

Голові разової спеціалізованої вченої ради 9784
Національного університету "Львівська політехніка"
д.т.н., проф. Хмілю Роману Євгеновичу

В І Д Г У К

офіційного опонента кандидата технічних наук, доцента,
Андрійчука Олександра Валентиновича на дисертаційну роботу

Клима Андрія Богдановича

на тему: **«Несуча здатність залізобетонних елементів, відновлених
композитними матеріалами»**,

що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Актуальність теми дисертації. У сучасному будівництві з усіх існуючих будівельних матеріалів найчастіше для зведення будівель і споруд застосовують бетон, на основі якого виготовляють залізобетонні конструкції. У значному переліку розповсюджених залізобетонних конструкцій одними з найбільш масових є згинальні несучі елементи будівель і споруд, що застосовуються у вигляді балок, плит перекриття, ригелів каркасів, прогонів.

Необхідно зазначити, що велика кількість будівель і споруд експлуатується протягом десятиліть, часто без підбору якісного складу бетону та наявності антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій. Як наслідок, відбувається механічне пошкодження бетону залізобетонних конструкцій, а після руйнації захисного шару бетону відбувається корозія арматури. Це викликає втрату несучої здатності та експлуатаційної придатності залізобетонних конструкцій.

В результаті воєнних дій значна частина цивільних і промислових об'єктів України зазнала пошкоджень різного ступеня, зокрема внаслідок вибухових хвиль, ударних динамічних навантажень, локальних пошкоджень і пожеж. Особливу небезпеку експлуатації становить руйнування стиснутої зони у залізобетонних балках, які є одними з ключових елементів несучих конструктивних елементів будівель. Такі пошкодження спричиняють втрату цілісності перерізів із зменшення жорсткості.

На сьогоднішній день відновлення пошкодженої стиснутої зони бетону в залізобетонних балках є актуальним питанням, яке потребує нових підходів і технологічних рішень. Одним із ефективних підходів до вирішення цієї проблеми є відновлення пошкодженої стиснутої зони бетону шляхом видалення пошкодженої ділянки та заповнення утвореного простору високоміцним ремонтним розчином. Такий підхід дозволяє не лише відновити первинні експлуатаційні характеристики конструкції та несучу здатність, але й підвищити її стійкість до агресивного середовища та інших впливів.

Таким чином, **актуальність** теми дослідження обумовлена необхідністю встановлення дійсного напружено-деформованого стану та несучої здатності відновлених залізобетонних балок при впровадженні методів відновлення згинальних залізобетонних елементів, що забезпечують їхню надійність і довговічність в умовах сучасного будівництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи та отримані в ній результати відповідають науковому напрямку кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Дисертацію виконано в межах науково-дослідної роботи Національного Фонду досліджень України 2023.05/0026 «Інноваційні комплексні підходи для відновлення транспортних споруд» (номер державної реєстрації 0124U003830).

Коротка характеристика змісту дисертації. Дисертаційна робота має класичну структуру: вона складається з анотації, вступу, чотирьох розділів,

висновків до розділів, загальних висновків до дисертаційної роботи, списку використаних літературних джерел та додатків А-Г.

Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 202 сторінки друкованого тексту, основний її зміст викладено на 145 сторінках, у ній присутні: 11 таблиць, 108 рисунків, перелік із 221 найменування використаних літературних джерел на 23 сторінках і чотирьох додатків на 13 сторінках.

Дисертація написана українською мовою, її структура та оформлення відповідають установленим вимогам. Вона характеризується єдністю змісту.

У *вступі* представлено обґрунтування вибору теми дослідження та його актуальність, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи, її апробацію і впровадження результатів досліджень, представлена загальна характеристика дисертаційної роботи та зв'язок з науковими програмами.

У *першому розділі* дисертації здійснено огляд існуючих наукових досліджень розрахунку та стану надійності експлуатації залізобетонних конструкцій із врахуванням їх пошкоджень та дефектів. Акцентовано увагу на пошкодженнях бетону в стиснутій зоні згинальних залізобетонних елементів і впливу тріщин у ньому на корозію арматури.

