

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ЗНИЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ У СИСТЕМАХ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено комплексне дослідження факторів, що призводять до зниження довговічності фасадних теплоізоляційних систем. Встановлено, що ключовими чинниками деградації є вологісні процеси, мікроструктурні дефекти штукатурних покриттів, термомеханічні напруження, адгезійні порушення та ультрафіолетове старіння. Наведено інтегральну класифікацію цих факторів та проаналізовано їх синергетичний вплив, який прискорює руйнування штукатурних шарів у 2–3 рази порівняно з дією одного ізольованого чинника. Виконано узагальнення технічних даних щодо зміни міцності, теплопровідності, адгезії та морозостійкості матеріалів. Обґрунтовано ефективність наномодифікованих полімерцементних складів, гідрофобних систем та оптимізованого армування для підвищення експлуатаційної надійності фасадних теплоізоляційних систем.

Ключові слова: фасадні теплоізоляційні системи, довговічність, деградація, штукатурні покриття, мікроструктура, тріщиностійкість, адгезія, вологість, термонапруження, UV-старіння.

Abstracts

The paper presents a comprehensive investigation of the factors that reduce the durability of External Thermal Insulation Composite Systems. The study identifies moisture influence, microstructural defects of plaster coatings, thermomechanical stresses, adhesion failures and ultraviolet degradation as the primary drivers of deterioration. An integral classification of degradation factors is proposed, highlighting their synergistic interaction, which accelerates façade degradation by 2–3 times compared to the effect of a single isolated factor. Technical data on changes in strength, thermal conductivity, adhesion and frost resistance of plaster layers are summarized. The effectiveness of nanomodified polymer-cement compositions, hydrophobic treatments and optimized reinforcement layers for improving the service life and structural stability of Insulation Composite Systems is substantiated.

Key words: Insulation Composite Systems, durability, degradation, plaster coatings, microstructure, crack resistance, adhesion, moisture, thermomechanical stresses, UV degradation.

Вступ

Системи фасадної теплоізоляції стали базовим технологічним рішенням у сучасному будівництві, орієнтованому на енергоефективність, зниження тепловтрат та підвищення комфорту експлуатації будівель [1, 2]. В умовах інтенсивної урбанізації, збільшення тепловантажень на огорожувальні конструкції та посилення кліматичних впливів, питання довговічності фасадних систем набуває ключового значення. Останні експериментальні й аналітичні дослідження свідчать, що термін служби фасадної теплоізоляції часто виявляється меншим за проектний через комплексний вплив зовнішніх факторів та внутрішніх дефектів матеріалів [3–6].

До найпоширеніших проблем належать накопичення вологи в шарах системи, зниження адгезійної міцності, розвиток мікро- та макротріщин у штукатурних покриттях, ерозія поверхні під дією ультрафіолетового випромінювання, а також нерівномірні термомеханічні напруження між матеріалами з різними фізико-механічними характеристиками [4, 6]. Вплив цих чинників є нелінійним та взаємопов'язаним, що ускладнює їх окремий аналіз та вимагає комплексного підходу.

Особливо важливим є дослідження мікроструктурної стійкості штукатурних покриттів, адже саме тонкошарові захисно-декоративні шари визначають довготривалу експлуатаційну поведінку фасаду. Технологічні порушення, неякісні матеріали, недосконалість рецептур та вплив атмосферної вологи можуть суттєво прискорювати деградацію системи [5, 7]. У цьому контексті актуальним залишається аналіз як традиційних факторів зниження довговічності, так і сучасних інноваційних шляхів їх мінімізації – використання нанопоповнювачів, модифікованих полімерцементних складів, удосконалених армувальних шарів та гідрофобних мостів.

Метою цього дослідження є розширена оцінка і систематизація факторів, які найінтенсивніше впливають на довговічність фасадної теплоізоляції, а також формування наукового підґрунтя для

подальшої оптимізації складів і технологій виконання фасадних робіт.

