

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри будівельного виробництва інституту будівництва та інженерних систем Національного університету «Львівська політехніка»

Парнети Богдана Зіновійовича

на дисертаційну роботу **Копійки Надії Сергіївни**

«Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія

Актуальність вибраної теми дисертаційної роботи.

Проблема відновлення несучої здатності залізобетонних конструкцій із пошкодженою арматурою є надзвичайно актуальною в контексті сучасного будівництва та інженерії. Корозія арматурної сталі, як один із головних чинників зниження довговічності залізобетонних конструкцій, суттєво впливає на їхню надійність і безпеку. У цьому контексті використання композитних матеріалів, зокрема карбонових стрічок, є перспективним напрямом для підсилення пошкоджених елементів. Застосування цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) як інноваційного методу діагностики і моніторингу напружено-деформованого стану дозволяє підвищити точність оцінки технічного стану конструкцій та ефективність підсилення. Подана на розгляд дисертаційна робота Копійки Надії Сергіївни «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками» ґрунтується на інтеграції сучасних матеріалів і методів діагностики, що повністю відповідає актуальним тенденціям у будівельній галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота Копійки Надії Сергіївни «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками» відповідає науковому напрямку кафедри автомобільних доріг і мостів Національного університету «Львівська політехніка» та є складовою державної науково-дослідної теми «Розробка методики визначення фактичного ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями, що знижують несучу здатність та експлуатаційну придатність» (№

0121U109498), у якій здобувачка брала безпосередню участь. Дата затвердження на Вченій раді Інституту будівництва та інженерних систем – 18.10.2022, протокол № 2.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертації є визначення експериментальним і теоретичним шляхом несучої здатності та деформативності залізобетонних балок із різним ступенем пошкодження робочої арматури при підсиленні їх карбоновими стрічками. Для досягнення мети було поставлено і виконано наступні завдання:

- провести огляд літературних джерел і на його основі розробити експериментально-теоретичну програму досліджень залізобетонних балок з пошкодженою арматурою при підсиленні їх карбоною стрічкою, визначення параметрів їх напружено-деформованого стану і тріщиностійкості;
- виконати факторний аналіз з використанням автоматизованого проектування в ПК Ansys для аналізу найбільш впливових факторів при підсиленні залізобетонних конструкцій композитною арматурою;
- вдосконалити методику випробування бетону методом ЦКЗ шляхом оптимізації параметрів кореляційного спеклу;
- вдосконалити методику експериментальних досліджень новітнім методом цифрової кореляції зображень для визначення напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій;
- розробити та апробувати методику підсилення залізобетонних балок із пошкодженою робочою арматурою композитними стрічками;
- експериментальним шляхом оцінити несучу здатність і деформативність залізобетонних балок підсиленних карбоновими стрічками при різному пошкодженні робочої арматури;
- розробити та апробувати методику розрахунку за деформаційною моделлю параметрів напружено-деформованого стану для згинаних залізобетонних конструкцій, підсиленних карбоною стрічкою, з використанням діючих норм проектування України.

Методи досліджень.

У дисертації застосовано низку взаємодоповнюючих експериментальних і теоретичних підходів. На першому етапі було застосовано метод критичного аналізу сучасних наукових публікацій та попередніх експериментальних досліджень для

формування обґрунтованої дослідницької програми. Експериментальні дослідження були реалізовані з використанням механічного тензометричного методу, а також цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), що дозволило з високою точністю визначити параметри напружено-деформованого стану залізобетонних балок на спеціально підготовленому випробувальному стенді. Для забезпечення відповідності результатів чинним нормативним документам застосовувалося сертифіковане обладнання. Теоретичні розрахунки виконувались з використанням деформативного підходу, що базується на нелінійній деформаційній моделі згідно з діючими нормами проектування України. Крім того, для факторного аналізу та оцінки впливу ключових параметрів на поведінку підсиленних конструкцій було використано метод скінченних елементів у програмному середовищі ANSYS. Це дозволило здійснити чисельне моделювання процесів у конструкціях і сформувати відповідні інженерні висновки. Таким чином, комбінація експериментальних вимірювань, чисельного моделювання та теоретичних розрахунків забезпечила комплексне дослідження ефективності підсилення пошкоджених залізобетонних балок карбоновими стрічками.

