

Відгук
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Копійка Надії Сергіївни
на тему: «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями
робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – будівництво та цивільна інженерія, галузь знань 19- архітектура та будівництво

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Залізобетонні конструкції мають досить велику частку в загальному об'ємі конструкцій будівель і споруд. Проектування залізобетонних конструкцій передбачає розрахунок несучої здатності та деформативності.

При експлуатації залізобетонні конструкції часто зазнають пошкодження різного типу. При цьому стає питання відновлення і підсилення таких конструкцій. З давніх часів існують різні методи підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій. Відносно недавно в практику підсилення залізобетонних конструкцій впроваджують застосування композитних матеріалів, в тому числі карбонові стрічки та полотна.

Для визначення напружено-деформованого стану пошкоджених конструкцій існують також різні методи. Одним з новітніх і перспективних методів є метод цифрової кореляції зображень, який дозволяє визначати параметри напружено деформованого стану в локальному об'ємі і отримувати повне поле напружень і деформацій на всіх етапах навантаження. Застосування такого методу дозволяє підвищити точність експериментальних даних для подальшого впровадження моделі поведінки підсилених конструкцій. Це дає можливість пошуку оптимального рішення для найбільш ефективного, менш дорогого підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій.

З огляду на вищесказане, дисертаційна робота Надії Копійка, присвячена визначенню експериментальним і теоретичним шляхом несучої здатності та деформативності залізобетонних балок із різним ступенем пошкодження робочої арматури при підсиленні їх карбоновими стрічками, є актуальною.

Оцінка змісту дисертації.

У вступі наведені актуальність теми дослідження, мета, задачі, об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна, практичне значення, особистий внесок здобувачки, апробація і впровадження результатів дисертації, публікації, структура та обсяг роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в Національному університеті «Львівська

політехніка». Її результати були реалізовані в державній науково-дослідній роботі «Розробка методики визначення фактичного ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями, що знижують несучу здатність та експлуатаційну придатність» (№ державної реєстрації 0121U109498), в якій здобувачка була виконавицею.

У **першому розділі** дисертації наведено огляд досліджень методів підсилення та розрахунку згинальних залізобетонних елементів. Розглянуті основні причини і механізми зносу залізобетонних конструкцій, їх вплив на роботу і експлуатаційну придатність. Розглянуті різні методи підсилення залізобетонних елементів, в тому числі за допомогою композитних матеріалів. Показано, що попри широке використання композитних матеріалів, залишаються невирішеними питання взаємодії композитів із пошкодженим бетоном, зокрема в частині сумісної роботи та анкерування стрічок. Зроблено висновок, що відсутність уніфікованих методичних рішень створює ризики втрати ефективності підсилення та передчасного руйнування. Це вимагає подальшого комплексного аналізу, спрямованого на визначення оптимальних параметрів застосування композитів у випадках нерівномірного чи локалізованого пошкодження арматури.

Приділено особливу увагу методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) для дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, доволі детально розглянуті принципи такого дослідження з наведенням формул.

На основі наведеного аналізу літератури поставлені задачі досліджень.

В **другому розділі** наведені матеріали і методика експериментальних досліджень. Визначені пріоритетні параметри для дослідження на основі факторного аналізу, складено оптимальний план експериментальних досліджень. Розроблено програму експериментальних досліджень пошкоджених залізобетонних балок. При цьому з метою побудови оптимальної програми експериментальних досліджень і вибору основного змінного параметра використано інтегрований в Ansys Workbench застосунок Ansys DesignXplorer, робота якого ґрунтується на математичних алгоритмах параметричної оптимізації. Наведена загальна послідовність вивчення роботи конструкції з використанням цього програмного забезпечення.

Розроблено методику експериментальних досліджень бетонних призм із застосуванням методу цифрової кореляції зображень, а також методику експериментальних випробувань із застосуванням паралельних вимірювань суб-мікронними індикаторами і цифровою кореляцією зображень. Розглянуто методику побудови повної діаграми деформування бетону з низхідною гілкою з використанням методу ЦКЗ, методику експериментальних досліджень залізобетонних балок з використанням суб-мікронних індикаторів.

В розділі також розроблено методику підсилення залізобетонних балок карбоновою стрічкою з врахуванням необхідного анкерування і уникнення відшарування матеріалу підсилення. Розглянуті матеріали і конструкція дослідних зразків, а також методика підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками. Нажаль не представлені фізико-механічні характеристики матеріалів.

Третій розділ присвячено результатам експериментальних досліджень. Побудовані повні діаграми «напруження-деформації» бетону, отримані за методом ЦКЗ і порівняні з замірами мікроіндикаторів. Показано, що різниця між значеннями деформацій, заміряними двома методами, більша на початкових етапах деформування і мала на експлуатаційних етапах, **що дає можливість** використовувати метод цифрової кореляції зображень на практиці.

Розглянуто несучу здатність і деформативність непошкоджених залізобетонних балок, отримані графіки «момент-відносні деформації стиснутого бетону» цих балок, отриманих вимірюванням деформації індикаторами та за методом ЦКЗ. Аналогічний аналіз проведено для зразків з пошкодженнями.