Результати дослідження

1. Вологісний режим та його роль у деградації фасадної теплоізоляції

Одним із найбільш критичних чинників, що впливають на довговічність фасадної теплоізоляції, є вологісний режим. Вода легко проникає в шар утеплювача або штукатурки через мікропори й капілярну систему. Після накопичення волога збільшує теплопровідність матеріалу, створюючи умови для нерівномірного охолодження фасаду та формування зон переохолодження [4, 6, 8]. Саме такі зони виступають ініціаторами появи тріщин, особливо взимку, коли відбувається багаторазовий перехід вологи з рідкого стану у лід і назад (рис. 1).

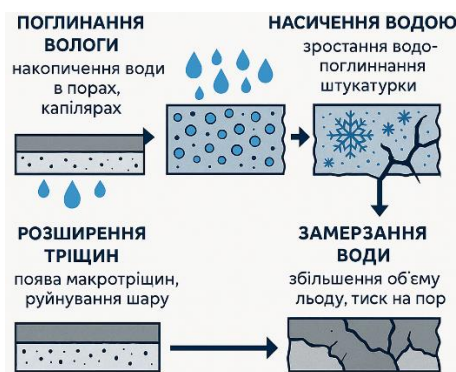


Рисунок 1 – Механізм руйнування штукатурки у системі фасадної теплоізоляції

Підтвердження впливу вологості на теплопровідність наведено на рисунку 2, де видно, як зростання вологості утеплювача на 8–12% збільшує його λ до 0,055–0,06 Вт/(м·К), що знижує ефективність системи й створює передумови для руйнування цементного каменю.

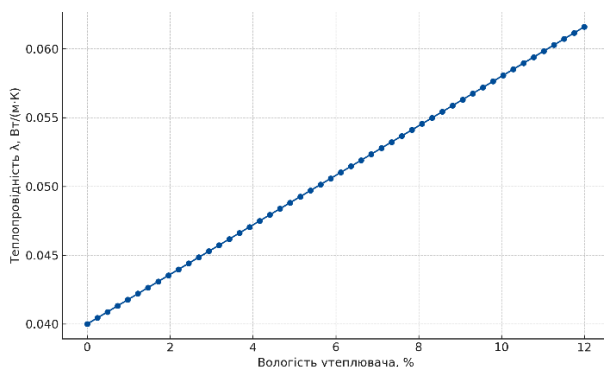


Рисунок 1 – Вплив вологості на теплопровідність утеплювача

Такі процеси особливо небезпечні для мінераловатних плит, які мають високу водопоглинальність. Узагальнені властивості вологісної деградації наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Вплив вологи на параметри роботи фасадної теплоізоляції

Показник	Значення	Наслідок
Зростання λ при вологості 8–10%	+20–35%	Переохолодження штукатурки, ризик тріщин
Водопоглинання мінераловати	5–12%	Конденсація в шарах системи
Локальне водонасичення штукатурки	до 15%	Руйнація при замерзанні

2. Мікроструктурні дефекти штукатурних покриттів

Мікроструктура цементного каменю визначає його міцність, тріщиностійкість та довговічність. У випадку фасадної теплоізоляції проблема ускладнюється тим, що шар штукатурки є тонким, а тому будь-які дефекти розвиваються швидко [6, 9]. Поява пор діаметром більше 0,15–0,25 мм призводить до

зростання водопоглинання та зменшення зв'язності. Усадкові процеси під час тверднення сприяють формуванню первинних мікротріщин, які згодом стають шляхом проникнення вологи.

Для наочного розуміння зміни структури штукатурки до і після введення нанонаповнювачів наведено рисунок 3, що демонструє різницю між крупною пористістю та ущільненою наномодифікованою структурою. Узагальнення мікроструктурних дефектів наведено у таблиці 2.

