

УДК 539.3:624.012.45

Усенко Дмитро Валерійович

PhD, MPhys, доцент,

доцент кафедри хімії та фізики

Бардакова Єлизавета Сергіївна

студентка групи 102Б

Національний університет

«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

РОЛЬ МІКРОДЕФЕКТІВ І ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КАМІНЬ– РОЗЧИН У СЦЕНАРІЯХ РУЙНУВАННЯ

Кам'яна кладка зберігає своє значення як універсальний конструктивний матеріал, що поєднує архітектурну естетику, міцність та довговічність. Її використання охоплює не лише сучасне будівництво, а й реставраційні практики, де важливо відтворити автентичність історичних споруд. Проте надійність таких систем значною мірою визначається мікромеханічними процесами, які відбуваються в об'ємі природного каменю під дією зовнішніх навантажень. Одним із фундаментальних механізмів, що зумовлює формування й еволюцію пошкоджень, є дислокаційна динаміка в кристалічній решітці матеріалу. Її адекватне моделювання дозволяє не лише описати розвиток мікротріщин, а й прогнозувати критичні стани елементів кладки.

Дислокації становлять систему дефектів, які виникають унаслідок пластичної деформації, термічних коливань чи природного росту кристалів. У процесі механічного навантаження вони переміщуються площинами ковзання, спричиняючи локальні поля напружень. Акумуляція таких напружень у мікрооб'ємах матеріалу призводить до їхньої концентрації в слабких зонах і формування умов для зародження мікротріщин. Накопичення й взаємодія дислокацій визначають початок нестабільності в структурі, що безпосередньо передує порушенню цілісності матеріалу.

Ключову роль у визначенні механічної поведінки системи «камінь–розчин» відіграють відносні параметри жорсткості та енергії руйнування, що позначаються як E_m/E_b та G_m/G_b . Перше співвідношення характеризує ступінь деформаційної сумісності між матеріалами, тобто здатність розчину та каменю спільно сприймати навантаження без виникнення надмірних локальних напружень. Другий параметр описує енергетичну рівновагу при розвитку тріщин, визначаючи, у якому з компонентів системи реалізується критичний механізм руйнування. Зміна цих співвідношень навіть у межах кількох десятків відсотків здатна докорінно змінювати характер руйнування — від тріщин, що поширюються вздовж розчинового шва, до прямолінійних, які перетинають кам'яні блоки. Таким чином, величини E_m/E_b та G_m/G_b виступають головними параметрами структурної оптимізації

кладки, дозволяючи кількісно оцінювати рівень ризику втрати цілісності конструкції.

Дослідження фізико-механічних процесів у кам'яній кладці потребує поєднання різних рівнів опису — від атомарного до конструктивного. Саме тому сучасна методологія ґрунтується на мультишкальному підході, який інтегрує фазово-польові (PFM), скінченно-елементні (FEM) та дискретно-елементні (DEM) моделі. Фазово-польові моделі дають змогу відтворити еволюцію мікродефектів і процеси зародження тріщин у безперервному середовищі; FEM-застосування дозволяє врахувати розподіл напружень у макрооб'ємі конструкції, тоді як DEM-методика описує взаємодію окремих блоків і швів як дискретних тіл. Комбіноване використання цих підходів забезпечує узгодження мікромеханічних ефектів з глобальною стійкістю кладки, створюючи наукову основу для прогнозування та керування сценаріями її руйнування.