Показано, що після досягнення межі текучості арматури спостерігалось інтенсивне зростання деформацій у найбільш стиснутих волокнах бетону, що зрештою призводило до руйнування стисненої зони, показана ефективність підсилення карбоновими стрічками. При цьому при руйнуванні зразків не було зафіксовано ознак відшарування композитної стрічки, **що свідчить про ефективність запропонованого способу** анкерування та забезпечення сумісної роботи елементів підсилення і бетону протягом усього навантаження. Однак зроблено висновок, що при цьому, «...оскільки підсилення композитними матеріалами було застосоване в зоні розтягу, то це свідчить, що збільшення несучої здатності було досягнуто за рахунок збільшення площі стиснутої зони балок внаслідок зміщення нейтральної осі і перерозподілу напружень».

Показано, що застосування композитної стрічки дозволяє повністю відновити несучу здатність при пошкодженнях робочої арматури, значно зменшує деформативність залізобетонних балок, підсилених карбоновими стрічками. При цьому зроблено **важливий висновок**, що згинальний момент, при якому було досягнуто граничний прогин збільшився вдвічі для деяких зразків.

На основі експериментальних даних зроблено також важливий висновок, що для всіх експериментальних результатів відхилення в межах однієї серії і відхилення між даними, заміряними цифровою кореляцією зображень і суб-мікронними індикаторами не перевищували 5-7%, **що є важливим висновком**, який підтверджує можливість використання методу цифрової кореляції зображень в практиці обстеження і проєктування.

Найбільш цікавим і корисним, на мою думку є саме аналіз результатів експерименту, проведених саме методом ЦКЗ, що в черговий раз доводить практичну цінність такого методу і дисертації в цілому.

В четвертому розділі дисертації розглянута методика розрахунку несучої здатності залізобетонних балок. Всі розрахунки ґрунтуються на методиці, прийнятої в нормативних документах ДБН В.2.6-98:2009 та ДСТУ БВ.2.6 156:2010. Наведені пояснення алгоритму розрахунку з застосуванням деформаційної моделі з врахуванням нелінійної діаграми деформування для бетону « σ_c - ϵ_c » і дволінійної діаграми деформування для арматури « σ_s - ϵ_s ». Наведені гіпотези, що приймаються в цих розрахунках. Однак, не ясно, для чого наводити широко відомі дані, прийняті в нормативних документах і так докладно розписувати відому методику з наведенням всіх формул, рисунків зі схемами форм рівноваги. Краще було б просто сказати, що розрахунок проведено за методикою норм і зосередитися на аналізі даних розрахунку і висвітленням пропозицій, яким чином враховується наявність композитної арматури.

Розрахунки ґрунтуються на використанні полінома п'ятого ступеня для діаграми стиску бетону, що наведений в ДБН та ДСТУ. Нажаль не використаний вираз для діаграми бетону, наведений у Eurocode 2, який дозволяється використовувати і в ДБН В.2.698:2009.

Наведені дані про розрахунок прогинів і ширини розкриття тріщин, які також ґрунтуються на нормативній методиці ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Тут також слід відмітити про зайвість докладного наведення відомої методиці нормативного документу.

В розділі наведено аналіз результатів розрахунку несучої здатності та деформативності. Показані графіки порівняння даних розрахунку з експериментальними результатами. Показано, що результати розрахунку і експерименту доволі близько узгоджуються.

Проведено **цікавий аналіз** впливу підсилення карбоновою стрічкою на процеси тріщиноутворення. Показано, що в зразках, які виконувалися з отвором в розтягнутому бетоні, цей отвір спричинив появу концентраторів напружень в зоні максимального згинального моменту, що в свою чергу призвело до нетипового характеру тріщиноутворення, але в дисертації не досліджувалося. Наведені дані порівняння ширини розкриття тріщин з даними розрахунку за ДСТУ.

В розділі також показано, що використання методу ЦКЗ дозволило проаналізувати процеси утворення і розвитку тріщин. Показані цікаві фото типового розподілу деформацій на бетонній поверхні зразків на етапі навантаження, що відповідав формуванню перших волосяних тріщин, отриманих методом ЦКЗ. Показано, що тріщину можна розглядати як певний розрив або порушення суцільності матеріалу, при цьому тріщини виступають концентраторами напружень, які в її вершині можуть

розвинулись до критично високих значень. Показано, що метод ЦКЗ дозволяє контролювати та реєструвати розподіл деформацій на рівні навантаження, що відповідає руйнуванню балки та максимальному розкриттю тріщини.

В загальних висновках по роботі показано яку задачу вирішено в дисертації. Вони відображають отримані у процесі дослідження результати, підтверджують рішення поставлених задач.