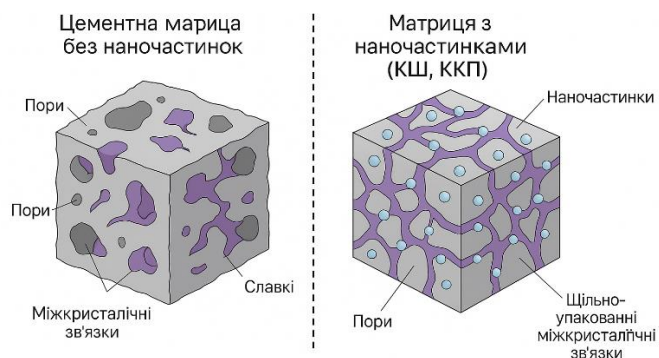


Рисунок 3 – Схема впливу наночастинок на мікроструктуру цементної матриці

Таблиця 2. Характерні мікроструктурні дефекти штукатурних покриттів

Вид дефекту	Причина	Результат
Крупнопористість	Надлишок води, нерівномірна дисперсність	Зниження морозостійкості
Мікротріщини	Усадка, швидке висихання	Поширення у макротріщини
Капілярні канали	Вода + замерзання	Розриви структури
Слабкі зони	Нерівномірна гідратація	Втрата міцності

3. Адгезійні порушення та відшарування

Адгезія між шарами фасадної теплоізоляції – це основний параметр, який визначає стабільність системи. Якщо адгезія слабшає, формується порожнина між шарами, у яку потрапляє повітря або волога. У таких зонах температура змінюється швидше, ніж у цілісному шарі, що провокує відшарування штукатурки [7, 10]. Порівняння міцності зчеплення звичайних та наномодифікованих складів наведено на рисунку 4, де чітко видно, що введення 5–10% КШ (кремнеземна шлакова мікросфера має розмір частинок 50–200 нм; основа – до 95% SiO_2) або ККП (каоліновий композиційний порошок, який отримують шляхом термоактивації каоліну та подрібнення до нанорозміру $\sim 100\text{--}300$ нм; основа – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) збільшує адгезію майже вдвічі.

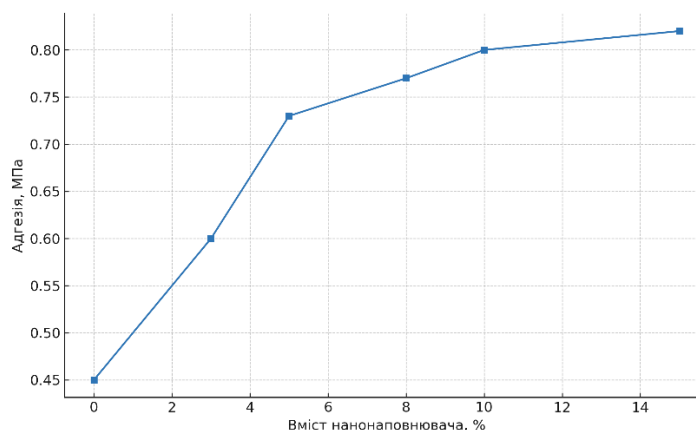


Рисунок 4 – Вплив нанонаповнювача на адгезію штукатурки

4. Ультрафіолетове старіння та температурні впливи

Під дією UV полімерні компоненти штукатурки втрачають еластичність, а поверхня стає шорсткою, з'являється характерна «сіточка» тріщин. Це супроводжується підвищенням крихкості та поступовим руйнуванням поверхневих шарів. Разом із тим, добові температурні перепади створюють термомеханічні напруження [8-11]. Розподіл цих напружень у штукатурці різко зменшується у разі використання армування, що показано на рисунку 5.

