

ВІДГУК ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Копійки Надії Сергіївни на тему «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсиленних карбоновими стрічками» на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

1. Ступінь актуальності теми дисертаційної роботи

Тема є вкрай актуальною для сучасної України та міжнародної інженерної спільноти. Об'єкт дослідження – підсилення залізобетонних згинаних конструкцій із пошкодженою робочою арматурою за допомогою карбонових стрічок – напряму відповідає задачам швидкого відновлення та підвищення надійності існуючих споруд. В умовах післявоєнного відновлення критично важливо мати відпрацьовані, технологічні та економічно доцільні методики ремонту та підсилення пошкоджених конструкцій без тривалого виведення об'єктів з експлуатації. Використання зовнішнього підсилення CFRP-матеріалами (карбоновими стрічками) належить до найпоширеніших сучасних технологій ретрофіту, активно досліджується та впроваджується у світі. Робота Копійка Н.С. поєднує експериментальні випробування, цифрову кореляцію зображень (DIC) для детальної реєстрації деформацій, а також чисельне моделювання (MCE/Ansys) і деформаційну модель розрахунку на базі чинних норм України, що відповідає сучасним науковим підходам і потребам практики.

Міжнародна релевантність підтверджена публікаціями автора у виданнях, що індексуються Scopus/WoS (Q1–Q4), та матеріалами міжнародних конференцій; окремі результати стосуються фізико-механічних характеристик термічно зміцненої арматури, оптимізації шаблонів DIC для бетону та впливу CFRP-підсилення на розтріскування, що знаходиться у фокусі глобальних досліджень зі зміцнення залізобетонних елементів. Висновки дисертації мають прикладний характер і застосовні до задач посилення балок у цивільному будівництві, у т.ч. при реконструкції пошкоджених об'єктів.

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

Дисертаційна робота пов'язана з держбюджетною науково-дослідною темою 2021–2022 рр. (№ держреєстрації 0121U109498) тему «Розробка методики визначення фактичного ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями, що знижують несучу здатність та експлуатаційну придатність», результати впроваджені у навчальний процес НУ «Львівська політехніка» та в інженерну практику (ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШИН», ТОВ «СІКА Україна»). Даних про іноземні гранти в тексті дисертації не виявлено.

3. Мета, завдання, об'єкт, предмет і методи досліджень

Головною метою роботи є підвищення надійності та відновлення несучої здатності залізобетонних балок із пошкодженою робочою арматурою шляхом зовнішнього підсилення карбоновими стрічками з розробленням/удосконаленням методики оцінювання

несучої здатності та деформативності з урахуванням особливостей термічно-зміцненої арматури й рівня початкового навантаження.

Об'єктом дослідження є підсилення залізобетонних згинаних конструкцій з пошкодженою робочою арматурою карбоновими стрічками.

Предметом дослідження є параметри напружено-деформованого стану, міцність і деформативність залізобетонних балок із дефектами арматури, підсилених CFRP-стрічками; ефективність підсилення залежно від втрати площі арматури та режимів навантаження.

Методи дослідження. Критичний аналіз і систематизація відомих експериментальних/теоретичних досліджень; експериментальні випробування балок на стенді з використанням тензометрії та цифрової кореляції зображень (DIC) для картування деформацій і тріщиноутворення; деформаційна (нелінійна) модель розрахунку згідно з чинними нормами України; метод скінченних елементів (МСЕ) з факторним аналізом/DOE в Ansys DesignXplorer для виявлення чутливості та оптимізації параметрів; розроблення рекомендацій щодо анкерного закріплення стрічки, методики побудови повної діаграми деформування бетону з низхідною віткою.

4. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

вперше:

- отримано нові експериментальні дані щодо несучої здатності та деформативності залізобетонних балок із різними ступенями пошкодження робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками, із застосуванням методу цифрової кореляції зображень (DIC) для детального картування деформацій і тріщиноутворення;

- встановлено ефективність підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками саме в умовах часткової втрати поперечного перерізу арматури та/або локальних дефектів робочої арматури, визначено характер впливу ступеня пошкодження на приріст несучої здатності.

удосконалено:

- параметри кореляційного спеклу (розмір, контраст, щільність) для реєстрації деформацій бетону засобами DIC із використанням як безпосереднього нанесення спеклу, так і штучних маркерів, що зменшує похибку вимірювань і підвищує відтворюваність результатів;

- експериментально-обчислювальний підхід до оцінювання НДС підсилених елементів із поєднанням традиційної тензометрії та DIC (калібрування й валідація вимірювань на контрольних етапах навантаження).

