

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри будівельних конструкцій та мостів інституту будівництва та інженерних систем Національного університету «Львівська політехніка»

Були Сергія Степановича

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.

Відновлення несучої здатності залізобетонних конструкцій із пошкодженнями робочої арматури є одним із ключових викликів сучасної інженерної практики, особливо в умовах негативного впливу зовнішнього середовища на об'єкти критичної інфраструктури. Корозія арматури, як один із домінантних факторів зниження несучої здатності залізобетонних елементів, викликає суттєві структурні й експлуатаційні ризики, що потребують термінового впровадження вискоєфективних технічних рішень. У цьому контексті застосування полімерних композиційних матеріалів на основі вуглецевих волокон (карбонових стрічок) є одним із перспективних напрямів у підсиленні конструкцій, які зазнали часткової втрати несучої здатності. Особливого значення набуває впровадження дистанційних і неруйнівних методів діагностики, зокрема цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), що забезпечує безконтактне, детальне дослідження напружено-деформованого стану елементів у реальному часі.

Дисертаційна робота Копійки Надії Сергіївни «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками» спрямована на розв'язання важливих для будівельної галузі завдань, що досягається завдяки інтеграції сучасних матеріалів і передових методів дослідження.

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

Тематика представленого дисертаційного дослідження Копійки Надії Сергіївни повністю відповідає пріоритетному напрямку наукової діяльності кафедри автомобільних доріг і мостів Національного університету «Львівська політехніка», стосовно забезпечення надійності конструктивних елементів та розроблення інновативних методів для їх діагностики і відновлення.

Робота виконувалась у межах державної науково-дослідної теми «Розробка методики визначення фактичного ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями, що знижують несучу здатність та експлуатаційну придатність» (номер державної реєстрації 0121U109498), де здобувачка брала безпосередню участь як виконавиця. Отримані в процесі реалізації цієї НДР результати були покладені в основу дисертаційної роботи. Дата затвердження теми 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. Досягнення даної мети передбачало виконання наступних завдань:

- провести огляд літературних джерел і на основі його розробити експериментально-теоретичну програму досліджень залізобетонних балок з пошкодженою арматурою при підсиленні їх карбоновою 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 підсилених карбоновими стрічками при різному пошкодженні робочої арматури;
- розробити та апробувати методику розрахунку за деформаційною моделлю параметрів напружено-деформованого стану для згинаних залізобетонних конструкцій, підсилених карбоновою стрічкою, з використанням діючих норм проектування України.

Методи досліджень.