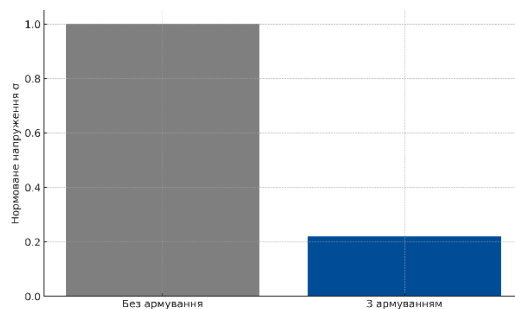


Рисунок 5 – Зниження напружень у штукатурці при армуванні

5. Інтегральна класифікація факторів деградації

Проведений комплексний аналіз показує, що процеси деградації фасадних теплоізоляційних систем мають багатофакторний характер і залежать не лише від якості матеріалів чи технології виконання робіт, а й від складної взаємодії кліматичних, фізико-хімічних та конструктивних впливів. Для систематизації та глибшого розуміння механізмів руйнування доцільно застосувати інтегральну класифікацію факторів, що охоплює чотири ключові блоки: вологісні, адгезійні, термомеханічні та атмосферно-кліматичні.

Для кількісної інтерпретації застосовано ранжування критичності (1–5), наведене у таблиці 3. Найвищу критичність мають вологісний і мікроструктурний блоки, оскільки вони одночасно ініціюють і прискорюють більшість інших процесів.

Таблиця 3. Ранжування критичності факторів деградації фасадних теплоізоляційних систем

Фактор	Оцінка критичності (1–5)	Примітка
Вологість	5	Фундаментальним фактор, який ініціює більшість руйнівних процесів
Мікроструктура	5	Визначає стійкість штукатурки
Термонапруження	4	Викликає тріщини та відшарування
Адгезійні порушення	4	Призводять до втрати цілісності
UV-старіння	3	Синергетичний ефект із вологою

Для систематизації чинників впливу використано комплексну інфографіку (рисунок 6):

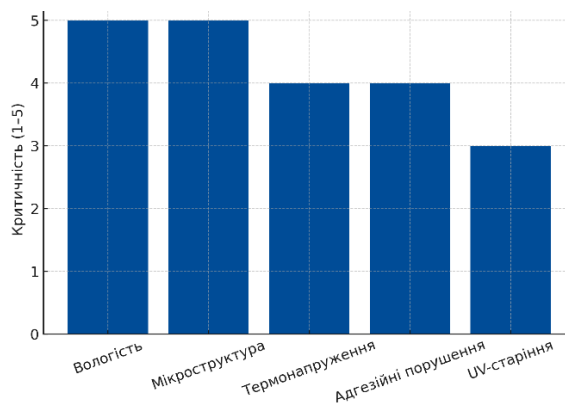


Рисунок 6 – Узагальнена класифікація факторів деградації фасадних теплоізоляційних систем

Таке представлення дозволяє визначити взаємозв'язок між вологістю, UV, адгезією, мікроструктурою та термонапруженнями, які діють не ізольовано, а в поєднанні, прискорюючи деградацію у 2–3 рази.

Висновки

Проведений аналіз показав, що довговічність фасадних теплоізоляційних систем визначається комплексною взаємодією вологісних, мікроструктурних, адгезійних, термомеханічних та атмосферно-кліматичних чинників, які діють синергетично та взаємно підсилюють руйнівні ефекти:

