

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства та природокористування

**ЗЯТЮК ЮРІЙ ЮРІЙОВИЧ**



УДК 624.012.25

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТА РОЗРАХУНОК  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПІДСИЛЕНИХ В  
СТИСНУТІЙ ТА РОЗТЯГНУТІЙ ЗОНАХ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Рівне - 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Борисюк Олександр Павлович**,  
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Бліхарський Зіновій Ярославович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
директор інституту будівництва та інженерії довкілля

кандидат технічних наук, доцент  
**Задорожнікова Ірина Вікторівна**,  
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк,  
доцент кафедри промислового і цивільного будівництва

Захист відбудеться « 4» липня 2019 р. об 11 год. 00хв., на засіданні спеціалізованої вченої ради К 47.104.06 у Національному університеті водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Чорновола, 49, навч. корпус № 6, ауд. 673.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Олекси Новака, 75, навч. корпус № 2 або на сайті університету [www.nuwm.edu.ua](http://www.nuwm.edu.ua)

Автореферат розісланий « 30» травня 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
К 47.104.06,  
канд. техн. наук, доцент



О.М. Бордюженко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Будівництво є одним із основних чинників, що визначають економічний розвиток держави. Впровадження нових технологій та матеріалів при підсиленні і відновленні залізобетонних конструкцій, дозволяє вирішувати важливі питання будівельної галузі.

Промислове та цивільне будівництво характеризується широким використанням залізобетонних конструкцій, які є одним з основних несучих елементів будівель і споруд. Залізобетонні згинальні елементи (балки, плити, ферми, та ін.) широко використовувалися серед будівельних конструкцій у минулому. На сьогодні є актуальним питання підвищення надійності та довговічності будівель і споруд. В процесі експлуатації конструкцій, будівель і споруд, виникає потреба у підсиленні несучих елементів, через закінчення терміну проектної експлуатації, зміни розрахункової схеми конструктивних елементів при реконструкції, при пошкодженні і експлуатації в непридатному до експлуатації або аварійному стані, збільшенні експлуатаційних навантажень, помилки при проектуванні, будівництві та використанні неякісних матеріалів.

Ефективним методом підсилення залізобетонних елементів є використання високоміцних матеріалів як сталевібробетон. Підсилення конструкцій за допомогою композитних стрічок на основі вуглецевих волокон - універсальний метод. Воно ефективне у підсиленні бетону, дерева, металу, камяних та ін конструкцій. Підсилення залізобетонних балкових конструкцій достатньо глибоко вивчене.

Не достатньо досліджено на сьогодні одночасне підсилення стиснутої та розтягнутої зон. Тому подальше дослідження залізобетонних елементів, підсилені сучасними та високоефективними матеріалами, а саме: сталевібробетону та композитних матеріалів на основі вуглецевих волокон, мають важливе теоретичне і практичне значення.

У зв'язку з вищенаведеним, вирішення проблем підсилення залізобетонних конструкцій є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування відповідно до тематики комплексних тем: «Розробити нові та удосконалити існуючі методи розрахунку будівельних конструкцій, включаючи підсилені, при дії одноразових та повторних навантажень» (державний реєстраційний номер 0112U001122); «Дослідження роботи та удосконалення методів розрахунків будівельних конструкцій при різних режимах зовнішніх впливів» (державний реєстраційний номер 0107U004181).

**Мета роботи:** встановити напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів, підсилені одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні з урахуванням повторних навантажень, та удосконалити наявну методику їх розрахунку на основі чинних відчизняних та європейських норм проектування.

### **Задачі досліджень:**

-провести аналіз літературних джерел щодо існуючих експериментальних та теоретичних досліджень підсилені залізобетонних елементів різними способами;

- розробити програму та методику експериментальних досліджень залізобетонних балок при однократних та повторних малоциклових навантаженнях до підсилення та після підсилення під навантаженням;

- виконати експериментальні дослідження міцності, деформативності та тріщиностійкості нормальних перерізів залізобетонних балок при однократних та повторних малоциклових навантаженнях до та після підсилення;

- встановити вплив підсилення стиснутої і розтягнутої зони залізобетонних балок на напружено-деформований стан поперечних перерізів, тріщиностійкість та прогини залізобетонних балок із врахуванням впливу повторних навантажень;

- удосконалити методику розрахунку залізобетонних балок підсилених одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні. за дії на них однократних та повторних малоциклових навантажень.

