

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ПОСИЛЕННЯ КАМ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR STRENGTHENING MASONRY STRUCTURES

Маринюк О.М., аспірантка, Була С.С., к.т.н., доцент (Національний університет «Львівська політехніка»)

Maryniuk O.M., PhD student, Bula S.S., candidate of technical sciences, associate professor (Lviv Polytechnic National University)

У статті розглянуто існуючі методи посилення кам'яних конструкцій. Метою є визначення переваг і недоліків традиційних та сучасних підходів, а також оцінка їхньої придатності для реставрації історичних будівель і забезпечення довговічності сучасних споруд. Особливу увагу зосереджено на майбутніх можливостях розвитку гібридних систем, використанню біокомпозитів та впровадженню нанотехнологій для покращення міцності та стійкості кладки. Отримані результати можуть слугувати основою для вдосконалення існуючих методів підсилення та розробки нових підходів, спрямованих на збереження пошкоджених споруд.

Improving the methods for reinforcing masonry structures is an increasingly relevant challenge due to the necessity of enhancing the durability, safety, and seismic resistance of buildings. This article aims to review and assess the latest approaches, materials, and technologies used to reinforce masonry structures. The study provides significant academic and practical contributions as it supports the development of methods that meet modern requirements for structural reliability and stability.

A thorough review of scientific sources was conducted to summarize the latest advances in innovative materials and technologies. The analysis concentrated on the use of composite materials to reinforce masonry structures. The results show that modern composite materials significantly enhance the mechanical properties of masonry structures, particularly under dynamic loads and extreme conditions. Notably, the application of FRP, TRM, and FRCM has led to considerable improvements in the shear and compressive strength of structures, which is crucial for both new constructions and the restoration of historical buildings.

The study also includes a comparison of the effectiveness of different methods for reinforcing masonry structures, which allows for the assessment of their impact on the preservation of both historical and modern structures. The results provide recommendations on the application of these technologies to enhance building safety, improve performance characteristics, and ensure environmental sustainability.

Ключові слова: кладка, посилення, FRP, TRM, FRCM, гібридні системи, стержні, інноваційні матеріали, біокомпозити, наноматеріали.
masonry, reinforcement, FRP, TRM, FRCM, hybrid systems, rods, innovative materials, biocomposites, nanomaterials.

Вступ. Кладка є одним з найдавніших матеріалів у будівництві. Вона використовується у спорудженні стін, арок та інших конструкцій. Історичні споруди, такі як римські акведуки або середньовічні замки, свідчать про здатність кам'яних конструкцій зберігатися протягом багатьох століть. Проте збереження архітектурної спадщини до сьогодні багато в чому стало можливим завдяки регулярним заходам з підсилення.

Сучасна кладка, як і стародавні, піддається руйнівним впливам різного характеру. Основними причинами, які зумовлюють необхідність її підсилення, є старіння матеріалів, зміни в основах споруд, сейсмічні впливи, збільшення експлуатаційних навантажень та механічні пошкодження, зокрема, внаслідок воєнних дій. До того ж відповідно до актуальних норм [1, 2], будівлі повинні витримувати значні навантаження, що виникають під час землетрусів або в результаті техногенних аварій. Це робить проблему підсилення кам'яних конструкцій особливо актуальною, вимагаючи сучасних інженерних рішень.

Якщо раніше заміна пошкоджених елементів або додаткове цементування були основними методами підсилення, то зараз все частіше використовуються сучасні інноваційні матеріали. Серед них волокнисті полімери (FRP), наноматеріали та високоміцні сплави. Традиційні методи підсилення підтвердили свою надійність пройшовши випробування роками, однак сучасні методи потребують подальших досліджень і технічного обґрунтування для підтвердження їхньої ефективності.

Огляд літератури. Протягом останніх десятиліть будівельні технології значно розширили можливості посилення кам'яних конструкцій. Вибір конкретного методу посилення залежить від технічного стану споруди, типу навантаження та специфіки будівельного матеріалу. Існуючі методи посилення можна поділити на дві основні групи: традиційні та сучасні. Кожен з них має свої переваги та недоліки.