Наукова новизна отриманих результатів:

Наукова новизна отриманих результатів полягає в комплексному дослідженні ефективності підсилення пошкоджених залізобетонних балок композитними матеріалами, зокрема карбоновими стрічками, із застосуванням комплексного підходу. Уперше отримано нові експериментальні дані щодо несучої здатності та деформативності балок із пошкодженою робочою арматурою що дозволило кількісно оцінити ефективність зовнішнього підсилення. Встановлено, що використання карбонової стрічки забезпечує відновлення початкової несучої здатності у межах 79–111 % (в порівнянні з базовим значенням 100% несучої здатності для контрольних зразків) залежно від ступеня втрати ефективної площі арматури — від 65 % до 20 % відповідно. Також уперше виявлено закономірність зміни ефективності композитного підсилення залежно від ступеня пошкодження арматури: максимальний ефект спостерігається за умов істотних пошкоджень. Оптимізовано параметри кореляційного спеклу для цифрової кореляції зображень та експериментально обґрунтовано ефективність різних способів підготовки поверхні — шляхом нанесення спеклу або використанням штучних маркерів, що дозволило підвищити точність і адаптивність методу у відтворенні напружено-деформованого стану конструкцій. Розроблено та апробовано методику розрахунку за нелінійною деформаційною моделлю, адаптовану

для згинаних залізобетонних балок з підсиленням, що враховує ступінь пошкодження арматури та її неоднорідні термічнозміцнені властивості. Крім того, розширено функціональні можливості методу ЦКЗ як інструменту діагностики та експериментального дослідження залізобетонних конструкцій, забезпечивши безконтактне визначення повного поля деформацій і напружень у бетоні та арматурі на всіх етапах навантаження — аж до моменту руйнування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості подальшого використання у практиці обстеження та підсилення конструкцій з корозійними пошкодженнями. Розроблені методики дозволяють інженерам ефективно оцінювати технічний стан залізобетонних елементів, вибирати доцільну схему підсилення та прогнозувати залишковий ресурс конструкцій. Наявні акти про впровадження результатів досліджень (Додаток Ж) при проведенні робіт з обстеження і діагностики конструкцій ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШИН» та ТОВ «СІКА Україна». Результати дисертаційної роботи також було використано в навчальному процесі в Національному університеті «Львівська політехніка» при підготовці бакалаврів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» та магістрів спеціалізації «Промислове та цивільне будівництво».

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, представлені в дисертації, ґрунтуються на систематичних експериментальних дослідженнях, виконаних з використанням комплексу сучасних взаємодоповнюючих методів. Експериментальні дослідження проводилися з використанням ЦКЗ у поєднанні з субмікронними індикаторами для підвищення точності вимірювання локальних деформацій. Крім того, результати були перевірені шляхом крос-валідації за допомогою двох підходів до обробки зображень у ЦКЗ, що дозволило підвищити надійність і достовірність визначення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів. Особливу увагу приділено теоретичному розрахунку згинальних елементів із урахуванням різного ступеня пошкодження арматури, що дозволило зіставити числові та експериментальні дані. Аналіз експериментальних результатів, порівняння з теоретичними моделями та формулювання висновків здійснені коректно, що свідчить про наукову обґрунтованість отриманих результатів. Рекомендації щодо підсилення

пошкоджених конструкцій карбоновими матеріалами мають прикладну цінність і можуть бути використані в інженерній практиці.

Відповідність змісту анотації основним положенням дисертаційної роботи.

Зміст анотації повністю відповідає основним положенням дисертації. В анотації коректно викладено мету дослідження, об'єкт і предмет, основні методи, використані в роботі, а також ключові результати й наукову новизну. Описані висновки і практичне значення відповідають структурі та змісту основних розділів дисертації. Стиль викладення матеріалу у дисертації та анотації відповідає загальноприйнятим нормам, забезпечує однозначність сприйняття основних положень і результатів дослідження.

