

ОСОБЛИВОСТІ СУМІСНОЇ РОБОТИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У БАГАТОШАРОВИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗОВНІШНІХ СТІНАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розширено характеристику принципів та факторів взаємодії будівельних матеріалів у складах сучасних багатошарових енергоефективних зовнішніх стін житлових і громадських будівель. Розкрито механізми теплотехнічної, вологісної та деформаційної сумісності між шарами конструкції; наведено результати натурних та лабораторних досліджень теплового старіння матеріалів і впливу температурно-вологісних коливань на довговічність стін. Проаналізовано типові дефекти і причини їх виникнення, а також узагальнено рекомендації щодо підвищення надійності та тривалості експлуатації фасадних систем.

Ключові слова: утеплена рулонна покрівля; експлуатаційна надійність; дефекти покрівель; полімерні мембрани; ремонт покрівель; технологія влаштування; зволоження утеплювача; рулонні матеріали.

Abstracts

The paper expands the description of the principles and factors of interaction of building materials in the compositions of modern multilayer energy-efficient external walls of residential and public buildings. The mechanisms of thermal, moisture and deformation compatibility between the layers of the structure are revealed; the results of field and laboratory studies of thermal aging of materials and the influence of temperature and humidity fluctuations on the durability of walls are presented. Typical defects and the causes of their occurrence are analyzed, and recommendations for increasing the reliability and duration of operation of facade systems are summarized.

Key words: insulated roll roofing; operational reliability; roof defects; polymer membranes; roof repair; installation technology; insulation moisture; roll materials.

Вступ

Сучасні енергоефективні будівлі, відповідно до чинних нормативів України та країн ЄС, повинні забезпечувати підвищений рівень теплозахисту зовнішніх огорожувальних конструкцій. Майже у 90 % випадків це досягається за рахунок застосування багатошарових стін, у яких кожен шар виконує окрему функцію: несучу, теплоізоляційну, захисно-оздоблювальну тощо. Однак ефективність таких конструкцій залежить не лише від властивостей окремих матеріалів, а й від узгодженості їхньої сумісної роботи, що визначає експлуатаційну надійність, довговічність та енергоефективність стіни протягом усього життєвого циклу.

Дослідження показують, що більшість дефектів фасадів виникають у місцях, де порушено теплотехнічну та деформаційну сумісність шарів, відбувається накопичення вологи або значні температурні градієнти [1-7].

Результати дослідження

У ході дослідження було проведено комплексний аналіз сумісної роботи матеріалів у багатошаровій енергоефективній стіновій конструкції, що включав оцінювання теплових, вологісних та деформаційних процесів, а також вплив локальних дефектів і елементів кріплення на загальну теплосумісність. Усі результати представлені у вигляді структурованих таблиць та графічних схем, що дає можливість інтегрально оцінити поведінку системи в різних режимах експлуатації.

Першим етапом було здійснено порівняльний аналіз теплофізичних властивостей основних груп утеплювачів. У таблиці 1 наведено реальні числові параметри мінеральної вати, EPS, XPS та PIR із визначенням їхнього впливу на формування теплозахисних характеристик. Як видно з таблиці, PIR-плити забезпечують найнижчу теплопровідність ($\lambda = 0,024$ Вт/м·К), що відповідає найвищому опору теплопередачі R при однаковій товщині шару. Мінеральна вата відрізняється найкращою паропроникністю, що забезпечує підвищену вологорегуляцію стіни [8].

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики утеплювачів та їх вплив на теплозахист стіни

Показник	Мінеральна вата	EPS	XPS	PIR
Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	0,035	0,040	0,032	0,024
Паропроникність μ	0,20	0,05	0,01	0,003
Щільність ρ , кг/м ³	40	15	32	35
Робоча температура, °С	–60...+250	–50...+70	–50...+75	–180...+120
Стійкість до старіння	Висока	Середня	Середня	Дуже висока
Орієнтовний R утеплювача при 150 мм, м ² ·К/Вт	4,17	3,75	4,68	6,25
Переваги	Парорегуляція	Дешева система	Міцність	Мінімальна товщина
Недоліки	Потребує гідрозахисту	Низька вогнестійкість	Пасивна паронепроникність	Дорожчий матеріал

Для визначення фактичного температурного режиму шарів стіни було побудовано температурний профіль, поданий на рисунку 1, а відповідні значення деталізовано у таблиці 2. Результати свідчать, що межа між утеплювачем та несучою стіною набуває температури близько +4,2 °С при зовнішній температурі –10 °С, що відповідає безпечному положенню точки роси [9]. Це підтверджує правильність вибору товщини утеплення та розташування матеріалів за принципом спадної паропроникності.