**Об'єкт дослідження** – проектування підсилених залізобетонних згинальних елементів.

**Предмет дослідження** : несуча здатність, напружено-деформований стан, жорсткість та тріщиностійкість залізобетонних балок, підсилених сталевібробетоном ат дрібнозернистим бетоном у стиснутій та вуглепластиковими матеріалами в розтягнутій зоні.

**Методи дослідження:**

- аналітичні дослідження існуючих даних про роботу підсилених залізобетонних елементів, на основі аналізу науково-технічної літератури, проведення теоретичних досліджень;

- експериментальні випробування підсилених балок композитними матеріалами на основі вуглепластиків в розтягнутій зоні, дрібнозернистим бетоном та сталевібробетоном в стиснутій зоні за дії одноразових та повторних навантажень;

- порівняння експериментальних та теоретичних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше отримано експериментальні дані міцності, жорсткості та тріщиностійкості залізобетонних балок, підсилених одночасно у стиснутій зоні сталевібробетоном і дрібнозернистим бетоном та композитними матеріалами у розтягнутій зоні при дії повторних малоциклових навантажень різних рівнів;

- встановлено зміну напружено-деформованого стану, прогинів та ширини розкриття тріщин в залізобетонних балках до підсилення та після підсилення під навантаженням внаслідок дії повторних навантажень;

- встановлено вплив дії малоциклових повторних навантажень різних рівнів на подальшу роботу залізобетонних балок підсилених одночасно у стиснутій зоні сталевібробетоном та дрібнозернистим бетоном, та композитними матеріалами у розтягнутій зоні, побудовані діаграми зміни максимальних відносних деформації та повних прогинів балок за різних режимів роботи;

- удосконалено та апробовано методику розрахунку несучої здатності згинальних залізобетонних елементів, підсилених одночасно у стиснутій зоні сталевібробетону і розтягнутій зоні композитними матеріалами, за дії на них повторних навантажень, з використанням деформаційної моделі.

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Достовірність результатів експериментальних досліджень

обґрунтовується ретельно розробленою методикою та застосуванням сучасних приладів і устаткування, використанням апробованих положень розрахунку та задовільною збіжністю теоретичних і експериментальних даних.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропонована методика забезпечує отримання достовірних даних про напружено-деформований стан та особливості роботи підсилених згинальних залізобетонних елементів. Отримані експериментально-теоретичні дані можуть бути використані в проектній практиці для розрахунку підсилення згинальних залізобетонних елементів, а також в навчальному процесі.

Результати дисертаційної роботи використані при проектуванні реконструкції загальноосвітньої школи I-III ступенів по вулиці Центральній, 102 в с.Корнин Рівненського району, Рівненської області. Зокрема, була визначена несуча здатність конструктивних елементів будівлі з врахуванням впливу повторних малоциклових навантажень. Результати проведених експериментальних досліджень також було використано при реконструкції Великожитинської ЗОШ I-III ступенів по вулиці Рівненській, 1б, в с.Великий Житин Рівненського району, Рівненської області. Зокрема визначена несуча здатність залізобетонних балок за допомогою деформаційної моделі.

Окремі положення дисертаційної роботи включені в програму спецкурсу «Діагностика, паспортизація та відновлення будівель та споруд», що викладається студентам за освітньо-професійною програмою «Промислове та цивільне будівництво» в НУВГП.

**Особистий внесок здобувача** полягає у власному виконанні експериментальних досліджень, обробці одержаних даних, впровадженні результатів досліджень на практиці та розробці методики розрахунку.

