешкоджає їх використанню у великих масштабах, частково через значні виробничі витрати, такі як сировина та енергоємний процес сушіння. Для вирішення цієї проблеми досліджується в [7] економічно ефективний спосіб виробництва з використанням відходів, що дозволить зменшити кількість відходів та сприяти сталому розвитку. Кілька зразків мінеральної вати, які мають різний ступінь забруднення від відходів знесення, було перероблено в аерогелі. Отримані матеріали є гідрофобними та мають теплопровідність 22-26 мВт/(м·К), питому площу поверхні 603-676 м²/г та густину 86-136 кг/м³. Це дослідження демонструє новий підхід до вилучення кремнезему з відходів мінеральної вати, враховуючи домішки, пов'язані зі знесенням, та пропонує розуміння практик сталого управління відходами.

Сумісне використання деревини та мінеральної вати зі знесених будівель було описано в [8]. Оброблені демонтажні відходи, змішані з полімерами та добавками, були екструдовані в порожнисті тестові бруски за допомогою конічного роторного

екструдера. Результати показали, що механічні характеристики деревно-пластикових композитів на основі деревини будівельних та демонтажних відходів, а також мінеральної вати були на рівні із зазвичай використовуваними деревно-пластиковими композитами для настилів. Суміш матеріалів, що містить кілька деревних фракцій, а також мінеральну вату, також забезпечила хороші міцнісні властивості. Це означає, що деревно-пластикові композити, придатні для багатьох типів застосування, можуть бути повністю виготовлені з перероблених матеріалів.

Основні закономірності впливу вторинних волокон мінеральної вати на властивості будівельних розчинів було досліджено в роботі [9]. Розчини виготовлялися як на природному заповнювачі так і на двох типах перероблених заповнювачів – відходів бетону та кераміки. Волокна мінеральної вати були включені як часткова заміна піску у відсотках 0%, 10% та 20%. Результати показали, що, хоча традиційні розчини мають кращі технічні характеристики, розчини, виготовлені з переробленого заповнювача, мають достатню придатність для використання на будівельному майданчику. Спостерігалось погіршення таких показників, як середня густина (з 2169 до 1959 кг/м³), поверхнева твердість (з 84 до 66 за шкалою Шора), капілярна абсорбція води (з 0,51 до 0,73 кг/мм²·хв), міцність при стиску (з 25,6 МПа до 13,93 МПа). У той же час, було зроблено висновок, що включення волокон переробленої мінеральної вати до матриці розчину зменшує теплопровідність (з 1,213 до 0,719 Вт/м·К) та усадку (з 0,4 до 0,25 мм/м) під час тужавіння цих матеріалів, збільшуючи їхню механічну міцність на згин (з 5,3 МПа до 6,15 МПа) та довговічність (найменші втрати міцності та маси після 20 циклів поперемінного заморожування-відтавання) [9]. Схожі залежності були отримані в [10] при дослідженні полегшених гіпсових композитів, які включають до свого складу відходи відпрацьованих шин та перероблені волокна з теплоізоляції з мінеральної вати. Додавання гумових заповнювачів і переробленого волокна мінеральної вати зменшило щільність затверділих гіпсових композитів, що, своєю чергою, зменшило теплопровідність цих матеріалів на 30%. Тому вони представлені як альтернативне рішення для підвищення енергоефективності будівель.

Також включення цих відходів зменшує проникність водяної пари та висоту капілярного підняття води порівняно з традиційними гіпсовими композитами. Це свідчить про технічну доцільність можливого застосування цих матеріалів як збірних матеріалів у вологих приміщеннях. Хоча механічні властивості знижуються внаслідок включення гумових заповнювачів та зменшення вмісту гіпсової пасти, у всіх проаналізованих випадках перевищено мінімальні значення, що вимагаються чинними

нормами, для міцності на згин (1 МПа) та міцності на стиск (2 МПа). Крім того, спостерігається хороша адгезія перероблених волокон мінеральної вати до гіпсової матриці, що призводить до кращої поведінки при згині та зменшує ризик крихкого руйнування цих екологічно чистих будівельних матеріалів. Результати показують, що можна зменшити споживання вихідної сировини, замінивши її переробленими відходами і отримавши нові будівельні матеріали, які є легшими, з кращою водостійкістю та більшою термостійкістю. Включення перероблених волокон із мінеральної та скловати є гарним рішенням для покращення механічної стійкості полегшених гіпсових композитів, надаючи цим будівельним та демонтажним відходам друге життя шляхом повторного включення їх у процес виробництва нових збірних будинків.