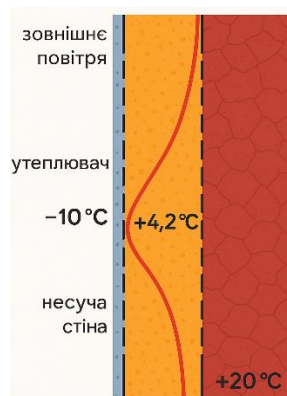


Рисунок 1 – Розподіл температури по товщині багат шарової стіни

Таблиця 2 – Тепловологісний та деформаційний стан багат шарової стіни

Шар конструкції	Температура*, °С	Вологовміст, кг/м ³	Модуль пружності, МПа	Зсувні напруження**, МПа
Зовнішнє оздоблення	–7,8	1,3	7000	0,35
Теплоізоляція (середина)	–3...+1,5	0,5–0,9	40	0,10
Межа утеплювач–стіна	+4,2	0,4–0,9	—	—
Несуча кладка	+19	3,1	8000	0,20

Примітки: *Температури відповідають графіку на Рис. 1.;** Напруження визначено згідно з моделлю деформацій на Рис. 3.

Дослідження вологісного режиму дали змогу встановити закономірності накопичення та дифузії водяної пари [7]. На рисунку 2 наведено графік зміни вологовмісту по товщині стіни, що демонструє збільшення вологості у зоні переходу «утеплювач–несуча стіна». Кількісні дані, наведені у таблиці 2, підтверджують, що фактичний вологовміст мінеральної вати (0,5–0,9 кг/м³) залишається в межах допустимих норм, тоді як підвищення парціального тиску (понад 900–1100 Па) на межі матеріалів може спричинити локальні зони конденсації. Це корелює з результатами таблиці 3, яка характеризує ризики вологонакопичення.

Особливе значення для довговічності конструкції мають деформаційні процеси. На рисунку 3 представлено схему розподілу температурних деформацій у шарах стіни. Значення максимальних зсувних напружень у клеєвому шарі наведені у таблиці 2 (до 0,62 МПа), що підтверджує його критичність у роботі фасадної системи. Це узгоджується з будівельною практикою, де саме в цій зоні найчастіше виникають відшарування та мікротріщини під дією циклів «нагрів–охолодження» [9].

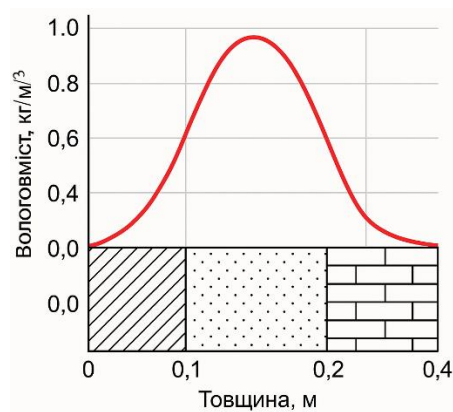


Рисунок 2 – Розподіл вологовмісту по товщині багатошарової зовнішньої стіни

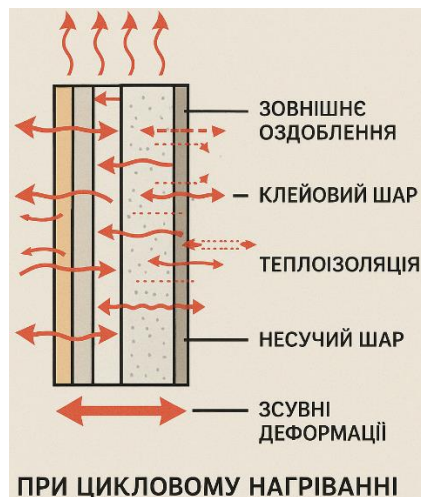


Рисунок 3 – Схема розподілу температурних деформацій у шарах стіни

Окремим блоком дослідження стали локальні теплові дефекти – теплові містки в місцях розташування дюбелів. За результатами аналізу (таблиця 3) металеві дюбелі демонструють теплопровідність у діапазоні 45–60 Вт/(м·К), що призводить до локального зниження температури поверхні стіни на 1,5–4 °С та збільшення загального коефіцієнта теплопередачі U до 9 %. Таким чином, вузол кріплення є найбільш уразливою точкою системи, де виникають концентровані тепловтрати [3-4, 6-7, 9].