Традиційні методи були розроблені задовго до появи сучасних композитних матеріалів і досі зазвичай використовуються у випадках, коли потрібно швидко вжити заходів.

Добре відомими та перевіреними методами посилення кладки є металеві та залізобетонні обойми [3] (рис. 1). За рахунок зовнішнього обтиску пошкодженої кладки вони можуть підвищити її міцність на стиск до 50%. Проте ці методи мають кілька важливих недоліків. По-перше, вони збільшують вагу конструкції, що може бути критичним для старих будівель. По-друге, металеві елементи потребують захисту від корозії, що підвищує вартість і трудомісткість робіт. По-третє, традиційні методи рідко використовуються для сейсмічних навантажень через недостатню гнучкість під час динамічних впливів.

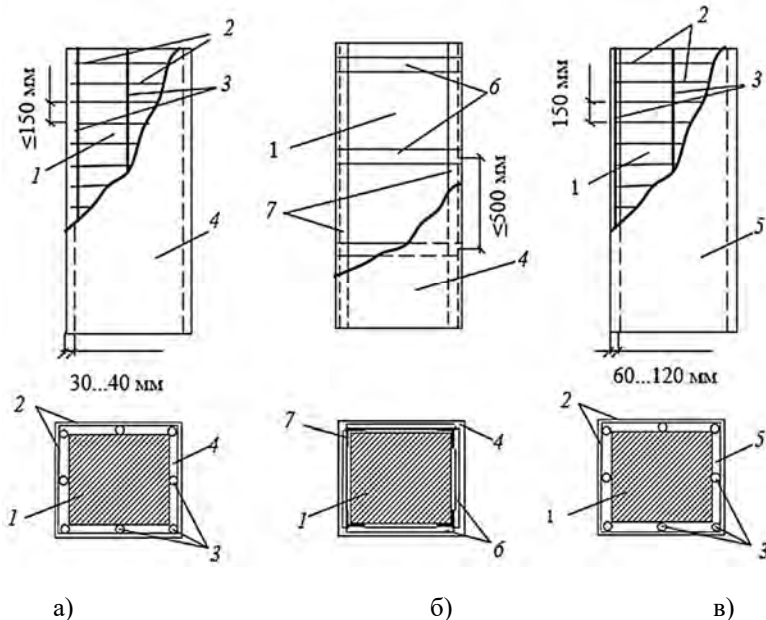


Рис.1. Схеми виконання посилення обоймами:
а – армованою штукатуркою; б – сталевою; в – залізобетонною

Більш ефективним традиційним методом є заміна пошкоджених елементів кладки новими, що дозволяє відновити її міцність до 100%. Однак це трудомісткий і дорогий процес, особливо у випадку історичних споруд [4]. Менш інвазивний метод – це заповнення тріщин цементним розчином, що дозволяє підвищити міцність на 10-30%. Він добре підходить для збереження історичних будівель, проте його ефективність залежить від рівномірності заповнення [4].

З розвитком композитних матеріалів відбувся прогрес у **сучасних методах** посилення кам'яних конструкцій. Сучасні матеріали, такі як волокнисті полімери (FRP), тканинно-армовані розчини (TRM) та цементні матриці, армовані текстилем (FRCM), забезпечують високу міцність, легкість і довговічність. Це робить їх ідеальними для підсилення як сучасних, так і історичних будівель.

Протягом останніх 5 років спостерігається значне зростання використання сучасних матеріалів для посилення кам'яних конструкцій, зокрема полімерів FRP і композитних стержнів. Світове виробництво FRP збільшилося на 25% у період з 2018 по 2023 рік (рис. 2), що пов'язано з високим попитом на ці матеріали у підсиленні та реставрації будівель і споруд.