У дисертаційній роботі реалізовано поетапну методологію, що поєднує сучасні експериментальні та чисельно-аналітичні підходи до вивчення напружено-деформованого стану та несучої здатності залізобетонних балок з корозійними пошкодженнями арматури, підсилених карбоновими стрічками. На першому етапі досліджень здійснено критичний аналіз сучасного наукового доробку та нормативно-технічної документації з метою обґрунтування стратегії дослідження та постановки завдань. Експериментальна частина базується на поєднанні тензометричного методу з новітнім методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), що дало змогу здійснювати безконтактне дослідження розподілу напружень і деформацій у бетоні та арматурі. Випробування проводилися на спеціально підготовленому стенді із застосуванням сертифікованого обладнання відповідно до чинних стандартів, при чому в експериментальних зразках шляхом сточування робочої арматури було змодельовано різні ступені пошкодження. Теоретичні розрахунки виконувалися на основі нелінійної деформаційної моделі згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010 та ДБН В.2.6-98:2009. Для аналізу впливу основних параметрів на поведінку підсилених елементів було застосовано метод скінченних елементів у середовищі ANSYS, що дозволило реалізувати факторний аналіз і побудову поверхонь відгуку. Застосована комбінація експериментальних випробувань, чисельного моделювання та нормативно-орієнтованого аналітичного розрахунку забезпечила високий рівень достовірності отриманих результатів і комплексність оцінки ефективності підсилення конструкцій.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у комплексному дослідженні ефективності підсилення згинаних залізобетонних елементів із пошкодженою робочою арматурою за допомогою карбонових композитних стрічок, із використанням інноваційних аналітичних методів експериментальних і теоретичних досліджень. Вперше отримано кількісні експериментальні дані щодо несучої здатності та деформативності балок при різних ступенях втрати ефективного перерізу арматури (від 20% до 65%), що дозволило визначити межі ефективного застосування зовнішнього підсилення карбоновими стрічками. Встановлено, що за умов суттєвого пошкодження арматури підсилення карбоновими стрічками забезпечує відновлення або навіть перевищення початкової несучої здатності в порівнянні з контрольними зразками. Крім того, вперше виявлено закономірність впливу ступеня пошкодження арматури на деформації композитної стрічки, що дозволяє оцінити ефективність її використання в умовах реального навантаження. Оптимізовано параметри кореляційного спеклу для методу ЦКЗ, а також обґрунтовано доцільність використання різних методик підготовки поверхні — шляхом нанесення контрастного спеклу безпосередньо на поверхню або застосування штучних маркерів, що дозволило підвищити просторову точність і стабільність вимірювань. В роботі розширено функціональні можливості методу ЦКЗ як експериментального інструменту: забезпечено надійне, безконтактне визначення поля деформацій та розподілу напружень на всіх стадіях навантаження — включно до моменту руйнування, що відкриває перспективи його практичного застосування для обстеження й моніторингу технічного стану реальних об'єктів. Крім того, розроблено і верифіковано методику розрахунку згинаних елементів на основі нелінійної деформаційної моделі з урахуванням неоднорідностей міцнісних характеристик термічнозмцненої арматури.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання їх в інженерній практиці для обґрунтованої оцінки технічного стану залізобетонних елементів із корозійними пошкодженнями, визначення залишкового ресурсу та прийняття рішень щодо доцільності їх підсилення. Розроблені методики дозволяють інженерам-конструкторам реалізувати комплексний підхід до діагностики та підсилення шляхом застосування композитних матеріалів, зокрема карбонових стрічок, із урахуванням ступеня деградації арматури. Значним аспектом практичної

реалізації є документально підтверджене впровадження окремих положень роботи у виробничу діяльність, зокрема в процесі обстеження та технічної діагностики конструкцій, виконаних ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШИН» і ТОВ «СІКА Україна» (див. Додаток Ж). Крім того, результати досліджень застосовано в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» під час підготовки фахівців за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, мають достатній рівень обґрунтованості, оскільки базуються на результатах експериментально-теоретичних досліджень, що реалізовані з використанням актуальних методів діагностики та чисельного аналізу. Експериментальна верифікація ґрунтується на поєднанні методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) із субмікронними контактними індикаторами, що забезпечило високу точність вимірювання деформацій у локальних зонах критичного навантаження.

Крім того, достовірність експериментальних вимірювань підтверджено шляхом внутрішньої крос-валідації, виконаної за допомогою двох альтернативних підходів до підготовки поверхні в методі ЦКЗ. Узагальнені висновки також підкріплені результатами теоретичних розрахунків згинаних елементів, які враховували зміну міцнісних характеристик арматури внаслідок корозійного зменшення її перерізу. Співставлення теоретичних і експериментальних даних продемонструвало високу ступінь збіжності, що підтверджує достовірність отриманих результатів. Таким чином, рекомендації, сформульовані в роботі, можуть бути інтегровані в інженерну практику, зокрема в контексті реконструкції та підсилення несучих елементів із залізобетону.

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

Основні наукові положення, результати експериментальних досліджень, висновки та практичні рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, одержано здобувачкою самостійно або за її безпосередньої участі. Авторка самостійно сформулювала наукову проблему, визначила концептуальні засади дослідження, розробила програму випробувань і забезпечила її реалізацію, зокрема із застосуванням методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Здобувачкою також проведено повний цикл обробки, інтерпретації та порівняльного аналізу отриманих результатів із використанням теоретичних моделей. Методичні підходи до оцінювання ефективності підсилення та відповідні технічні рішення є оригінальними та не відтворюють наявних аналогів, що свідчить про самостійність теоретико-практичного внеску у вирішення поставленого наукового завдання.