Дисертантом здійснено аналіз літературних джерел, що вказує на наявність великої кількості технологічних і ефективних методик із підсилення та відновлення частин конструкцій за допомогою композитних матеріалів, які мають ряд переваг на традиційними методами підсилення. А також на те, що на даний час недостатньо досліджено несучу здатність залізобетонних балок із відновленням стиснутої зони бетону та не досліджено повністю їх напружено-деформований стан після відновлення, тому обраний в дисертації напрямок досліджень є **актуальним**. На підставі цього в роботі сформовано мету та задачі досліджень.

У *другому розділі* дисертації представлено методику проведених експериментальних досліджень та відновлення залізобетонних балок. Для

виконання експерименту було досліджено 16 залізобетонних балок розмірами $2100 \times 200 \times 100$ мм. Дослідження з відновлення стиснутої зони бетону було проведено на експериментальних залізобетонних балках, які були доведені до руйнування за стиснутою зоною бетону раніше проведеного дослідження. Для відновлення зруйнованої стиснутої зони бетону було використано відновлювальний вискоєфективний ремонтний розчин Sika MonoTop-4012.

Запропоновано методику відновлення стиснутої зони бетону залізобетонних балок, яка полягає у розвантаженні конструкції та вирівнювання в горизонтальне положення зразків перед виконанням процесу відновлення.

Випробування дослідних зразків проводилися за схемою однопролітної балки на двох опорах із завантаженням двома зосередженими силами в третинах прольоту балки з утворенням зони «чистого згину» посередині балки.

Представлено комплексну методику випробування бетону та арматури, для визначення та фіксації деформацій в них із використанням методу цифрової кореляції зображення у поєднанні із суб-мікронними індикаторами.

Третій розділ дисертації присвячений опису отриманих результатів експериментальних випробувань залізобетонних балок, які пройшли процес відновлення стиснутої зони бетону та дефектів, за наявності пошкодженої термічно-зміцненої арматури.

Встановлено, що фізичне руйнування залізобетонних балок відбувалося внаслідок досягнення граничних значень у найбільш стиснуті фібри та роздроблення стиснутої зони ремонтного розчину, окрім 4-ї та 5-ї серії зразків відповідно із сточеною арматурою до діаметра $\varnothing 12$ і $\varnothing 14$ мм із діаметра $\varnothing 20$ мм, в яких фізичне руйнування відбувалося за арматурою (розрив стержня) досягнувши граничних значень ϵ_{ud} .

Відновлення стиснутої зони та ремонт дефектів зруйнованих залізобетонних балок показав позитивний результат за несучою здатністю за

моментом настання межі текучості робочої арматури відносно результатів попереднього випробовування цих же зразків, а саме: для 3-ї і 6-ї серії на 11 %; для 4-ї, 5-ї і 8-ї серії зразків на 15 %; для балок 7-ї серії на 24 %; для зразків 6-ї і 8-ї серії на 22 %. Залізобетонні балки 2-ї серії, які були не розвантажені перед відновлення стиснутої зони, прийняті як не ефективні без процесу розвантаження, оскільки момент настання межі текучості робочої арматури є меншим на 45 % від контрольних зразків 1-ї серії.

Представлено результати аналізу, отримано комплексну інформацію про поведінку бетону (ремонтного розчину) та арматури в будь-який момент часу навантаження зразків за допомогою методу цифрової кореляції зображення.

У *четвертому розділі* на основі чинних норм розрахунку за деформаційною моделлю ДСТУ Б В.2.6-156:2010 та ДБН В.2.6-98:2009 розраховано теоретичні значення несучої здатності залізобетонних згинальних елементів із відновленням стиснутої зони бетону сучасними ремонтними розчинами.

У межах дослідження здійснено комплексний аналіз напружено-деформованого стану для усіх згинальних залізобетонних елементів після відновлення стиснутої зони бетону за допомогою ремонтного розчину. Вивчено розподіл і розвиток деформацій у критичних зонах перерізу на всіх етапах навантаження з урахуванням реального технічного стану арматури й ремонтного розчину. Встановлено, що після проведення відновлювальних заходів, напружено-деформований стан конструкцій зберігає структурну рівновагу без ознак локальної нестабільності чи критичних відхилень у роботі.