- удосконалена та апробована методика розрахунку несучої здатності згинальних залізобетонних елементів, підсилених одночасно у стиснутій зоні сталевібробетоном та дрібнозернистим бетоном, та в розтягнутій зоні композитними матеріалами, за дії на них повторних малоциклових навантажень, з використанням деформаційної моделі

- проведенні експериментальні дослідження міцності, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних балок при дії однократних та повторних малоциклових навантажень до підсилення та після підсилення їх під навантаженням;

- встановлено особливості роботи залізобетонних балок підсилених у стиснутій і розтягнутій зонах за дії повторних малоциклових навантажень, виконано порівняльний аналіз експериментальних та теоретичних даних напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних балок;

- розроблені розрахункові схеми напружено-деформованого стану нормальних перерізів підсилених залізобетонних балок.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Результати отриманих досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях: Науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (м. Київ, 2-3 червня 2016 р.); 12-міжнародній науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування,

будівництво, експлуатація» (м. Полтава 18-20 жовтня 2016 р.); II Міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих вчених та студентів «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, 20-22 жовтня 2016 р.); Дев'ятій міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 16-18 жовтня 2018 р.) та на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів та студентів НУВГП (м. Рівне, 2013...2018 р.р.).

**Публікації.** Результати отриманих досліджень опубліковані у 9-и наукових працях, серед них 7 наукових публікації у фахових виданнях, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави. Три статті опубліковано одноосібно.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації викладено на 208 сторінках, з яких 130 сторінок основного тексту, 80 рисунків та 34 таблиці, список використаних джерел із 196 найменувань на 24 сторінках, додатки на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, викладено мету та задачі досліджень, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, вказано на необхідність експериментальних і теоретичних досліджень напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, підсилених в стиснутій і розтягнутій зонах, наведено загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз вітчизняних і закордонних досліджень, присвячених питанням підсилення залізобетонних конструкцій. Розглянуто різні способи підсилення залізобетонних конструкцій будівель та споруд і методики їх розрахунку. Існує велика кількість різних способів відновлення несучої здатності залізобетонних конструкцій, кожен з яких має як свої переваги, так і недоліки.

Дослідженню підсилення згинальних залізобетонних елементів свої роботи присвятили: Б. А. Ашимов, А. Б. Барашиков, Є. М. Блалі, З. Я. Бліхарський, О. П. Борисюк, Б. А. Боярчук, О. І. Валовой, І. О. Валовой, А. П. Васільєв, О. В. Войцехівський, Є. О. Гриневич, С. С. Давидов, В. С. Довбенко, І. В. Задорожнікова, А. Касасбех, В. Г. Кваша, О. П. Конончук, М. І. Кісілієр, М. Д. Климпуш, О. П. Кричевський, С. О. Кричевський, А. И. Мальганов, І. В. Мельник, С. В. Мельник, Л. А. Мурашко, А. Я. Мурин, С. М. Новікова, Ф. Н. Рабінович, Я. В. Римар, А. К. Салех, М. Ю. Смолянінов, С. Д. Семенюк, О. П. Сунак, П. О. Сунак, Г. К. Хайдуков, О. Л. Шагін та інші.

В національних нормативних документах відсутня методика чи алгоритм, за допомогою якої можна було б розрахувати підсилені одночасно сталевібробетоном в стиснутій та композитними матеріалами на основі вуглецевих волокон в розтягнутій зонах залізобетонні згинальні елементи.

У **другому розділі** наведено програму, обсяг і методику виконання експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні при дії малоциклових повторних навантажень.

Було виготовлено дванадцять дослідних залізобетонних балок з розмірами 100×200×2000 мм, бетон класу С16/20. Поздовжня робоча стержнева арматура 2Ø10 А 500С та поперечна арматура Ø6 А240С з кроком 50 мм, крім зони чистого згину. Верхня монтажна арматура із дроту Ø4 Вр-І). Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів було сформовано контрольні куби та призми з ребрами 10 і 15 см, також відібрано зразки арматури.

Система з вуглепластиків для підсилення розтягнутої зони залізобетонних балок представлена двома видами арматурних виробів: вуглепластикові стрічки Sika® CarboDur® S-512 шириною 25 мм для підсилення балочних конструкцій в зоні дії згинаючого моменту та однонаправленим вуглецевим полотном SikaWrap®-230 С/45. Приклеювання відбувалось за допомогою двохкомпонентних клеїв: для стрічки Sikadur-30, а для полотна – Sikadur-330.

Для підсилення стиснутої зони залізобетонних балок використовували дрібнозернистий бетон класу С16/20 та 3% дротяної фібри довжиною 50 мм, товщина шару склала 50 мм. Бетонна матриця для всіх зразків виготовлялась із одного складу бетону. Проектні розміри підсилення наведено на рис 2.