У **додатках** наведені: визначення пріоритетних факторів для дослідження планування програми досліджень в комплексі Ansys Design Xplorer; визначення величини необхідного анкерного закріплення композитної стрічки; особливості фізико-механічних характеристик термічно-зміцненої арматури; оцінка достовірності експериментальних даних серії зразків; побудова регресійної моделі міцнісних характеристик термічно зміцненої арматури; фотофіксація характеру руйнування залізобетонних балок; список публікацій здобувачки; відомості про апробацію дисертаційного дослідження; довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні нових експериментальних даних щодо несучої здатності та деформативності залізобетонних балок, підсилених карбоновими стрічками за різних ступенів пошкодження робочої арматури із застосуванням методу цифрової кореляції зображень; у встановленні ефективності підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками в залежності від втрати ефективної площі арматури із врахуванням особливості роботи термічно-зміцненої арматури, що до цього часу не було предметом комплексного аналізу; в оптимізації параметрів кореляційного спеклу при використанні методу цифрової кореляції зображень та у випробуванні різних підходів до підготовки поверхні — із використанням як безпосереднього нанесення спеклу, так і штучних маркерів.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в доведенні можливості застосування методу цифрової кореляції зображень для оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій як непошкоджених, так і пошкоджених та підсилених, **що є важливим** досягненням дисертації.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи забезпечується використанням апробованих програмних комплексів, апробованих методів лабораторних досліджень, співставленням отриманих експериментальних даних з розрахунками за апробованими нормативними методами.

Основні наукові положення і висновки дисертаційної роботи апробовані і пройшли обговорення на багатьох всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях (2019-2025 рр.).

Повнота викладу матеріалів роботи в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 25 наукових

працях, у тому числі 8 статтях у фахових виданнях України, 14 статтях у виданнях, що індексуються в Scopus і WOS, трьох друкованих тезах за матеріалами наукових конференцій.

Аналіз публікацій Копійка Н.С. свідчить, що вони всебічно і достатньо повно висвітлюють наукові положення, висновки та рекомендації, які знайшли своє відображення у дисертації.

Дисертація Копійка Надії Сергіївни викладена на достатньому науково-технічному рівні і оформлена у відповідності з вимогами щодо структури і правил оформлення документації у сфері науки і техніки.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 192 - будівництво та цивільна інженерія, галузі знань 19 – архітектура та будівництво

Зауваження.

1. Нажаль в другому розділі не представлені фізико-механічні характеристики матеріалів, що дало б можливість аналізувати і використовувати дані експерименту іншими дослідниками.

2. В третьому розділі зроблено висновок (с. 133) «...оскільки підсилення композитними матеріалами було застосоване в зоні розтягу, то це свідчить, що збільшення несучої здатності було досягнуто за рахунок збільшення площі стиснутої зони балок внаслідок зміщення нейтральної осі і перерозподілу напружень». Відомо, що несуча здатність залежить від розрахункового опору арматури і бетону, площі арматури, ширини поперечного перерізу. Тому не ясно, для чого говорити тільки про один з цих параметрів?

3. Не ясно, для чого в четвертому розділі наводити широко відомі дані, прийняті в нормативних документах, і так докладно розписувати відому методику розрахунку несучої здатності з наведенням всіх формул, рисунків зі схемами форм рівноваги? Наведені дані про розрахунок прогинів і ширини розкриття тріщин, які ґрунтуються на нормативній методиці ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Тут також слід відмітити про зайвість наведення відомої методики нормативного документу. Краще було б просто сказати, що розрахунок проведено за методикою норм і зосередитися на аналізі даних розрахунку і висвітленням пропозицій, яким чином враховується наявність композитної арматури.

4. В четвертому розділі нажалі не використаний вираз для діаграми бетону, наведений у Eurocode 2, який дозволяється використовувати і в ДБН В.2.698:2009. Використання цієї формули могло б дати порівняння визначення несучої здатності для елементів, підсилених карбоновою стрічкою, що збагатило б дисертацію.

Загальна оцінка дисертаційної роботи та висновок щодо відповідності дисертації вимогам Міністерства освіти і науки України.

Зроблені зауваження не знижують значення дисертаційної роботи та можуть бути враховані при проведенні подальших наукових досліджень.

Найбільшим досягненням дисертації окрім іншого є факт, що на основі експериментальних даних доведено, що метод цифрової кореляції

зображень можна використовувати на практиці для дослідження напружено-деформованого стану як непошкоджених, так і пошкоджених та підсилених (в тому числі карбоновими стрічками) залізобетонних елементів, що є важливим для будівельної науки.

Вважаю, що кваліфікаційна наукова праця «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія є завершеною і самостійно виконаною працею, містить науково обґрунтовані теоретичні і практичні результати та відповідає вимогам пп.5-9 «Порядку присудження ступеню доктора філософії...», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а її автор Копійка Надія Сергіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Офіційний опонент, завідувач кафедри
техніко-технологічних дисциплін,
охорони праці та безпеки життєдіяльності
Уманського державного педагогічного
університету імені Павла Тичини,
доктор технічних наук (05.23.01), професор



Талят АЗІЗОВ

Підпис. професора Т.Н. Азізова засвідчую:



ОСОБИСТИЙ ПІДПИС	
Талят Азізов	ЗАСВІДЧУЮ
Завідувач канцелярії	УДПУ
С.В.Роботко	НС
" 20 "	01 2023 р.