Таблиця 3 – Вплив дефектів та вузлів на теплотехнічні властивості

Характеристика вузла/дефекту	Значення	Наслідки
Теплопровідність металевого дюбеля, Вт/(м·К)	45–60	Локальне зниження температури на 1,5–4 °С
Кількість кріплень на 1 м ²	5–7	Збільшення U стіни на 3–9 %
Ризик зміщення точки роси	Середній–високий у зонах низької паропроникності	Підвищення вологи у утеплювачі
Парціальний тиск на межі «стіна–утеплювач», Па	900–1100	Локальні зони конденсації
Нерівномірне теплове розширення шарів	$\Delta\alpha = 6\text{--}40 \times 10^{-6}$	Мікротріщини, відшарування

Для інтегральної оцінки сумісної роботи стінової конструкції було створено інфографіку “Heat–Moisture–Stress Performance Map” (рисунок 4), яка наочно демонструє рівень теплових, вологісних та деформаційних показників у форматі багатофакторної радарної діаграми. Представлена радіальна діаграма демонструє, що тепла ефективність має найвищий інтегральний індекс (0,85), що свідчить про достатній опір теплопередачі та правильне розташування шарів огороження. Вологісний стан конструкції оцінено на рівні 0,78, що вказує на стабільну роботу стіни за критеріями паропроникності та вологорегуляції. При цьому потенціал накопичення вологи залишається в межах, які не

спричиняють зміну теплопровідності чи деградацію матеріалів. Найнижче значення має індекс деформативності (0,62), що зумовлено концентрацією зсувних та температурних напружень у клеєвих та монтажних шарах. Це підтверджує, що саме механічні впливи й теплові деформації формують основні ризики для довговічності системи. У сукупності графік показує, що конструкція є ефективною за тепловими та вологісними параметрами, але вимагає підвищеної уваги до деформаційної надійності та контролю якості кріпильних елементів.

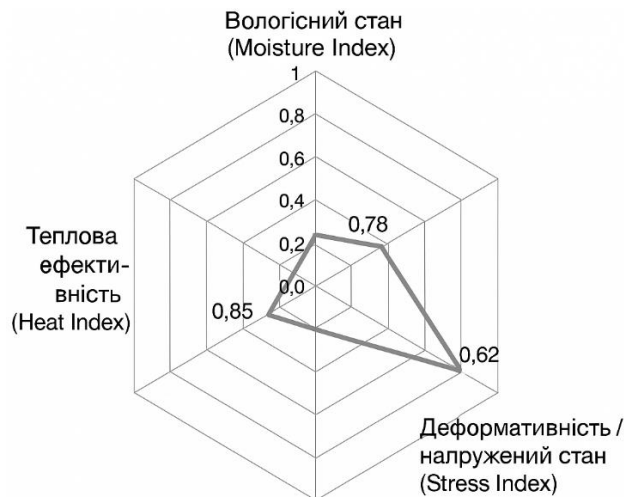


Рисунок 4 – Інтегральна «Heat–Moisture–Stress» карта ефективності багатошарової стінової конструкції

Відповідні числові значення цих параметрів узагальнені у таблиці 4, що дозволяє встановити сильні та слабкі сторони конструкції на основі сукупного аналізу.

Таблиця 4 – Зведена оцінка ефективності багатошарової енергоефективної стінової конструкції

Показник	Значення / діапазон	Вплив на ефективність
Теплопровідність утеплювача λ , Вт/(м·К)	0,024–0,040	Визначає рівень тепловтрат і необхідну товщину шару
Опір теплопередачі R утеплення (150 мм), м ² ·К/Вт	3,75–6,25	Чим вище R, тим менші витрати енергії
Загальний R стіни, м ² ·К/Вт	4,60–7,10	Показник базової теплоефективності конструкції
Температурний розподіл (межа утеплювач–стіна)	+4,2 °С	Відповідає безпечному зонуванню точки роси
Вологовміст утеплювача, кг/м ³	0,5–0,9	Підвищення знижує R та призводить до деградації матеріалу
Вологовміст кладки, кг/м ³	3,1	Контролює ризики грибку та намокання
Парціальний тиск, Па	900–1150	Визначає напрямки руху водяної пари та ризик конденсації
Зсувні деформаційні напруження у клеєвому шарі, МПа	0,62	Найвища чутливість до циклів “нагрів–охолодження”
Теплопровідність дюбеля, Вт/(м·К)	45–60	Формує теплові містки, збільшує U стіни на 3–9 %
Локальне зниження температури біля дюбеля, °С	1,5–4,0	Може викликати точкове переохолодження та конденсат
Паропроникність системи μ	0,003–0,20	Низька μ створює ефект «волокої пастки»
Сумісність теплового розширення $\alpha \cdot 10^{-6}$	6–40	Нерівномірність призводить до мікротріщин і відшарування
Температуростійкість матеріалів	–60...+250 °С	Визначає довговічність при кліматичних навантаженнях
Довговічність системи, років	25–50+	Залежить від вологості, деформацій і теплових містків

Підсумовуючи, отримані результати підтверджують, що ефективність багатошарової зовнішньої стіни визначається не окремими властивостями матеріалів, а їхньою комплексною сумісною роботою. Температурні, вологісні та механічні процеси взаємопов’язані й потребують інтегрованого підходу до проєктування. Застосування розроблених таблиць і рисунків забезпечує можливість точної оцінки стану стінової системи та формування оптимальних технічних рішень [7-8].