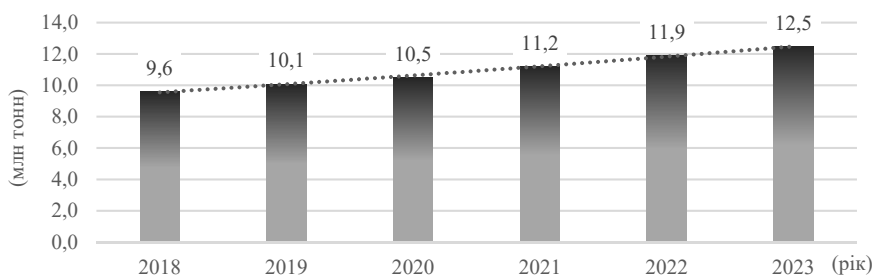


Рис. 2. Діаграма світового виробництва FRP-матеріалів (2018-2023)

Одночасно зростає і кількість наукових досліджень, присвячених новим методам підсилення. За останні 5 років у світі кількість публікацій на тему FRP і TRM зросла на 40%. В Україні кількість публікацій з кожним роком зростає в середньому на 23%, що свідчить про підвищений інтерес до цих технологій (рис. 3).

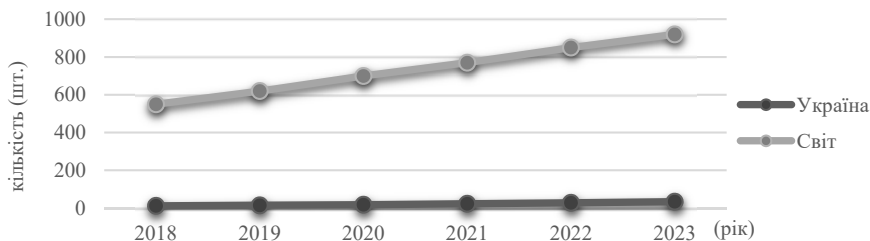


Рис. 3. Графік кількості статей про FRP і TRM у світі та Україні (2018-2023)

FRP-композити виготовляються із карбонових, скловолоконних або базальтових волокон, що вбудовуються у полімерну матрицю. Вони застосовуються у вигляді сіток, стрічок, полотна, стержнів [5, 6], що наносяться на поверхню кам'яних стін за допомогою адгезивного шару (рис. 4). FRP-системи стійкі до корозії, мають низьку вагу і забезпечують високу міцність. Дослідження, проведені на історичних будівлях в Італії та Греції, підтвердили ефективність використання FRP у сейсмічних зонах, де після впровадження цього методу міцність конструкцій зросла на 40-50%. Зокрема, досвід реставрації грецького Парфенону з використанням FRP свідчить про можливість його застосування для довготривалого посилення історичних споруд без порушення їх естетичних якостей [7]. Проте основним недоліком FRP є їхня чутливість до ультрафіолетового випромінювання та температурних коливань, що впливає на довговічність матеріалів [8]. Тому важливо забезпечити додатковий захист композитів.



Рис. 4. Підсилення композитними матеріалами:
а – стрічками; б – сітками; в - полотном

Тканинно-армовані розчини (TRM) є перспективними методами посилення. Вони поєднують цементний розчин з високотехнологічними тканинами, виготовленими з карбону, базальту чи скла. Як зазначено в роботі Rapanicolaou [9], застосування TRM-систем дозволило збільшити пластичність стін і забезпечило більшу стійкість до циклічних навантажень. Це є ключовою перевагою під час реставрації історичних будівель у регіонах з підвищеною сейсмічною активністю. TRM краще розподіляє напруження під час динамічних навантажень, зменшуючи ризик ламкого руйнування. Крім того, TRM сумісний з традиційними будівельними матеріалами, що зменшує ризик пошкоджень під час реставрації історичних споруд.

Системи FRCM також продемонстрували високий рівень ефективності, особливо в умовах підвищеної вологості, що є важливим для будівель, розташованих у прибережних зонах або регіонах з високою вологістю. Дослідження Carozzi (2015) [10] підтверджують, що FRCM-системи підвищують опір зсуву на 20-30%, а також забезпечують кращу довговічність порівняно з іншими методами посилення.

Порівняння традиційних та сучасних методів. З огляду на вищезазначені результати, вибір методу посилення повинен залежати від типу споруди, умов експлуатації та характеру навантажень:

- Традиційні методи посилення підходять для конструкцій, що не піддаються динамічним навантаженням і в ситуаціях, де важлива швидкість виконання робіт та мінімальні витрати. Однак вони менш придатні для сейсмічних зон і конструкцій, що піддаються частим змінам навантаження.