Особистий внесок здобувача

Усі основні наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи отримані здобувачкою особисто, або за безпосередньої участі. Авторка самостійно здійснила постановку наукової проблеми, розробила програму експериментальних досліджень, виконала випробування з використанням цифрової кореляції зображень, а також провела аналіз отриманих результатів і узагальнення. Розробки, які стали підґрунтям для рекомендацій щодо підсилення залізобетонних конструкцій, не повторюють відомих підходів і є результатом самостійного теоретико-експериментального пошуку.

Апробація результатів дисертації

Основні результати дисертації були апробовані на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях, що засвідчує їх актуальність і викликало позитивний відгук фахової спільноти, зокрема: XVII International Scientific Conference Lviv- Košice – Rzeszów «Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv- Košice – Rzeszów» (Rzeszów, Poland, 11-13 вересня, 2019 p.), 8th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Харків, Україна, 20-22 листопада, 2019 p.), VII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, Україна, 12-15 травня, 2020 p.), International Scientific Conference EET-2020 «Energy efficiency in transport» (Харків, Україна, 18-20 листопада, 2020 p.), 17th International Conference on Quality Production Improvement-QPI 2023 (Zaborze, Poland, 14-16 червня, 2023 p.), XVIII International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów (Rzeszów, Poland, 6-8 вересня, 2023 p.), IV

Міжнародній науковій конференції «ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві» (Львів, Україна, 11-13 вересня 2024 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, Україна, 23 квітня 2024 р.), 18th International Conference Quality Production Improvement - QPI 2024 (Osijek near Wieu, Poland, 3-5 червня, 2024 р.), International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation MistoBud-2025 (Харків, Україна, 30 січня- 1 лютого, 2025 р.).

Мова і стиль роботи

Дисертаційна робота написана грамотною, логічною і науково виваженою мовою. Стиль викладу чіткий, послідовний, без зайвого ускладнення, з коректним використанням термінології в галузі будівельних конструкцій, композитних матеріалів та методів діагностики. Структура і зміст дисертаційної роботи є узгодженою з її метою і завданнями. Авторка демонструє глибоке володіння матеріалом, належний рівень академічної культури та здатність формулювати складні технічні й наукові ідеї в доступній та зрозумілій формі.

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.

Основні наукові результати, положення та висновки дисертації знайшли повне відображення в опублікованих працях. Результати дисертації опубліковані у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Web of Science), а також у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України. Здобувачкою підготовлено 25 наукових статей, з яких 14 – що індексуються в міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science), 8 наукових публікацій у спеціалізованих фахових виданнях України, а також 3 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій. Усі публікації відображають основні положення дисертації, забезпечуючи прозорість і відтворюваність результатів.

Аналіз змісту дисертації.

Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків та додатків. Робота викладена на 245 сторінках, які включають 149 сторінок основного тексту, 15 таблиць та 79 ілюстрацій, списку використаних джерел із 219 найменувань, 7 додатків. Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню впливу корозійних

пошкоджень арматури на несучу здатність залізобетонних балок та ефективності їх підсилення карбоновими стрічками.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну, практичне значення результатів та структуру роботи.

Розділ 1 має оглядовий характер і містить систематизацію наукових праць, присвячених корозійному зниженню несучої здатності залізобетонних елементів і методам їх підсилення. Особливу увагу приділено композитним матеріалам, зокрема карбоновим стрічкам, як ефективному засобу підсилення без суттєвого втручання у геометрію конструкції. У розділі також обґрунтовано переваги методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) як перспективного засобу неруйнівного контролю деформацій і тріщин. Завершується розділ формулюванням завдань дослідження.

У **розділі 2** описано методику проведення експериментальних досліджень. Визначено змінні параметри випробувань, розроблено програму моделювання корозійних пошкоджень арматури Ø20 мм шляхом проточування до Ø18–12 мм (відповідає втратам площі арматури на 20–65 %). Наведено характеристики зразків, зокрема бетонних балок, призм та кубиків, використаних для оцінки деформативності. Розділ містить вдосконалення методики ЦКЗ, включно з параметрами спектра, підготовкою поверхні та застосуванням суб-мікронних індикаторів. Також описано підхід до підсилення балок із застосуванням карбонових стрічок Sika Carbodur S512 та ефективного анкерування.