Випробовування балкових конструкцій виконували за схемою вільно лежачої балки на двох опорах. Балки статично завантажувалися двома зосередженими силами, які прикладалися до балок у третині розрахункового прольоту (рисунок 3).

Перша серія досліду, випробовування двох непідсиленних балок (Б0-1 та Б0-2) на однократне короткочасне навантаження. Навантаження на балки Б0-1 та Б0-2, здійснювалося ступенями 10% від теоретично розрахованої несучої здатності.

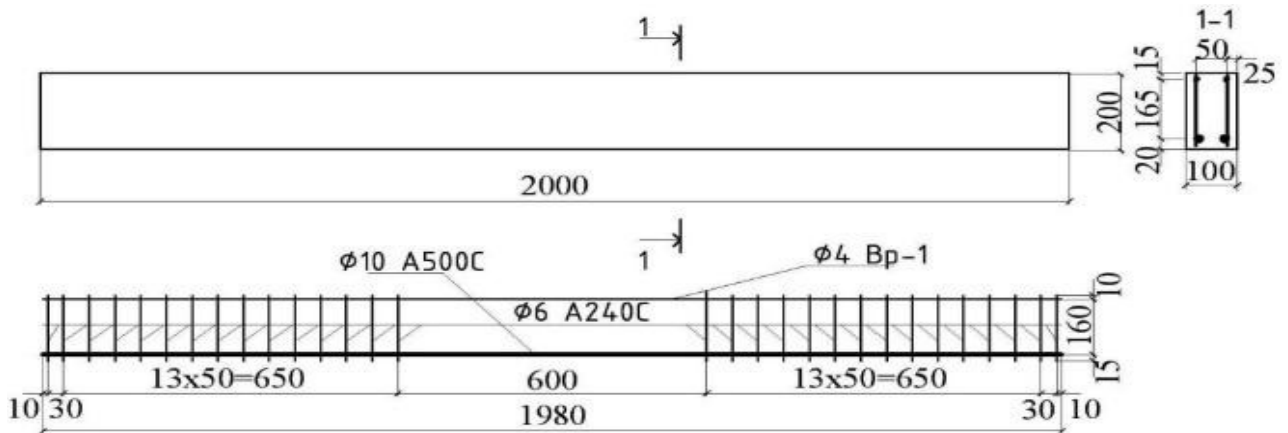


Рисунок 1 - Схема армування балок

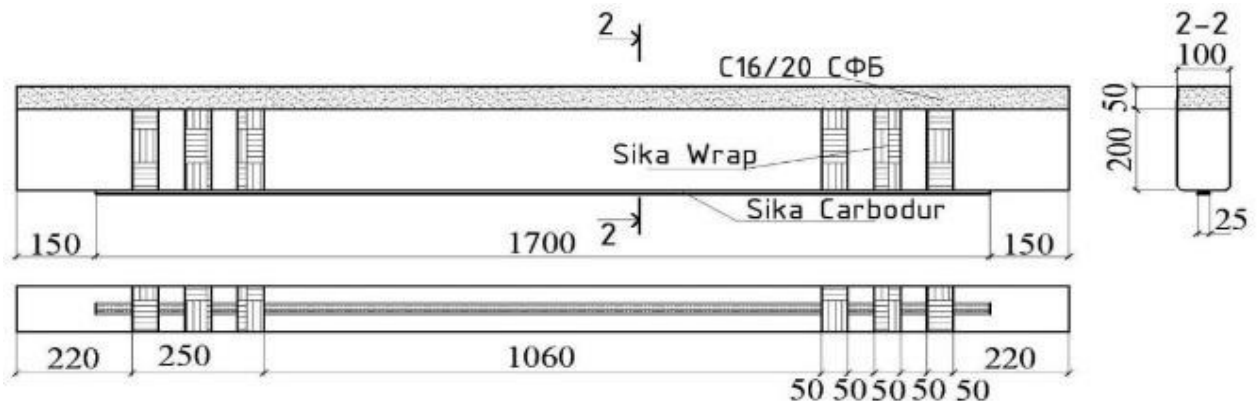


Рисунок 2 - Схема підсилення балок:

Друга серія досліду полягала у випробовуванні восьми балок (БЦ-1, БЦ-2, БЦ-3, БЦ-4, БЦ-5, БЦ-6, БЦ-7, БЦ-8) на малоциклові повторні навантаження з рівнями завантаження нижнім  $\eta_{cyc, low} = 0,3$  та верхнім  $\eta_{cyc, top} = 0,6$ .



