

УДК 539.3:624.012.45

ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ СТРУКТУРНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМІ КАМІНЬ–РОЗЧИН ТА ЇХ
РОЛЬ У ФОРМУВАННІ ТРІЩИН

Усенко Д.В., PhD, MPhys, доцент,

Бардакова Є.С., студентка

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

usenko_phd@ukr.net

Анізотропія міцності, чутливість до розтягувальних напружень і схильність до крихкого руйнування формують низку викликів як у сучасному будівництві, так і в реставраційній практиці, де збереження автентичності є критичним. Саме тому ключовим стає розуміння еволюції дефектів на рівні кристалічної решітки: дислокаційні механізми, локальні поля напружень і мікротріщини утворюють початкові осередки руйнування, що згодом визначають глобальний характер пошкодження всієї конструкції. Адекватне моделювання цих процесів відкриває можливість точніше прогнозувати поведінку кладки в умовах складних навантажень та формувати більш обґрунтовані інженерні рішення.

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 передуює 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.

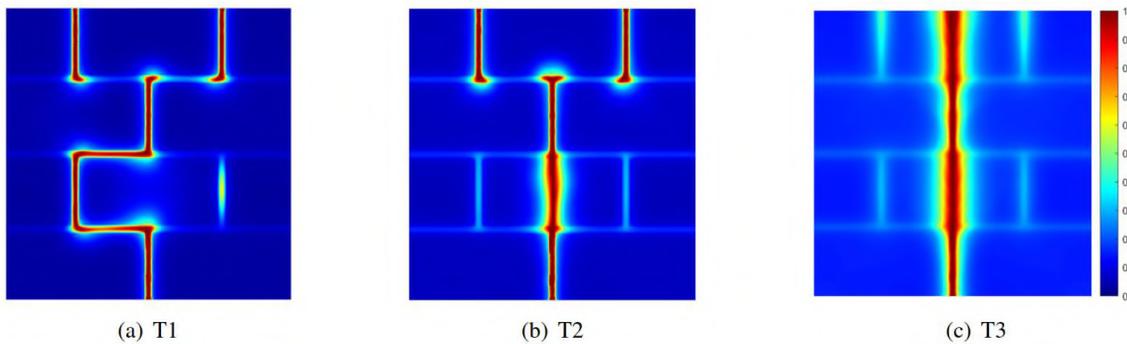


Рис. 1. Схеми поширення тріщин у кладці для трьох варіантів поведінки: (а) тест Т1 – утворення зигзагоподібної тріщини за слабого розчину; (б) тест Т2 – комбінований характер тріщини; (с) тест Т3 – формування прямої тріщини при підвищеній міцності розчину.

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: Проведений аналіз демонструє, що мікромеханічні механізми, зокрема дислокаційна динаміка та енергетика зародження тріщин, мають фундаментальний вплив на формування й розвиток пошкоджень у кам'яній кладці. Введення безрозмірних параметрів E_m/E_b та G_m/G_b дозволяє кількісно описати сумісність матеріалів і передбачити тип руйнування — від

поширення тріщин по розчинових швах до їх проникнення в масив каменю. Мультишкальна методологія, що об'єднує PFM, FEM і DEM, забезпечує цілісний опис конструктивної поведінки та дає змогу простежити трансформацію мікродфектів у макроструктурні руйнування.

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 628.16:504.064:614.8(477)

**ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ СТІЙКИХ
ВОДОПРОВІДНИХ СИСТЕМ У ПЕРІОД ЗБРОЙНОГО КОНФЛІКТУ**

Усенко І.С., к.т.н, доц,
Усенко Д.В., PhD, MPhys, доцент,
Ненашева А.С., студентка

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
usenko_phd@ukr.net*

Однією з ключових опор функціонування держави є системи централізованого водопостачання, оскільки від їхньої безперервної роботи залежить санітарна безпека, стабільність медичних і соціальних процесів та базова життєдіяльність населення. У воєнних умовах їхня роль суттєво зростає, а водночас зростає й спектр загроз, що охоплюють як прямі фізичні пошкодження інфраструктури, так і порушення логістичних, енергетичних та управлінських ланцюгів. Це перетворює забезпечення роботи водопровідних мереж на комплексне інженерно-гуманітарне завдання, яке потребує системного планування, гнучких механізмів реагування та чіткого управління ризиками на всіх рівнях — від технічного стану обладнання до комунікації з громадою.

На відміну від мирного часу, у фазі активних бойових дій, множина загроз включає як навмисні удари по об'єктах водопостачання, так і вторинні ефекти — порушення постачання матеріалів і запчастин, ускладнений доступ до місць аварій, дефіцит кваліфікованого персоналу. Оцінювання надійності має виходити за межі внутрішніх технічних характеристик і охоплювати зовнішні, часто неконтрольовані фактори. Мова йде про побудову багаторівневої моделі стійкості, у якій функціональна готовність устаткування, організаційні процедури реагування та резервні сценарії живлення/доставки води взаємно підсилюють одне одного.

Конструктивно системи водопостачання — це ієрархія взаємопов'язаних компонентів: джерела водозабору, станції підйому та очищення, магістральні й розподільчі трубопроводи,