отримала подальший розвиток:

- методика розрахунку за деформаційною моделлю для визначення несучої здатності та деформативності балок з пошкодженою робочою арматурою, підсилених карбоновими стрічками, з урахуванням різних рівнів пошкодження та неоднорідних

характеристик термічно-зміцненої арматури; методику апробовано та верифіковано на експериментальних даних.

5. Основний зміст дисертації

Дисертація викладена на 245 стор., з них основний текст —149 стор., 15 таблиць, 79 ілюстрацій, 219 джерел, 7 додатків; структура: вступ, 4 розділи, висновки, список джерел, додатки.

У **вступі** (7 стор., с. 23–29) обґрунтовано актуальність, сформульовано мету, завдання, об'єкт/предмет і методи, наведено наукову новизну та практичне значення, зв'язок із НДР і апробацію.

Розділ 1 (42 стор., с. 30–62) – огляд і аналіз сучасних методів підсилення RC-елементів композитами; особливості термічно-зміцненої арматури; стан проблеми визначення анкерної довжини та роботи клеєвого шару; виявлено прогалини (облік ступеня пошкодження арматури, рівня навантаження при підсиленні тощо).

Розділ 2 (31 стор., с. 63–96) – експериментальна програма: випробування зразків бетону (призми/куби) для побудови повної діаграми деформування; параметри й калібрування DIC (вплив розміру спеклу 1–2 мм на похибку); стендові випробування балок з різними ступенями пошкодження арматури; опис вимірювальної апаратури, схем навантаження, методики оброблення даних.

Розділ 3 (37 стор., с. 97–134) – результати випробувань, картини тріщиноутворення, етапи роботи перерізу, вплив CFRP на прогини/жорсткість/момент тріщиноутворення й руйнування; аналіз параметричної чутливості; зіставлення DIC/традиційних вимірювань.

Розділ 4 (24 стор., с. 135–167) – теоретичний розрахунок на базі деформаційної моделі та MSE; алгоритм оцінки несучої здатності і прогинів з урахуванням початкового навантаження; рекомендації з визначення анкерної довжини; калібрування моделі за результатами експериментів; порівняння розрахункових і експериментальних кривих.

Висновки (с. 168–171) – підсумки за розділами та загальні висновки; Список джерел (с. 172–198); Додатки (с. 199–245) – DOE/DesignXplorer; методичні матеріали щодо анкерної довжини; фотофіксація зразків; повний список публікацій за темою дисертації.

6. Оцінка змісту дисертації, оформлення та закінченості в цілому, ідентичності анотації й основних положень, апробації результатів, особистого внеску здобувача

Структура та обсяг дисертації. Структура відповідає вимогам: вступ, 4 розділи, висновки, список джерел, додатки. Обсяг і наповнення (149 стор. основного тексту; 15 табл.; 79 іл.; 219 джерел; 7 додатків) є достатніми для кваліфікаційної праці такого рівня.

Оцінка змісту та основних положень. Анотація коректно відображає зміст і наукову новизну. У розділах послідовно наведено огляд, постановку задач, методику, результати експериментів і розрахунків, а також узгоджене порівняння з моделями; висновки логічно випливають з отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях (EcoComfort 2022, 2024; Environmental Challenges in Civil Engineering; «Ресурсоекономні матеріали...», тощо), а також на семінарах кафедри у 2021–2025 рр.

Публікації (за темою дисертації).

Статті у виданнях інших держав (Scopus/WoS):

- Blikharskyu Y., Selejdak J., Kapiika N. (2021) Case Studies in Construction Materials (Q1): Specifics of Corrosion Processes in Thermally Strengthened Rebar.
- Kapiika N., Selejdak J., Blikharskyu Y. (2022) Production Engineering Archives (Q2): Specifics of physico-mechanical characteristics of thermally-hardened rebar.
- Blikharskyu Y., Kapiika N., Khmil R., Blikharskyu Z. (2023) Springer (Scopus Q4): Digital Image Correlation Pattern for Concrete Characteristics — Optimal Speckle.
- Kapiika N., Blikharskyu Y., Sobko Y., Khmil R., Blikharskyu Z. (2025) IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: Impact of CFRP-strengthening on Crack Formation in RC Structures.
- Kapiika N. (2023) Theory and Building Practice: State of the Art on Strengthening of Damaged RC Elements with CFRP (оглядова стаття).

Статті у фахових виданнях України:

- Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Вісник ОДАБА, №77: Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах.
- Blikharskyu Y. Z., Kapiika N. S. (2020) Bulletin of Odessa State Academy..., №79: Influence of steel rebar uniform corrosion on reinforced concrete structures strength.
- Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Зб. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», вип.37: Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення.