Рисунок 3 - Загальний вигляд випробування дослідних балок

За одиницю несучої здатності, при випробовуванні балок, взято навантаження визначене за результатами випробовування на однократне навантаження двох балок БО-1 та БО-2. Балки БЦ-3, БЦ-4 після випробовування на малоциклові повторні навантаження були зруйновані. Після випробовування однократним та малоцикловим повторним навантаженням, було виконано підсилення шести балок.

Половину дослідних балок підсилювали у стиснутій зоні дрібнозернистим бетоном (БП-1<sub>Б</sub>, БЦП-5<sub>Б</sub>, БЦП-2<sub>Б</sub>) а половину сталевібробетонном (БП-2<sub>СФБ</sub>, БЦП-6<sub>СФБ</sub>, БЦП-2<sub>СФБ</sub>).

Третя серія досліду полягає у випробовуванні шести підсилених балок: двох попередньо випробуваних балок (БЦП-1<sub>СФБ</sub>, БЦП-2<sub>Б</sub>), двох під навантаженням  $0,6M_u$  в установці (БЦП-0,6-5<sub>Б</sub>, БЦП-0,6-6<sub>СФБ</sub>) та двох, що не випробовувались (БП-1<sub>Б</sub>, БП-2<sub>СФБ</sub>). Вони випробовувались на малоциклові повторні навантаження, верхній рівень який визначився за результатами випробування підсилених балок БП-1<sub>Б</sub> та БП-2<sub>СФБ</sub> при однократному завантаженні до руйнування.



Рисунок 4 – Приклеювання стрічки Sika® CarboDur® S-512 та підсилення стиснутої зони залізобетонних балок



У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень залізобетонних балок трьох серій. Дослідження першої серії виконано за дії одноразового навантаження, дослідження другої та третьої за дії малоциклового повторного з рівнями завантаження нижнім  $\eta_{\text{сус, low}} = 0,3$  та верхнім  $\eta_{\text{сус, top}} = 0,6$ . Виділено особливості руйнування підсилених експериментальних балок.

Руйнування непідсилених балок відбулося в стиснутій зоні, появі дрібних поперечних тріщин і завершилось роздавлюванням, дробленням та виколом бетону в стиснутій зоні.

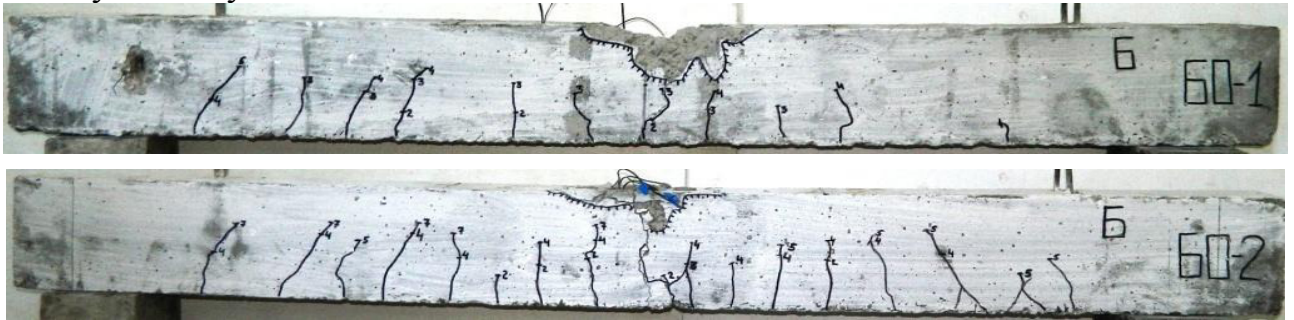


Рисунок 5 – Характер руйнування та тріщиноутворення непідсилених балок Б0-1, та Б0-2