- Сучасні методи посилення, такі як FRP, TRM та FRCM, мають значні переваги перед традиційними рішеннями, особливо в умовах динамічних навантажень. Для реставрації історичних споруд, де важливо зберегти автентичність будівельних матеріалів, TRM є кращим рішенням завдяки його сумісності з традиційними матеріалами. У зонах з високою вологістю, таких як прибережні регіони, рекомендується використовувати FRCM-системи, оскільки вони мають кращу стійкість до впливу вологи та зовнішніх чинників.

Таким чином, сучасні методи посилення, у порівнянні з традиційними, є більш ефективними. Оскільки мають ширший спектр рішень для посилення різних конструкцій.

Перспективи розвитку технологій посилення. У сучасному світі, де природні катаклізми, особливо землетруси, стають дедалі частішими, **необхідність** розробки нових та вдосконалення наявних методів посилення кам'яних конструкцій набуває особливої актуальності.

Один з основних напрямків розвитку технологій посилення кам'яних конструкцій полягає у впровадженні гібридних систем, що поєднують переваги різних матеріалів [11]. Наприклад, комбінація FRP з TRM або FRCM дозволяє досягти кращих результатів у підвищенні міцності та стійкості конструкцій до динамічних навантажень. Це поєднання не лише покращує механічні характеристики стін, але й сприяє ефективнішій дисипації енергії, що критично важливо для сейсмостійких будівель [9].

Іншим перспективним напрямком є посилення стержнями (рис. 5). У цьому методі можна застосовувати стержні різних типів (сталеві, титанові, композитні) разом із розчинами на різних основах (цементні, вапняні, глиняні, епоксидні) [12]. Така варіативність дозволяє досягти покращення міцності конструкцій до 60-70%, залежно від типу стержнів і конфігурації їхнього розташування. До того ж цей метод простий у виконанні з мінімальним втручанням в існуючу кладку.

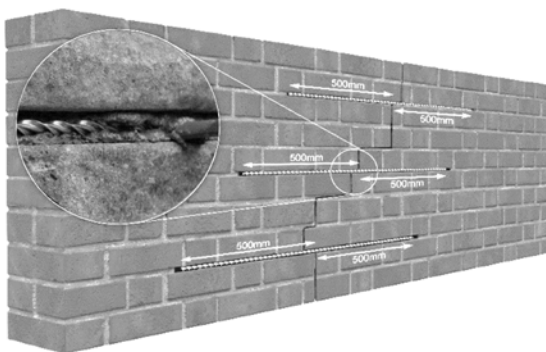


Рис. 5. Схема виконання підсилення стержнями

Використання біокомпозитних матеріалів, виготовлених із натуральних волокон, таких як льон, коноплі або джут, також є важливим напрямком. Ці матеріали поєднують високу міцність і низьку вагу, що робить їх привабливими для посилення історичних будівель без значних втручань у конструкцію [13]. Крім того, біокомпозитні матеріали є екологічно безпечними, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку в будівництві.

Нанотехнології також відкривають нові перспективи. Наноматеріали можуть бути добавками до традиційних цементних розчинів або полімерів для покращення їх механічних характеристик і підвищення стійкості до вологи та ультрафіолетового випромінювання. Наприклад, додавання нанокремнезему або графенових наночастинок суттєво підвищує міцність на стиск і зменшує водопроникність [14].

Перспективним напрямком є також розробка самовідновлювальних матеріалів, які можуть закривати дрібні тріщини та пошкодження, що виникають під час експлуатації. Наприклад, цементні розчини з бактерій, що сприяють кристалізації карбонату кальцію, можуть самостійно відновлювати цілісність конструкцій [15].

Висновки. Аналіз сучасного стану методів посилення кам'яних конструкцій демонструє значний прогрес у цій галузі. Традиційні методи, хоч і залишаються корисними, але часто не відповідають сучасним вимогам до динамічних навантажень та збереження історичних цінностей.

Сучасні технології, зокрема FRP, TRM та FRCM, пропонують нові можливості для підсилення кам'яних конструкцій, забезпечуючи підвищену міцність, стійкість до корозії та меншу вагу. Дані, представлені у графіках, свідчать про значне зростання виробництва FRP-матеріалів (на 25% за період 2018-2023 років) та кількість досліджень з теми, що підтверджує актуальність і практичну ефективність цих технологій.

