

Міністерство освіти і науки України
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Тези

**77-ї наукової конференції професорів,
викладачів, наукових працівників,
аспірантів та студентів університету**

ТОМ 2

16 травня – 22 травня 2025 р.

СЕКЦІЯ ХІМІЇ ТА ФІЗИКИ

УДК 539.3:624.012.45

*Усенко Д.В., PhD, MPhys, доц.,
Усенко І.С., к.т.н., доц.,
Соловей А.О., студентка групи 102Б
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

ФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ ДИСЛОКАЦІЙ У ПРИРОДНОМУ КАМЕНІ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В КЛАДЦІ З МЕТОЮ ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ БУДІВЕЛЬ

Кам'яна кладка, незважаючи на свою багатовікову історію, залишається конструктивною основою для зведення споруд як у новому будівництві, так і в реставраційних роботах. Водночас її довговічність та стійкість до зовнішніх впливів значною мірою залежать від мікромеханічних процесів, що відбуваються у структурі природного каменю. Одним з ключових процесів, які визначають механічну поведінку кам'яних матеріалів, є поширення дислокацій у кристалічній решітці. Розуміння фізичних моделей цих процесів дає змогу прогнозувати появу й розвиток тріщин, а отже – керувати надійністю всієї кладки.

Дислокації є елементами кристалічної дефектної структури, що утворюються в результаті механічного навантаження, термічних впливів або під час природного формування каменю. При прикладенні зовнішніх сил дислокації починають рухатися по площинах ковзання, викликаючи накопичення напружень. За певних умов ці напруження локалізуються та концентруються в окремих зонах, створюючи передумови до виникнення мікротріщин. Саме накопичення й взаємодія дислокацій часто передують критичному порушенню цілісності кам'яного матеріалу.

Сучасні фізичні моделі, що описують поширення дислокацій, базуються на поєднанні аналітичних розрахунків, експериментальних даних та чисельного моделювання. Серед них найбільш поширеними є метод скінченних елементів (FEM), метод дискретних елементів (DEM) та фазово-польові моделі (PFM), які дозволяють досліджувати еволюцію дефектів на мікрорівні. Такі моделі враховують анізотропію, неоднорідність матеріалу, типи кристалічної ґратки, геометрію швів, а також якість з'єднань між кам'яними блоками та розчином.

Особливу увагу заслуговує використання мультишкальних моделей, які дозволяють поєднати локальні мікромеханічні процеси з глобальною поведінкою кладки як структурної системи. Такий підхід забезпечує глибше розуміння механізмів утворення тріщин не лише на рівні одного

блоку каменю, але й у масштабах всієї конструкції. Моделі такого типу вже використовуються для прогнозування зони потенційного руйнування в арках, склепіннях, стінах із нерівномірним розподілом навантаження.

Паралельно з теоретичним аналізом активно розвиваються експериментальні та чисельно-візуалізаційні методи дослідження процесів дислокації та тріщиноутворення. Зокрема, застосування фазово-польових моделей дозволяє наочно простежити вплив змінних фізико-механічних характеристик на характер тріщин у кам'яній кладці. Високу інформативність демонструють результати чисельних тестів на розтяг, зокрема моделювання тріщиноутворення у стіні з чотирма шарами кам'яних блоків при трьох варіантах співвідношення жорсткості та міцності між каменем і розчином (тести T1, T2, T3).