Висновки

Сумісна робота матеріалів у багатошарових енергоефективних зовнішніх стінах є визначальним фактором їхньої довговічності та реальної теплозахисної ефективності. Аналіз наукових досліджень підтверджує, що ефективність стіни залежить не лише від формального значення опору теплопередачі, а від узгодженості теплофізичних властивостей шарів, правильного регулювання вологісного режиму та забезпечення механічної і деформаційної сумісності. Порушення цих умов призводить до передчасного старіння, появи дефектів, збільшення тепловтрат і зниження експлуатаційної надійності конструкцій.

Багатошарова стінова конструкція забезпечує загальний опір теплопередачі $R = 4,60\text{--}7,10 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що відповідає вимогам для енергоефективних будівель. Температурний аналіз показав, що точка роси формується в межах зовнішнього утеплювального шару при температурі $+4,2 \text{ }^\circ\text{C}$, що мінімізує ризики внутрішньої конденсації.

PIR-плити з теплопровідністю $\lambda = 0,024 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ формують максимальний тепловий опір при мінімальній товщині, тоді як мінеральна вата з $\lambda = 0,036\text{--}0,040 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\mu \approx 0,20\text{--}0,30$ забезпечує найкращу дифузійну здатність і підтримує вологовміст у межах $0,5\text{--}0,9 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Деформаційний аналіз встановив, що у клеєвому шарі виникають максимальні зсувні напруження до $0,62 \text{ МПа}$ при циклічних змінах температури. Це є критичною ділянкою фасадної системи, де ймовірні відшарування та ініціація мікротріщин.

Металеві дюбелі з теплопровідністю $45\text{--}60 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ зумовлюють локальне зниження температури на поверхні стіни на $1,5\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$, підвищуючи загальний коефіцієнт теплопередачі на $3\text{--}9 \text{ \%}$. Це підтверджує необхідність використання дюбелів із термоголовками або зменшення їх кількості.

Комплексне проектування, точне виконання робіт та регулярний моніторинг технічного стану є ключовими умовами забезпечення довговічності та енергоефективності багатошарових фасадних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Філоненко О. І. Вельбой М.А. Аналіз енергоефективності стінових конструкцій залежно від їх архітектурно-конструктивних особливостей : *Збірник наукових праць*. 2013. Вип. 4(2). С. 233-239. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_4%282%29_31
2. Сердюк В. Р., Сердюк Т. В., Франишина С. Ю. Удосконалення огороджуючих конструкцій як джерело зниження теплових втрат сучасної будівлі. *Сучасні технології будівництва*. Вип. 26. 2019. С. 153-159.
3. Кузнецова О. О. Аналіз сучасних конструктивно-технологічних рішень систем теплоізоляції зовнішніх стін будинків. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. № 5 (73). С. 63-70.
4. Бабій І. М., Менейлюк І. О., Кучеренко Л. В. Дослідження експлуатаційної ефективності систем зовнішньої теплоізоляції фасадів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 4. С. 10-15.
5. Майстренко А. А., Амеліна Н. О., Бердник О. Ю. Технологічний аналіз вибору системи утеплення зовнішніх стін. *Науковий вісник будівництва : зб. наук. праць*. 2020. Т. 99, № 1. С. 110-124.
6. Сахно, Є.Ю., Терещук, О.І., Федорцов, С.О. і Сипливець, В.В. 2020. Термомодернізація огорожувальних конструкцій будівель і споруд. *Технічні науки та технології*. 2020. 2(20). С. 286–296. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-286-296](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-286-296)
7. Олексієнко О.Б. Наукові основи забезпечення стійкості фасадних систем з штукатурним шаром до кліматичних впливів. *Наука та будівництво*. 2022. №31(1). С. 42-507 <https://doi.org/10.33644/10.33644/2313-6679-16-2022-5>
8. Гайдук О. В., Герлянд Т. М., Кулаласва Н. В., Півторацька Н. В., Пятничук Т. В. Технології утеплення фасадів будівель: підручник. Житомир: «Полісся», 2021. 362 с.
9. Філоненко О.І., Юрін О.І. Будівельна теплофізика огорожувальних конструкцій будівель: навч. посібник. Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2015. 328 с.

Жовноватюк Максим Русланович – студент групи 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zhovnovatyuk.m@gmail.com

Швець Віталій Вікторович – к.т.н., доц., Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: v.shvets@vntu.edu.ua

Науковий керівник: Дудар Ігор Никифорович – д.т.н., проф., Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dudar@vntu.edu.ua

Zhovnovatyuk Maksym – Master of Group 1B-24m, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zhovnovatyuk.m@gmail.com

Shvets Vitaliy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: v.shvets@vntu.edu.ua

Supervisor: Dudar Ihor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dudar@vntu.edu.ua