Запропоновано підхід до визначення залишкових деформацій термічно-зміцненої арматури після досягнення нею межі текучості в залізобетонних згинальних елементах із подальшим повторним навантаженням. Встановлено, що діаграма «напруження-деформація» при повторному навантаженні зміщується вздовж осі деформацій, зберігаючи

лінійно-пружну поведінку в межах нового діапазону досягнення текучості, що обумовлено залишковими деформаціями та накопиченням залишкових напружень. У ході дослідження методом цифрової кореляції зображень уперше зафіксовано зростання межі текучості арматури на 10-20% при повторному навантаженні, що пояснюється ефектом дислокаційного зміцнення та реорганізацією внутрішньої структури сталі.

Отримані результати дозволяють уточнити параметри деформаційної моделі роботи арматури при складному циклічному навантаженні та враховувати накопичений ефект зміцнення (внаслідок наклепу металу) у розрахунках несучої здатності конструкцій після відновлення.

Результати, отримані в даній науково-дослідній роботі, впроваджені в практику проектування та експлуатації будівель, а також використовуються в навчальному процесі в Національному університеті «Львівська політехніка».

За результатами дослідження несучої здатності та дійсного напружено-деформованого стану згинальних залізобетонних елементів, які пройшли процес відновлення стиснутої зони бетону та ремонту дефектів композитними матеріалами після руйнування сформульовано **загальні висновки** до роботи.

Наукова новизна отриманих результатів повністю обґрунтована результатами експериментальних і теоретичних досліджень, що представлені автором у роботі та полягає в наступному:

- вдосконалено методику аналізу та розрахунку напружено-деформованого стану зруйнованих залізобетонних балок із відновленням стиснутої зони бетону з застосуванням методу цифрової кореляції зображень і встановленням контрольних точок нульових деформацій впродовж випробування;

- розроблено метод відновлення зруйнованих залізобетонних балок за крихким руйнуванням стиснутої зони бетону з заміною на однокомпонентний цементний розчин з низькою усадкою армований фіброю, а також запропоновані методи ремонту дефектів композитними матеріалами на основі епоксидної смоли;

- отримано нові експериментальні результати дослідження несучої здатності залізобетонних балок, відновлених у стиснутій зоні ремонтним розчином, із підтвердженням можливості відновлення несучої здатності до початкових експлуатаційних показників;

- отримано експериментальні результати, які свідчать про зміщення діаграми «напруження-деформація» арматури при повторному навантаженні залізобетонних балок, внаслідок наявності залишкових пластичних деформацій, а також встановлено підвищення межі текучості в результаті дислокаційного зміцнення структури сталі, зумовленого ефектом наклепу;

- вдосконалено метод розрахунку відновлених після руйнування стиснутої зони бетону залізобетонних балок, який враховує наявність залишкових деформацій та зміну межі текучості арматури балок.

Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи є незаперечною і вона полягає у розроблені та впровадженні ефективного методу відновлення несучої здатності залізобетонних балок, які зазнали пошкоджень або цілковитого руйнування у стиснутій зоні. Використання ремонтного розчину та композитних матеріалів на основі епоксидної смоли дозволяє підвищити довговічність і надійність відновлених конструкцій. Це забезпечує економічно вигідне та екологічно доцільне рішення для продовження експлуатаційного ресурсу існуючих будівель і споруд без необхідності повного демонтажу та нового будівництва. Результати досліджень можуть бути застосовані в практиці проєктування та виконання ремонтних робіт, що дозволить скоротити терміни виконання робіт, зменшити витрати на матеріали та реалізацію процесу відновлення та підвищити тривалість експлуатації наявних житлових і промислових об'єктів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи. Результати, отримані в дисертаційній роботі за участю автора використані при розробленні рішень щодо відновлення та підсилення будівель проєктно-інжиніринговою компанією ТОВ «Сіменерго» та ТОВ «Інститут проєктування «Комфортбуд».

Матеріали даних досліджень є складовою гранту Національного Фонду досліджень України 2023.05/0026 «Інноваційні комплексні підходи для відновлення транспортних споруд» (номер державної реєстрації 0124U003830) та використовуються у навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка». Підтвердженням цього є довідки та акти впроваджень, надані в додатках до дисертаційної роботи.