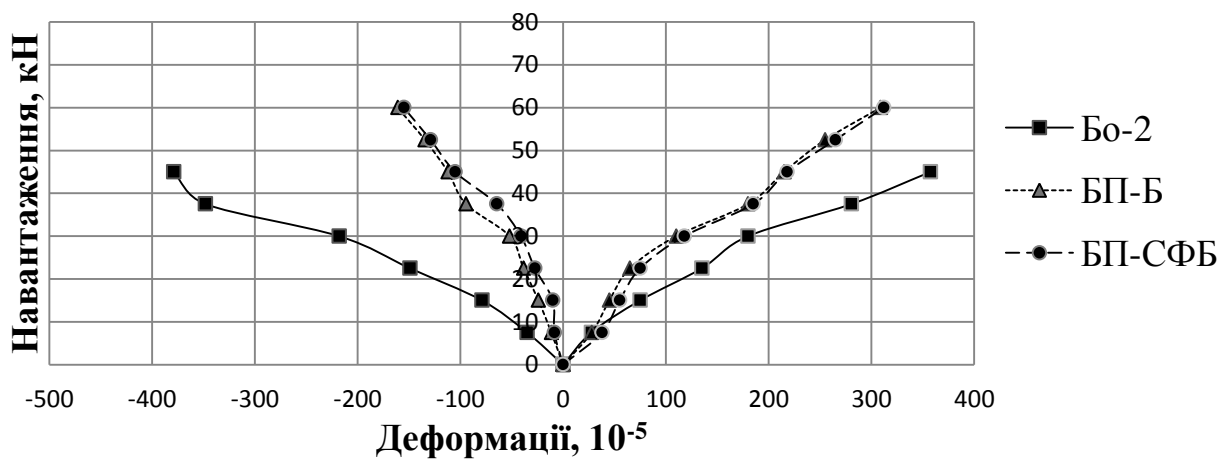


Рисунок 6 – Зміна деформацій в бетоні  $\varepsilon_c \times 10^{-5}$  і арматурі  $\varepsilon_s \times 10^{-5}$  в не підсилений Б0-2 та підсилених балках БП-1<sub>Б</sub> та БП-2<sub>СФБ</sub>

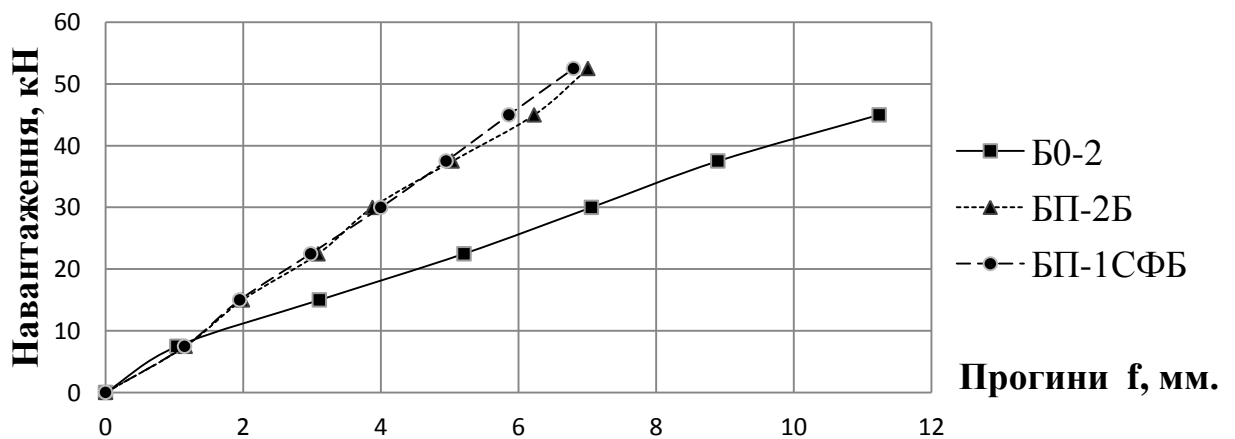


Рисунок 7 – Зміна прогинів балок в не підсилений Б0-2 та підсилених балках БП-2<sub>Б</sub> та БП-1<sub>СФБ</sub>

Перша нормальна тріщина підсилених балок БП-2<sub>Б</sub> та БП-1<sub>СФБ</sub> виникла при навантаженні  $F = 15$  кН. Подальше збільшення навантаження призвело до перевищення деформацій арматури граничних значень в балці, що привело до руйнування балки. руйнівне зусилля для балки БП-2<sub>Б</sub> –  $F_u = 74$  кН а для БП-1<sub>СФБ</sub> –  $F_u = 70$  кН. Прогини балок, перед руйнуванням, становили БП-2<sub>Б</sub> - 6 мм, БП-1<sub>СФБ</sub> – 8 мм а ширина розкриття тріщин для балки БП-2<sub>Б</sub> - 0,32 мм, для балки БП-1<sub>СФБ</sub> – 0,30 мм.



