

Висновки. За результатами спектрального аналізу нахилів земної поверхні, отриманих чотирма приладами, чітко виділяється річна гармоніка з амплітудами 0.772", 0.413" і 1.880", 0.937" для рядів NSn, NSs і WEn, WEs, відповідно. Вона є найбільшою з усіх гармонік (крім приладу NSs). Амплітуди річних гармонік в напрямку WE в середньому в 2.36 рази більші, ніж в напрямку NS. Північні прилади дають більші значення амплітуд, ніж південні в середньому в 1.94 рази (ймовірно внаслідок різної дії на них оточуючого середовища). Всі ці результати спектрального аналізу для річної гармоніки добре узгоджуються з відповідними, отриманими методом сезонної декомпозиції для сезонної (річної) складової нахилу [1, 2]. Для достовірного визначення гармонік не річного періоду потрібні додаткові дослідження.

Література:

1. Тищук М.Ф. *Параметри річної хвилі нахилу земної поверхні зі спостережень південним комплектом рівневих нахиломірів поблизу Полтави за період 2010-2016 рр. Академічна й університетська наука: результати та перспективи. Полтава, 2023, с. 350-352.*

2. Тищук М.Ф. *Річна хвиля нахилу земної поверхні зі спостережень північним комплектом рівневих нахиломірів біля Полтави протягом 2010-2016 рр. Академічна й університетська наука: результати та перспективи. Полтава, 2024, с. 241-244.*

УДК 624.012.45:691.32:620.172.251

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ МЕХАНІЗМИ ПІДВИЩЕННЯ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ КЛАДКИ
МЕТОДОМ ІНТЕГРАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКОН**

Усенко В.Г., д.т.н, професор,
Усенко Д.В., PhD, MPhys, доцент,
Ярошенко А.В., студентка

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

Незважаючи на багатовікову історію використання, кам'яна кладка залишається складною з погляду механічної поведінки системою, у якій поєднання високої міцності на стиск і обмеженої здатності сприймати розтяг та згин створює природну вразливість під дією динамічних та сейсмічних навантажень. Ця дисбалансність властивостей визначає характер руйнування, формування тріщин і чутливість до локальних концентрацій напружень. Сучасні підходи до підсилення несучих елементів спрямовані на мінімальне втручання в структуру кладки та збереження її архітектурної автентичності, що стимулює застосування легких композитних матеріалів, зокрема вуглецевих волокон, для зміни механічної відповіді системи без збільшення маси та геометричних габаритів.

Вуглецеві волокна належать до класу високоміцних композитів, що поєднують малу густину, значну міцність на розтяг і високу стійкість до корозійного впливу. Їхнє використання для підсилення кам'яних структур дозволяє суттєво покращити механічні властивості системи без збільшення габаритів або втрати дифузійної здатності матеріалу. На відміну від традиційних сталевих елементів, вуглецеві волокна не схильні до окислення та не створюють додаткових напружень у швах через різницю коефіцієнтів теплового розширення. Такі переваги забезпечують довготривалу стабільність армувального ефекту навіть за дії агресивних середовищ.

Найбільш уживаними технологіями інтеграції вуглецевого армування у кладку є методи зовнішнього склеювання (EB – externally bonded) та приповерхневого закріплення (NSM – near-

surface mounted). У першому випадку волокна у формі стрічок або сіток приклеюють до поверхні кладки за допомогою епоксидних смол, що створює зовнішній армувальний шар, здатний розподіляти розтягувальні зусилля по площині конструкції. Метод NSM передбачає влаштування вузьких канавок у розчинових швах або в тілі каменю, у які закладають смуги вуглецевого матеріалу з подальшою заливкою полімерного клею. Такий спосіб забезпечує кращу адгезію, захищає волокна від ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень і водночас підвищує естетичну цілісність фасадів.

Експериментальні результати численних досліджень підтверджують ефективність обох підходів. Армовані зразки демонструють зростання граничної міцності на згин у середньому на 80–115 % порівняно з неармованими аналогами. Одночасно підвищується енергопоглинаюча здатність і деформаційна стійкість, що є визначальними параметрами при сейсмічних впливах. Додатковий ефект полягає у збільшенні в'язкості руйнування, завдяки чому процес тріщиноутворення відбувається поступово, без раптової втрати несучої здатності.