Апробація представлених у дисертаційній роботі результатів є достатньою. Основні положення дисертації викладені у 9 друкованих наукових працях, 5 із яких – в фахових збірниках наукових праць, 3 – у наукових періодичних виданнях іноземних держав, які включено до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, 1 – в тезах наукових конференцій.

Основні положення дисертації «Несуча здатність залізобетонних елементів, відновлених композитними матеріалами» доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях:

- „18th International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów” (м. Жешув, Польща, 2023 р.);
- 18th International Conference Quality Production Improvement - QPI 2024 (м. Янов, Польща, 2024 р.);
- International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation (MistoBud-2025)» (м. Харків, 2025 р.);
- IV-й Міжнародній науковій конференції «ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві» (м. Львів, 2024 р.);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (м. Одеса, 2024 р.);
- 11-й Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2024 р.);
- на наукових семінарах кафедри «Автомобільні дороги та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2021 - 2025 рр.).

Достовірність результатів наукових досліджень у дисертаційній роботі забезпечується використанням стандартних методів досліджень залізобетонних конструкцій із використанням сучасного обладнання та комп'ютерного програмного забезпечення, задовільною збіжністю експериментальних і теоретичних результатів, задовільною збіжністю отриманих даних за методом цифрової кореляції зображень і суб-мікронними індикаторами, а також із застосуванням методів математичної статистики.

За змістом дисертаційної роботи можна зробити наступні зауваження:

1. Під час дослідження фізико-механічних властивостей бетонної суміші та встановлення її класу – варто було визначити циліндричну міцності бетону (рис. 2.2).

2. Під час вибору ремонтного розчину Sika MonoTop-4012 (с. 65) варто було порівняти його фізико-механічні характеристики (табл. 2.3) із аналогами – розчинами інших виробників, щоб аргументувати вибір саме цього розчину, як найбільш ефективного.

3. Доцільно було б порівняти ефективність ремонтного розчину Sika MonoTop-4012 з іншими технологічними рішеннями (ремонтними складами), наприклад – із сухими сумішами на полімерній основі або з дисперсно армованими бетонами (сталефібробетоном).

4. Не оцінено, як зміна окремих параметрів (міцність розчину, глибина дефектів, порушення структури бетону, геометрія вирізаної стиснутої зони бетону) впливає на загальні результати підсилення та ремонту балок.

5. Незважаючи на те, що дисертаційна робота обмежується статичними навантаженнями, важливо оцінити потенційний вплив короткочасних імпульсних навантажень на відновлені залізобетонні балки.

6. Під час проведення наукового дослідження варто було застосувати метод скінченних елементів (*«ПК Ліра» або інші відповідні комп'ютерні програми*) для комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану дослідних балок.

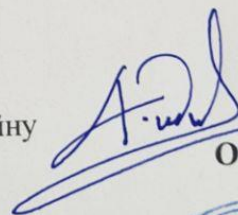
Наведені зауваження не знижують теоретичного та практичного значення дисертаційної роботи і можуть бути враховані в подальших дослідженнях. Вони не можуть впливати на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Дисертація **Клима Андрія Богдановича** є завершеною працею, в якій теоретично та експериментально досліджено несучу здатність залізобетонних елементів, відновлених композитними матеріалами.

Вважаю, що за актуальністю, науковою новизною, обсягом проведених експериментальних досліджень, їхньою науковою та практичною значимістю дисертаційна робота **Клима Андрія Богдановича** на тему: «**Несуча здатність залізобетонних елементів, відновлених композитними матеріалами**», відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів №261 від 23 березня 2016 року (зі змінами і доповненнями згідно з Постановою Кабінету Міністрів №283 від 03 квітня 2019 року), Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами і доповненнями згідно з Постановою КМУ №341 від 21 березня 2022 року), а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Офіційний опонент

Кандидат технічних наук, доцент,
декан факультету архітектури, будівництва та дизайну
Луцького національного технічного університету



О.В. Андрійчук

ВІРНО:
Начальник відділу
"15" липня



В.О. Нагайченко В.К.

О.А. Лаврун