Рисунок 8 – Характер руйнування та тріщиноутворення підсилених балок БП-1<sub>СФБ</sub> БП-2<sub>Б</sub>

Під час руйнування балки БП-1<sub>СФБ</sub> відбувся відрив стрічки від тіла бетону. При досягненні граничного навантаження по грані стрічки відбулося зім'яття волокон полотна анкерування і відбувся відрив стрічки на ділянках між точкою прикладання сили і опорою.

Таблиця 1 – Ефект підсилення експериментальних балок за прогинами за дії однократного навантаження

Назва балки	Площа поперечного перерізу стрічки підсилення $A_f, \text{см}^2$	Площа поперечного перерізу бетону підсилення $A_{\text{сfb}}, \text{см}^2$	Згинальний момент, кНм	Експериментальний прогин $f_{\text{max}}^{\text{exp}}, \text{мм}$	Ефект підсилення $\delta, \%$
БО-1	-	-	4,5	1,15	-
			18	7,02	-
			27	12,0	-
БО-2	-	-	4,5	1,14	-
			18	7,26	-
			27	11,94	-
БП-1 <sub>СФБ</sub>	0,3	50	4,5	1,10	4,3
			18	4,95	29,5
			27	6,8	43,3
БП-2 <sub>Б</sub>	0,3	50	4,5	1,11	2,6
			18	5,04	30,6
			27	5,41	54,7

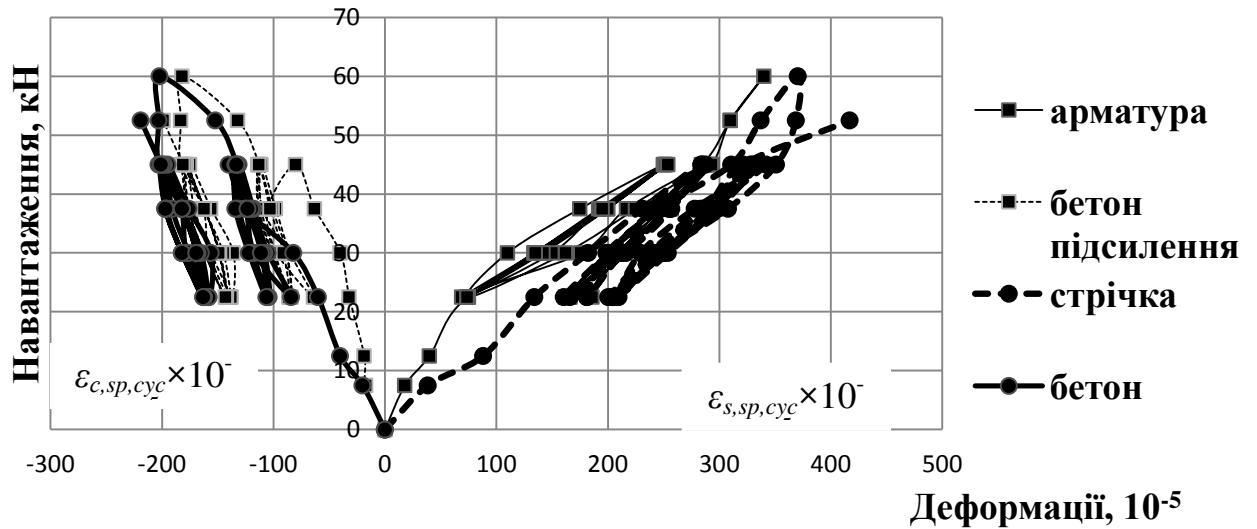


Рисунок 9 – Зміна деформацій розтягнутої арматури та стиснутого бетону в балці БЦП-2<sub>Б</sub> після підсилення при повторних навантаженнях