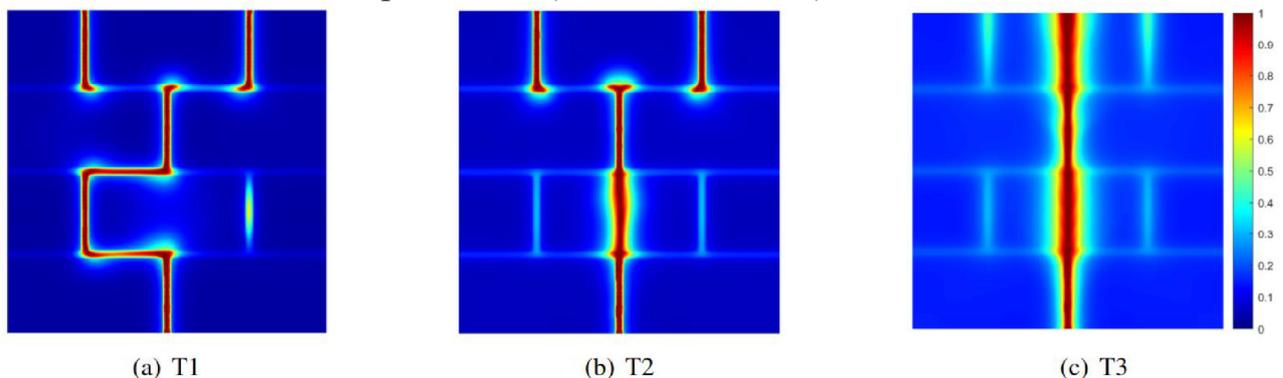


Рисунок 1. Схеми поширення тріщин у кладці для трьох варіантів поведінки: (а) тест T1 – утворення зигзагоподібної тріщини за слабого розчину; (б) тест T2 – комбінований характер тріщини; (с) тест T3 – формування прямої тріщини при підвищеній міцності розчину.

На рисунку 1 (а–с) наведено схеми поширення тріщин у трьох випадках. У варіанті T1 (рис. 1 а), при занижених показниках жорсткості й міцності розчину (де модуль пружності $E_m = 0.5E_b$; енергія руйнування $G_m = 0.1G_b$), формується характерна зигзагоподібна тріщина, що проходить переважно по розчиновому прошарку. Відмітимо що E_m / E_b мається на увазі відносна жорсткість розчину до каменю, E_b це модуль пружності кам'яного блоку, G_m / G_b це відносна міцність на руйнування розчину до блоку. У тесті T2 (рис. 1 б), коли параметри розчину й каменю зрівняні, тріщина зберігає складну конфігурацію, але частково перетинає і самі блоки. У тесті T3 (рис. 1 с), при підвищеній міцності розчину ($G_m = 0.5G_b$), формується майже пряма тріщина, що свідчить про зміну механізму поширення руйнування. Ці результати підтверджують, що навіть незначні зміни у матеріальних властивостях можуть радикально впливати на форму та напрямок тріщини, що критично важливо для прогнозування довговічності кладки.

На основі отриманих результатів розробляються практичні рекомендації щодо оптимізації технологій кладки. До прикладу, вибір типу каменю з менш вираженою кристалічною анізотропією, контроль вологості розчину, попереднє ущільнення контактних поверхонь та модифікація

швів здатні зменшити інтенсивність накопичення дислокацій. У реставраційних роботах це може бути вирішальним чинником збереження історичних об'єктів у сейсмонебезпечних регіонах.

Висновок: Вивчення фізичних моделей поширення дислокацій у природному камені має не лише теоретичне, але й велике прикладне значення. На основі цих моделей можна ефективно прогнозувати процеси тріщиноутворення у кам'яній кладці та впроваджувати попередні заходи на етапі проектування, будівництва та обстеження споруд. Надалі розвиток цієї тематики передбачає глибшу інтеграцію чисельного моделювання з експериментальною верифікацією та практичними рекомендаціями для інженерів-проектувальників, що відкриває нові можливості для створення стійкіших і довговічніших конструкцій.

Література:

1. Tulin, T., & Heistermann, M. (2013). Dislocation mechanics in the hierarchical nanostructure of bone tissue. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 17, 229-240. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.10.009
2. *Experimental Investigation of Crack Initiation and Propagation in the Masonry Structure*. (2021). Hindawi. DOI: 10.1155/2021/6672037 arxiv.org
3. *Crack patterns in masonry structures using phase field method*. (2023). ResearchGate. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115489
4. *Assessment of Cracking in Masonry Structures Based on the Breakage of Optical Fibers*. (2022). MDPI. DOI: 10.3390/app12146885

УДК 624.012.45:691.32:620.172.251

*Усенко Д.В., PhD, MPhys, доц.,
Усенко І.С., к.т.н., доц.,
Климович М.Ю., студентка групи 103Б
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

МЕХАНІЗМИ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КАМ'ЯНОЇ КЛАДКИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКОН У ЗОНУ НАПРУЖЕННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ БУДІВЕЛЬ

Кам'яна кладка, яка широко використовується в історичних та сучасних будівлях, характеризується високою міцністю на стиск, але обмеженою здатністю протистояти розтягувальним та згинальним навантаженням. Це обмеження знижує її ефективність у сейсмічно активних регіонах та при динамічних навантаженнях. Інтеграція