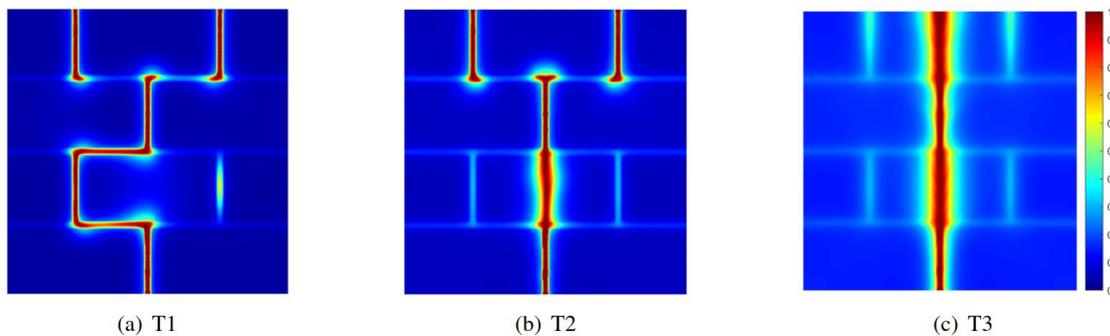


Рис. 1. Схеми поширення тріщин у кладці для трьох варіантів поведінки: (а) тест T1 – утворення зигзагоподібної тріщини за слабого розчину; (б) тест T2 – комбінований характер тріщини; (с) тест T3 – формування прямої тріщини при підвищеній міцності розчину.

Застосування мультишкальних підходів дало змогу об'єднати мікромеханічні процеси з глобальною поведінкою кладки як просторової конструктивної системи. Такий тип моделювання створює основу для виявлення критичних зон концентрації напружень у стінах, арках і склепіннях, де відбувається трансформація локальних мікропошкоджень у макротріщини. Внаслідок цього стає можливим прогнозування втрати несучої здатності конструкції на ранніх етапах експлуатації.

У чисельних дослідженнях, що моделюють поведінку кам'яних стін при розтязі, спостерігається чіткий зв'язок між відносними характеристиками жорсткості та міцності розчину і конфігурацією утворених тріщин. Для трьох модельних випадків — T1, T2 та T3 — отримано різні сценарії руйнування. У першому варіанті, де жорсткість розчину зменшена ($E_m = 0,5E_b$, $G_m = 0,1G_b$), формується зигзагоподібна тріщина, що проходить переважно по швах. За умов T2, коли властивості розчину та каменю наближені, тріщина має комбінований характер і

частково перетинає самі блоки. При збільшенні міцності розчину ($G_m = 0,5G_b$, тест $T3$) тріщина набуває прямолінійної форми, що свідчить про зміну домінуючого механізму руйнування. Отримані залежності демонструють, наскільки навіть незначна варіація фізико-механічних параметрів здатна змінити структуру напружено-деформованого стану кладки.

Результати таких досліджень мають безпосереднє практичне значення для розроблення технологічних рішень під час проектування та реставрації. Зокрема, вибір каменю з мінімальною анізотропією, оптимізація гранулометрії та вологості розчину, ущільнення контактних поверхонь, а також модифікація структури швів дають змогу суттєво знизити ймовірність локальної дестабілізації матеріалу. Для об'єктів історичної спадщини в сейсмічно активних зонах це стає визначальним чинником збереження конструктивної автентичності.

Важливим напрямом подальших досліджень є інтеграція чисельних методів з експериментальною верифікацією, що дозволяє не лише підвищити точність моделей, але й адаптувати їх до реальних умов роботи кам'яної кладки. Використання фазово-польових моделей забезпечує можливість візуалізації еволюції тріщин у часі, а застосування тривимірних FEM-розрахунків — уточнення напружено-деформованих зон у складних геометріях. Поєднання цих підходів формує нову методологію прогнозування руйнувань, орієнтовану на превентивну діагностику та підвищення експлуатаційної надійності споруд.

Висновок: Сучасна концепція дослідження дислокацій у природному камені виходить за межі суто теоретичного аналізу. Вона стає інструментом практичного управління довговічністю кладки — від етапу вибору матеріалу до моніторингу стану споруди. Інтеграція мікромеханічних моделей, чисельного моделювання й експериментальних методів відкриває можливість створення нових поколінь матеріалів і конструкцій з підвищеною стійкістю до руйнувань. Це визначає перспективу розвитку будівельної науки у напрямку гармонійного поєднання фізики матеріалів і прикладної інженерії, що сприятиме формуванню стійкішої архітектурної спадщини майбутнього.

Список використаних джерел

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