1. Вологість є головним фактором деградації фасадних теплоізоляційних систем: підвищення вологості утеплювача на 8–10% збільшує його теплопровідність з 0,038–0,040 до 0,050–0,060 Вт/(м·К), що зменшує енергоефективність системи на 20–35%.
2. Мікроструктурні дефекти штукатурки критично впливають на міцність: збільшення середнього діаметра пор понад 0,15–0,25 мм знижує морозостійкість штукатурки на 1–2 класи (F25 → F15).
3. Адгезійні порушення формуються при зниженні міцності зчеплення нижче 0,45 МПа, що призводить до локальних відшарувань; нормативною мінімальною межею вважається 0,6 МПа для тонкошарової штукатурки.
4. Термонапруження у штукатурних шарах можуть сягати 0,8–1,2 МПа на південних фасадах у період літніх температурних пікових навантажень, що перевищує межу тріщиностійкості більшості немодифікованих складів.
5. UV-старіння знижує еластичність полімерцементних покриттів на 25–40% за 3–5 років експлуатації, що сприяє появі поверхневих мікротріщин розміром 0,05–0,1 мм.
6. Синергетичний ефект “волога + мороз” збільшує об’єм порового льоду на ≈9%, що створює розпирний тиск до 20–25 МПа – значно більше, ніж межа міцності цементного каменю (8–15 МПа).
7. Наномодифікатори зменшують середній діаметр капілярів у 3–5 разів (з 0,20–0,25 мм до 0,05–0,07 мм) та підвищують щільність структури на 12–18%.
9. Адгезія наномодифікованих штукатурок підвищується до 0,75–0,80 МПа, що на 35–45% більше порівняно з базовими цементними складами без них.
10. Правильно розташована армувальна сітка знижує пікові напруження у штукатурці у 4–5 разів (з 1,0 до 0,20–0,25 МПа), що значно зменшує ризик утворення тріщин.
11. Гідрофобні покриття зменшують водопоглинання штукатурки з 6–8% до 1,5–2,0%, що збільшує морозостійкість на один або два класи та подовжує термін служби системи на 25–30%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.2.6–36:2008. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатурками. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 43 с.
2. ДБН В.2.6-33:2018. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування. К.: Мінрегіон України, 2018. 25 с.
3. Farenjuk G. Experimental evaluation of etics reliability factors. *Наука та будівництво*. 2019. Вип. 4 (22). С. 4–10.
4. Олексієнко О.Б. Оцінка експлуатаційних якостей конструкцій фасадної теплоізоляції з тонкошаровою штукатуркою. *Світ геотехніки*. Запоріжжя, 2012. Вип. 2 (34). С. 31 – 33.
5. Фаренюк Г. Г. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. Київ : Гама-Принт, 2019. 216 с.
6. Фаренюк Г. Г., Олексієнко О. Б. Аналіз критеріїв оцінки фасадних систем з штукатурним шаром з урахуванням європейського досвіду. *Вісник ОДАБА*. 2020. №80. С. 150–161. DOI: 10.31650/2415-377X-2020-80-150-161.
7. Дворкін Л. Й. Будівельні розчини: навчальний посібник. Київ: Каравела, 2021. 222 с.
8. Daniotti B., Paolini R., Re Cecconi F. Effects of Ageing and Moisture on Thermal Performance of ETICS Cladding. *Durability of Building Materials and Components*. ed. V.P. de Freitas, J.M.P.Q. Delgado. Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 127–171. DOI: 10.1007/978-3-642-37475-3_6.
9. Parracha J.L., Borsoi G., Veiga R., Flores-Colen I., Nunes L., Garcia A.R., Ilharco L.M., Dionísio A., Faria P. Effects of hygrothermal, UV and SO₂ accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments. *Building and Environment*. 2021. Vol. 204. Article 108151. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108151.
10. Silva L., Flores-Colen I., Vieira N., Barros Timmons A., Sequeira P. Durability of ETICS and Premixed One-Coat Renders in Natural Exposure Conditions. J.M.P.Q. Delgado (ed.) *New Approaches to Building Pathology and Durability*. Springer Singapore, 2016. P. 131-158. DOI: 10.1007/978-981-10-0648-7_7.
11. Parracha J. L., Veiga R., Flores-Colen I., Nunes L. Toward the Sustainable and Efficient Use of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS): A Comprehensive Review of Anomalies, Performance Parameters, Requirements and Durability. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No 7, Article 1664. DOI: 10.3390/buildings13071664.

Сіташ Дмитро Володимирович – студент групи 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Бондар Альона Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bondarav@vntu.edu.ua

Sitash Dmytro – student of group 1B-24m, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Bondar Alena – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bondarav@vntu.edu.ua