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 «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, Україна, 23 квітня 2024 р.), 18th International Conference Quality Production Improvement - QPI 2024 (Osijek near Wieruszów, 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 вирізняється академічною коректністю викладу, технічною точністю та методичною злагодженою подачі матеріалу. Текст сформовано у відповідності до вимог науково-технічного стилю: структура викладу є чіткою, логічно послідовною та концептуально узгодженою з метою і завданнями дослідження. Авторкою застосовано фахову термінологію в межах обраної тематики з належним рівнем точності й контекстної доречності. Висвітлення теоретичних засад, експериментальних процедур і аналітичних висновків здійснено у формі, що відповідає академічним стандартам технічних наук. Стиль викладення свідчить про глибоку обізнаність здобувачки з предметом дослідження, її здатність до системного мислення та до формулювання складних науково-технічних концептів у чіткій і доступній формі.

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

Основні наукові результати, положення та висновки дисертації відображені в наукових публікаціях авторки. Результати дисертації опубліковані в наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Web of Science), а також у наукових фахових виданнях України. Зокрема, результати за темою дисертації висвітлені у 25 наукових працях, з яких 8 наукових публікацій у спеціалізованих фахових виданнях України, 14 – що індексуються в міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science), а також 3 публікації тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій. Основні наукові положення дисертації повною мірою представлені в опублікованих працях, що забезпечує належну репрезентативність і відтворюваність отриманих результатів.

Аналіз змісту дисертації.

Дисертаційна робота складається з 4 розділів, вступу, 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 різного ступеня 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 загальну структуру роботи.

Розділ 1 має аналітично-оглядовий характер і містить систематизоване представлення сучасного наукового доробку, присвяченого впливу агресивних впливів зовнішнього середовища на несучу здатність залізобетонних конструкцій та основним технологічним підходам до їх підсилення. Особливий акцент зроблено на використанні полімерних композитних матеріалів, зокрема карбонових стрічок, як високоефективного засобу зовнішнього армування, що є технологічним, адаптивним і простим в застосуванні. Також обґрунтовано доцільність застосування цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) як точного та перспективного інструменту для неруйнівного контролю напружено-деформованого стану. Завершенням розділу є чітке обґрунтування і формулювання основних завдань дослідження.

Розділ 2 присвячено методичному забезпеченню експериментальної частини дослідження. В ньому докладно описано програму випробувань, зокрема визначено змінні параметри, пов'язані зі ступенем корозійного ослаблення арматури діаметром $\varnothing 20$ мм, шляхом її проточування до діаметрів $\varnothing 18$ – 12 мм, що відповідає втратам площі перерізу в діапазоні 20–65 %. Надано детальний опис і характеристику дослідних зразків: повнорозмірних залізобетонних балок, а також бетонних призм та кубиків, для оцінки фізико-механічних характеристик бетону. Окрему увагу приділено вдосконаленню методики ЦКЗ, включно з оптимізацією параметрів кореляційного спеклу і підготовкою досліджуваної поверхні. Також обґрунтовано застосування композитного підсилення з використанням карбонових стрічок Sika Carbodur S512, включаючи технічні рішення щодо анкерування.

Розділ 3 зосереджено на інтерпретації і аналізі результатів випробувань. Емпірично встановлено, що при втраті площі арматури до 36 % підсилення дозволяє

повністю відновити або перевищити первісну несучу здатність. У випадку значніших пошкоджень (до 64 %) спостерігається часткове відновлення у межах 79–95 %. Також зафіксовано зменшення прогинів на 14–32 % та збільшення моменту досягнення граничного прогину майже удвічі порівняно з непідсиленими зразками. Точність результатів підтверджено збіжністю показів методу ЦКЗ та індикаторів, з похибкою до 7 %.