Для практичного застосування рекомендовано використовувати FRP у сейсмічних зонах і для реставрації історичних споруд, TRM — для збереження автентичних матеріалів, а FRCM — у вологих умовах, зокрема в прибережних регіонах. Подальший розвиток передбачає впровадження гібридних систем, біокомпозитів та нанотехнологій, що значно покращить механічні властивості та довговічність матеріалів. Поєднання цих технологій з традиційними методами підвищить їх адаптивність до різних умов і зменшить негативний вплив на довкілля.

Таким чином, подальший розвиток і дослідження сучасних методів посилення кам'яних конструкцій є важливим кроком у забезпеченні їхньої надійності, безпечної експлуатації та збереження культурної спадщини в умовах змінного клімату та зростаючих навантажень.

1. Державні будівельні норми України (ДБН В.1.2-14:2009). Системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до споруд. Механічний опір та стійкість. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 64 с.

Derzhavni budivel'ni normy Ukrainy (DBN V.1.2-14:2009). Systemy zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Osnovni vymohy do sporud. Mekhanichnyu opir ta stiikist'. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2009. 64 s.

2. Державний стандарт України (ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010). Єврокод 8. Проектування сейсмостійких споруд. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 120 с.

Derzhavnyy standart Ukrayiny (DSTU-N B EN 1998-1:2010). Yevrokod 8. Proektuvannya seysmostiikykh sporud. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2010. 120 s.

3. Бабич В. Є. Проектування кам'яних і армокам'яних конструкцій: навч. посіб. / В. Є. Бабич, В. В. Караван, М. С. Зінчук; за ред. д.т.н., проф. Є. М. Бабича. – Рівне: НУВГП, 2010. – 196 с.

Babich V. Ye. Proyektuvannya kam'yanykh i armo-kam'yanykh konstruksiy: navchal'nyy posibnyk / V. Ye. Babich, V. V. Karavan, M. S. Zinchuk; za redaktsiyeyu d.t.n., prof. Ye. M. Babicha. – Rivne: NUVHP, 2010. – 196 s.

4. Corradi M., Borri A., Vignoli A. Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the L'Aquila earthquake // *Construction and Building Materials*. – 2002. – Vol. 15. – P. 117-125.

5. Mahmood H., Ingham J. M. Diagonal Compression Testing of FRP-Retrofitted Unreinforced Clay Brick Masonry Wallettes // *Journal of Composites for Construction*. – 2011. – Vol. 15, No. 5. – P. 810-820. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000209.

6. Bula, S., & Kholod, M. Experimental study of compressed ceramic hollow brick masonry structures strengthened with GFRP meshes // *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering* (pp. 71-78). Cham: Springer International Publishing, 2020.

7. Ioannidou M., Moullou D., Egglezos D. The Restoration of the Acropolis of Athens: A Holistic Approach // *Handbook of Cultural Heritage Analysis: матеріали конф.* – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 1851-1897.

8. Harle S. M. Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: A review // *Structures*. – 2024. – Vol. 60. – P. 105881.

9. Papanicolaou C. G. et al. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: Out-of-plane cyclic loading // *Materials and Structures*. – 2008. – Vol. 41, No. 1. – P. 143-157.

10. Carozzi F. G., Poggi C. Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 70. – P. 215-230.

11. Lin V. W. J., Quek S. T. et al. Strengthening of Masonry Walls Using Hybrid-fiber Engineered Cementitious Composite // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2009. – Vol. 44, No. 8. – P. 98-112.

12. Corradi M., Castori G., Borri A. Repairing brickwork panels using titanium rods embedded in the mortar joints // *Engineering Structures*. – 2020. – Vol. 221. – P. 111099.

13. Pickering K. L., Efendy M. A., Le T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2016. – Vol. 83. – P. 98-112.

14. Nazari A., Riahi S. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete // *Composites Part B: Engineering*. – 2011. – Vol. 42, No. 3. – P. 570-578.

15. Jonkers H. M. Bacteria-based self-healing concrete // *Heron*. – 2011. – Vol. 56, No. 1/2. – P. 1-12