Матеріали конференцій і тези:

- Kapiika N., Kovalova T., Myroniuk O., Kotliar V., Trykoz N. (2020) EET-2020 (Kharkiv): Possibility of using thermally strengthened steel reinforcement in 3D printed construction.
- EcoComfort 2022, EcoComfort 2024 — доповіді за тематикою дисертації.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовано наукове питання, виконано основну частину експериментів (бетон/балки), оброблення та аналіз даних (включно з DIC), розроблено/удосконалено розрахункові підходи (деформаційна модель з урахуванням початкового навантаження), здійснено чисельні дослідження і підготовлено публікації. Результати впроваджено у навчальний процес і практику.

7. Дискусійні положення та зауваження

1. Доцільно було б розширити виведення формули Б.1, таблицю позначень та приклад покрокового розрахунку з одиницями; вказати джерело для τ_{Rd} , γ_R .
2. У роботі не представлені власні випробування CFRP-стрічок та епоксидного клею; корисно було б подати результати натурних розтягів стрічки і зсуву/відриву клеєвого шва для конкретної системи.

3. Поряд із DOE/MCE бажано у майбутніх дослідженнях навести ANOVA (дисперсійний аналіз), наприклад, у вигляді таблиці з моментом руйнування, прогином, шириною тріщин, довірчі інтервали і коефіцієнти варіації для ключових показників.
4. У подальшому розділ із калібруванням варто доповнити оцінкою похибки через дисторсію лінз, зміну освітлення та термостабільності умов; додати оцінку похибки та зіставлення DIC та тензометрії на кількох рівнях навантаження.
5. Не достатньо описано поведінку термічно-зміцненої арматури (плато текучості, відновлення) у моделях, прийнята діаграма « σ – ϵ ».
6. Було б інформативно додати кількісну класифікацію типів руйнування з відповідними критеріями. Наприклад, «тип руйнування - ознаки/критерії» з фото-прикладми.
7. Не подано оцінки повзучості/усадки, деградації клею, впливу вологи/температурних циклів на експлуатацію підсилених елементів.
8. Експериментальні балки – лабораторного масштабу; варто обговорити масштабні коефіцієнти при переході до реальних прольотів.
9. Пошкодження арматури задано еквівалентною втратою площі; доцільно у майбутньому дослідити пітингову корозію з локальними концентраторами.
10. Розрахунок не співставний з ACI 440 та іншими, наведення порівнянь підвищить загальну міжнародну валідацію дослідження.
11. Не додано вимоги до підготовки поверхні бетону, температурно-вологісного режиму твердіння клею, контролю якості.
12. Крайові відшарування часто лімітують ефект CFRP, використання U-стяжки/обгортки на опорах могло би попередити відшарування.
13. Було б зручно додати консолідований список символів перед формулами та уніфікувати позначення.
14. Не достатньо вказані джерела/методи калібрування низхідної вітки діаграми деформування, було б доцільно додати приклади ідентифікації.
15. Не достатньо широко описано порівняння з альтернативними композитами. Підвищило б якість роботи, коротко описано обґрунтованість вибору саме CFRP (на фоні GFRP/BFRP) для заданого типу пошкоджень.
16. Частину рисунків доповнити масштабними лінійками/товщиномірами та стандартними підписами для підвищення читабельності.
17. Уніфікувати формат таблиць і спосіб посилання на джерела; додати DOI там, де відсутні.
18. Для DIC-процедур додати опис калібрування камер, межі ROI, алгоритм кореляції.
19. Доречно подати номограми/графіки швидкої оцінки ефекту підсилення залежно від втрати площі арматури та анкерної довжини.

8. Висновок про науково-теоретичний рівень дисертації та відповідність вимогам

Дисертація Копійки Н.С. є завершеною науково-кваліфікаційною працею, що містить сукупність нових результатів теоретичного й експериментального характеру, спрямованих на вирішення актуальної науково-прикладної задачі – оцінювання та відновлення несучої здатності залізобетонних балок із пошкодженою арматурою засобами CFRP-підсилення. Виконано експериментальну валідацію, розвинуто розрахункові підходи та надано практичні рекомендації. За змістом, обсягом, науковою новизною, практичною цінністю та рівнем апробації дисертаційна робота відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії.

Офіційний опонент
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри Залізобетонних конструкцій
та транспортних споруд
Одеської державної академії
будівництва та архітектури



Ірина ГРИНЬОВА

ПІДПИС к.т.н., доцента Гриньової І.І.

ЗАСВІДЧУЮ: проректор з наукової роботи ОДАБА,
д.т.н., професор



Сергій КРОВЯКОВ