У розділі 4 описано методику теоретичного розрахунку несучої здатності із використанням нелінійної деформаційної моделі, адаптованої до конструкцій з корозійними пошкодженнями термічнозміцненої арматури. Особливістю підходу є врахування зміни межі текучості арматури через використання регресійної моделі у формі рівняння Больцмана. Проведене порівняння експериментальних даних із розрахунковими показало задовільну відповідність, з відхиленням не більше 15 %. Продемонстровано доцільність моделі для визначення несучої здатності, деформативності, тріщиноутворення та ефективності підсилення композитними матеріалами.

У висновках дисертації узагальнено результати комплексного дослідження впливу корозійного пошкодження робочої арматури на поведінку залізобетонних згинаних елементів, а також ефективності їх підсилення за допомогою карбонових стрічок. Підкреслено ефективність поєднання експериментальних методів (зокрема ЦКЗ) з теоретичним і чисельним моделюванням для прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Зроблено висновок про доцільність практичного впровадження таких рішень у сучасну інженерну практику. Загалом, зміст кожного розділу логічно продовжує попередній, забезпечуючи цілісну структуру дослідження — від постановки проблеми до верифікації результатів і формування загальних висновків.

Дискусійні положення, зауваження та пропозиції.

1. У роботі зазначено використання середовища DesignXplorer для параметричного аналізу, однак відсутнє критичне обґрунтування переваг саме цього інструменту порівняно з альтернативними підходами, зокрема методами градієнтної оптимізації або класичними методами нелінійного програмування в межах МНМ. Доцільно було б розширити аргументацію вибору програмного забезпечення в контексті цілей дослідження.

2. Ряд математичних положень, зокрема формули (2.1)–(2.6), пов'язані з побудовою метамоделей та розрахунком статистичних характеристик (ентропія, PRESS, RMSE), варто або узагальнити, або винести до додатків. Їх надмірно деталізоване включення в основний текст зміщує акцент з інженерної інтерпретації результатів на математичне формалізування, що ускладнює сприйняття головної мети підрозділу. Якщо ці положення не є оригінальними розробками, достатньо посилання на першоджерела.
3. На рисунку 3.21а відсутнє маркування положення граничного прогину для серії ПБ-1. З огляду на числові результати, ймовірно, це пов'язано з тим, що відповідний рівень деформацій не був досягнутий. Це варто чітко пояснити в тексті як виняток або межову ситуацію.
4. В роботі використано дві системи оцінювання ефективності використання композитної стрічки — регламентовані компанією Sika та за критеріями FIB Bulletin. Доцільно уточнити відмінності між цими підходами та обґрунтувати застосування обох, особливо з позицій проектної практики.
5. Не зовсім зрозумілою лишається методика нанесення кореляційного спеклу на карбонову стрічку: чи був він нанесений безпосередньо на поверхню карбонової стрічки, чи використовувалися виключно штучні маркери. Така технічна деталь має значення для інтерпретації достовірності вимірів деформацій у критичних зонах.
6. В усіх зразках в роботі вичерпання несучої здатності зафіксовано через руйнування за стиснутим бетоном. Якщо це стосується й контрольної серії без підсилення, виникає логічне питання щодо початкового ступеня армування — ймовірно, балки були переармовані. Такий випадок є нетиповим для більшості практичних застосувань, де превалюють недоармовані перерізи. Це бажано обговорити окремо або пояснити причини такого конструктивного вибору.
7. В роботі не наведено даних щодо відсотків армування дослідних елементів. Оскільки цей параметр є критичним для аналізу механізму руйнування та формування напружено-деформованого стану, його доцільно було б навести окремо та зіставити з нормативними граничними значеннями для переармованих і недоармованих конструкцій.

Висновок.

Дисертаційна робота Копійки Надії Сергіївни «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками» 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 будівельних
конструкцій та мостів інституту
будівництва та інженерних систем
Національного університету
«Львівська політехніка»

Сергій БУЛА

Підпис доцента Були С.С. засвідчує



Вчений Секретар Національного
Університету «Львівська
політехніка», к.т.н., доц. Роман
БРИЛИНСЬКИЙ