Розділ 3 присвячено аналізу результатів випробувань. Встановлено, що карбонові стрічки здатні повністю відновити або перевищити початкову несучу здатність при втраті до 36 % площі арматури, а при пошкодженнях до 64 % — досягнуто часткове відновлення на рівні 79–95 %. Спостерігалось зменшення прогинів на 14–32 % та збільшення моменту що відповідає досягненню граничного прогину вдвічі. Надійність результатів підтверджено узгодженістю показів ЦКЗ та індикаторів (відхилення до 7 %).

У **розділі 4** представлено теоретичну методику оцінки несучої здатності з урахуванням регресійної моделі межі текучості арматури (у вигляді рівняння Больцмана) та нормативних положень ДСТУ і ДБН. Проведено порівняння теоретичних та експериментальних результатів, що показало відповідність з похибкою

не більше 15 %. Встановлено адекватність моделей щодо оцінки прогинів, тріщиноутворення та ефективності підсилення композитними стрічками.

У **висновках** узагальнено основні результати дослідження впливу корозії арматури на несучу здатність залізобетонних балок і ефективність їх підсилення композитними матеріалами. Зроблено висновки про ефективність поєднання експериментальних методів і числового моделювання для оцінки залишкового ресурсу конструкцій, а також доцільність впровадження підсилення композитами в інженерну практику.

Кожен розділ логічно доповнює попередній, формуючи послідовну структуру дослідження — від проблематики та методики до експериментальної перевірки та аналітичного обґрунтування результатів.

Дискусійні положення, зауваження та пропозиції.

1. У розділі 1, пункті 1.3, йдеться про зони концентрації напружень на кінцях карбонової стрічки, які виникають «через зусилля зсуву». Формулювання виглядає спрощеним, оскільки механізм виникнення концентрацій напружень пов'язаний не лише з дією зсуву, а й з локальною передачею зусиль між стрічкою та бетоном, що може спричинити відшарування. Можна рекомендувати розширити пояснення цього аспекту з урахуванням відповідних механізмів переносу навантаження.
2. У початковому описі планування експерименту згадано два змінні параметри — ступінь пошкодження арматури та ширину карбонової стрічки. Однак у програмі випробувань варіюється лише перший параметр. Незважаючи на наявність спрощеного пояснення щодо фіксації ширини стрічки на певному незмінному рівні, доцільно надати докладніше обґрунтування виключення цього параметра як нерепрезентативного.
3. Для моделювання корозії робочу арматуру було сточено на ділянці довжиною 120 мм. Відсутнє пояснення вибору саме цієї довжини як типової або критичної з точки зору впливу на несучу здатність.
4. Відсутнє пояснення чому в місцях сточування арматури не було частково відновлено бетонне тіло конструкції, адже така умова суттєво відрізняється від реальних сценаріїв відновлення.
5. Звертає на себе увагу структурна невідповідність між кількістю поставлених завдань (7) та кількістю сформульованих висновків (9). Можна рекомендувати переглянути логіку відповідності між цілями та результатами, зменшивши або згрупувавши частину висновків для кращої системності.

6. Слід окремо підкреслити важливість того, що внаслідок сточування арматури з діаметра 20 мм до 12 мм було повністю втрачено термічно-зміцнений шар. Це призводить до істотної зміни її фізико-механічних характеристик, і цей фактор варто чітко враховувати в аналітичних оцінках та інтерпретації результатів експерименту.

Висновок.

Одержані теоретичні та практичні результати дозволяють підвищити ефективність використання композитних матеріалів для підсилення залізобетонних конструкцій з пошкодженою робочою арматурою. Підсумовуючи, роблю висновок, що дисертаційна робота Копійки Надії Сергіївни «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсиленних карбоновими стрічками» виконана на достатньому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності, є завершеною наковою працею і відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами внесеними від 12.07.2019 р.), Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. №44 зі змінами внесеними від 21.03.2022 р., від 19.05.2023 р., і від 03.05.2024 р.), а її авторка Копійка Надія Сергіївна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Рецензент —

кандидат технічних наук,
доцент кафедри будівельного
виробництва інституту будівництва та
інженерних систем Національного
університету «Львівська політехніка»



Богдан ПАРНЕТА

Підпис доцента Парнети Б.З.
засвідчую

Проректор




Микола ЛОРЦОВИЧ