Разом з тим ефективність композитного підсилення значною мірою залежить від якості зчеплення між волокном і мінеральною основою. Механізм відшарування шару армування залишається одним з ключових факторів, що лімітують довговічність системи. Для зменшення цього ризику доцільно застосовувати механічні анкери або комбіновані епоксидно-цементні клеї, здатні краще узгоджувати деформаційні властивості обох матеріалів. Довготривалі випробування показали, що правильно підібрана адгезійна система гарантує стабільність зчеплення протягом десятиліть навіть за циклічного зволоження та висихання.

Оптимізація конфігурації армування є ще одним напрямом підвищення ефективності методу. Зокрема, впровадження сітчастих схем із взаємно перпендикулярним розташуванням волокон у вертикальному та горизонтальному напрямках дозволяє рівномірно перерозподіляти стискальні та зсувні сили. Вертикальні елементи протидіють діям осьового стиску (P_u), тоді як горизонтальні забезпечують опір зсуву (Q_u) та зменшують різницю напружень між суміжними рядами кладки. У сукупності вони формують внутрішній просторовий каркас, який підвищує жорсткість і знижує ризик локалізованого руйнування. За аналітичними моделями Gonshakov et al. (2020), параметри довжини закладення l_d та кроку сітки S_f істотно впливають на ефективність сприйняття згинальних моментів, що має бути враховано при проектуванні.

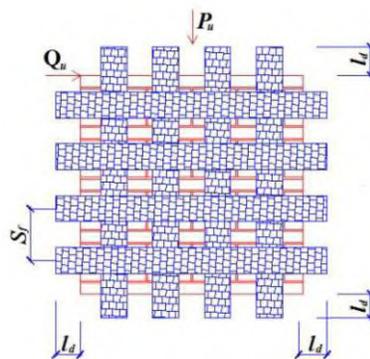


Рис. 1- Схема сітчастого армування кам'яної кладки вуглецевими волокнами у вертикальному та горизонтальному напрямках для протидії стиску P_u та зсуву Q_u у зоні максимального напруження.

Не менш важливою є довговічність таких рішень. Вуглецеві волокна відзначаються стійкістю до дії кислот, солей і ультрафіолету, однак самі композитні з'єднання потребують контролю за старінням смол та стабільністю адгезійного шару. Регламентоване технічне обслуговування, періодичні візуальні огляди й тестування зчеплення дають змогу запобігти

деградації структури. Використання сенсорних систем моніторингу напружень на основі оптоволоконних елементів відкриває нові можливості для діагностики стану армованих елементів у реальному часі.

Особливої уваги технологія заслуговує в реставраційній практиці. Підсилення кам'яних склепінь, арок і стін пам'яток архітектури вуглецевими волокнами дає змогу підвищити сейсмостійкість без втручання у зовнішню морфологію та без збільшення навантаження на фундамент. Це відповідає принципам мінімального втручання, прийнятим у міжнародній реставраційній практиці, і створює умови для суміщення збереження автентичності та забезпечення безпеки експлуатації.

Висновок. Проведений аналіз підтверджує, що інтеграція вуглецевих волокон у зони концентрації напружень кардинально змінює механічну реакцію кам'яної кладки, забезпечуючи суттєве зростання її міцності, деформаційної стійкості та енергопоглинальної здатності. Вибір між методами EB та NSM залежить від конструктивних вимог і рівня допустимого втручання, проте обидва підходи демонструють високу ефективність за умови правильно підібраної адгезійної системи та дотримання геометрії армувальних елементів. Особливу роль відіграє контроль довговічності композитного з'єднання, оскільки саме адгезія визначає тривалу працездатність підсилених структур.

Література:

1. Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). *Fiber-reinforced polymer composites for construction – State-of-the-art review*. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73–87. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73))
2. Krevaikas, T. D., & Triantafillou, T. C. (2005). *Computer-aided strengthening of masonry walls using fibre-reinforced polymer strips*. *Materials and Structures*, 38, 93–99. <https://doi.org/10.1007/BF02481624>
3. Vega, C., & Torres, N. (2018). *External strengthening of unreinforced masonry walls with polymers reinforced with carbon fiber*. *Ingeniería e Investigación*, 38(3), 73–80. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n3.73006>
4. Goh, G. D., Dikshit, V., Nagalingam, A. P., Goh, G. L., Agarwala, S., Sing, S. L., Wei, J., & Yeong, W. Y. (2018). *Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics*. *Materials & Design*, 137, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.006>