Висновок

Огляд існуючих дослідження показав, що відходи мінеральної вати можуть бути ефективно перероблені та використані у виробництві нових будівельних матеріалів. Використання рециклінгової мінеральної вати у виробництві цементних розчинів, деревно-пластикових композитів, гіпсових виробів та інших матеріалів демонструє значний потенціал для зменшення екологічного навантаження та підвищення стійкості будівельної галузі. Результати досліджень свідчать про те, що додавання відходів мінеральної вати до будівельних матеріалів може покращити деякі механічні властивості, зменшити теплопровідність та підвищити довговічність. Крім того, використання перероблених матеріалів може знизити витрати на виробництво та утилізацію відходів, а також сприяти економічному розвитку регіонів.

Однак, незважаючи на значний потенціал переробки відходів мінеральної вати, існують певні виклики, такі як необхідність розробки ефективних технологій збору та сортування відходів, забезпечення їх безпечного зберігання та транспортування, а також відповідність перероблених матеріалів будівельним нормам та стандартам. Подальші дослідження та впровадження нових технологій переробки можуть сприяти більш ефективному використанню цих відходів та зменшенню їхнього негативного впливу на навколишнє середовище. Таким чином, використання відходів мінеральної вати у виробництві будівельних матеріалів є перспективним напрямком, який може сприяти зменшенню екологічного навантаження, підвищенню стійкості будівельної галузі та економічному розвитку. Важливо продовжувати дослідження у цій сфері та впроваджувати нові технології переробки для досягнення більш сталого майбутнього.

Література

1. Schultz-Falk V., Agersted K., Jensen P.A., Solvang M. Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste. *Journal of Non-Crystalline Solids* 485 (2018) 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.035>
2. Koh C.H., Luo Y., Schollbach K., Gauvin F., Brouwers H.J.H. A circular approach to stone wool: Alkali-activated lightweight aggregates. *Developments in the Built Environment* 19 (2024) 100506. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100506>
3. Sormunen P., Kärki T. Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering* 24 (2019) 100742. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100742>
4. Domonkos M., Zobal O., Prošek Z., Trejbal J. Thermal properties of mineral wool insulation recovered from construction and demolition waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 34 (2022) 6-10. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.34.0006>
5. Doschek-Held K., Krammer A. C., Steindl F. R., Sattler T., Juhart J. Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* 42(9) (2024) 806-813. <https://doi.org/10.1177/0734242x241237199>
6. Trejbal J., Zobal O., Domonkos M., Prošek Z. New possibilities for recycling of mineral wool separated from thermal insulation waste. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 34 (2022) 122-126. <https://doi.org/10.14311/app.2022.34.0122>
7. Borzova M., Gauvin F., Schollbach K. Upcycling Waste Mineral Wool into Ambient Pressure-Dried Silica Aerogels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 13(7) (2025) 2955-2965. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c09976>
8. Jetsu P., Vilkki M., Tiihonen I. Utilization of demolition wood and mineral wool wastes in wood-plastic composites. *Detritus* 10 (2020) 19-25. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13916>
9. Ferrández D., Álvarez M., Saiz P., Zaragoza-Benzal A. Recovery of Mineral Wool Waste and Recycled Aggregates for Use in the Manufacturing Processes of Masonry Mortars. *Processes* 10 (2022) 830-849. <https://doi.org/10.3390/pr10050830>
10. Zaragoza-Benzal A., Ferrández D., Santos P., Morón C. Recovery of End-of-Life Tyres and Mineral Wool Waste: A Case Study with Gypsum Composite Materials Applying Circular Economy Criteria. *Materials* 16 (2023) 243-258. <https://doi.org/10.3390/ma16010243>