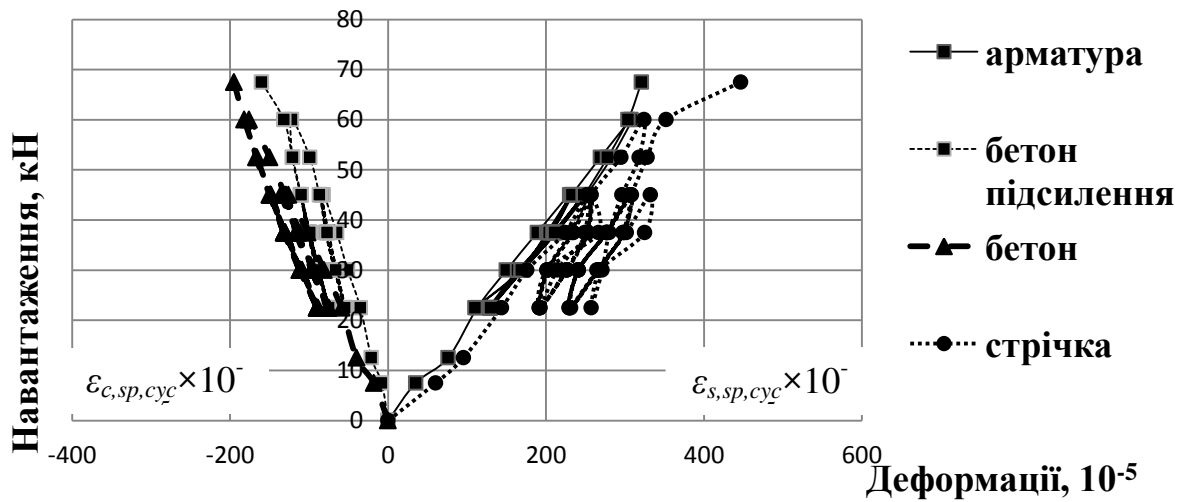


Рисунок 10 – Зміна деформацій розтягнутої арматури, стрічки, стиснутого бетону та бетону підсилення в балці БЦП-1<sub>СФБ</sub> після підсилення при повторних навантаженнях

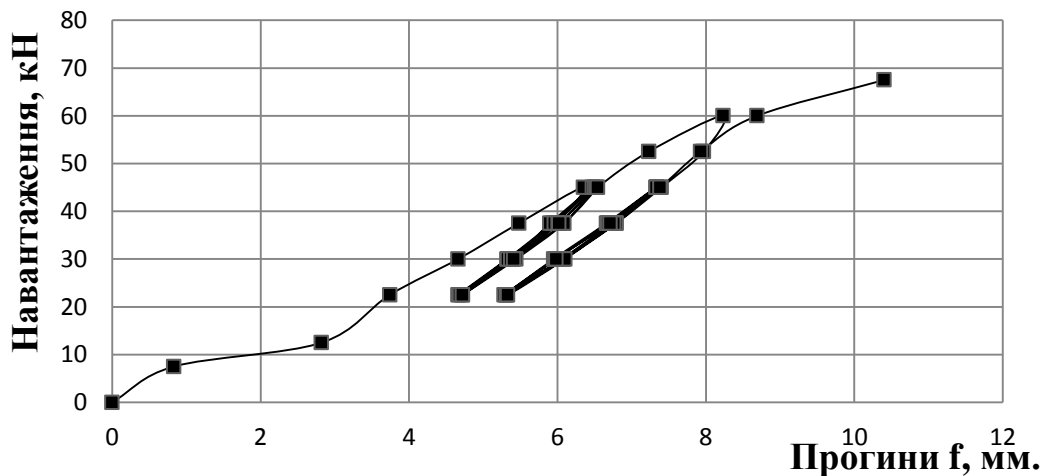


Рисунок 11 – Зміна прогинів в балці БЦП-1<sub>СФБ</sub> після підсилення при повторних навантаженнях

З аналізу графіків зміни прогинів в балці БЦП-2<sub>Б</sub> після підсилення при повторних навантаженнях, видно приріст прогину на 2мм після сплеску на п'ятому циклі навантаження. В балці БЦП-1<sub>СФБ</sub> приріст прогину склав менше 1мм. Можна зробити висновки, що зразки підсиленні сталеві фібробетонном мають більшу жорсткість ніж підсиленні бетоном. Руйнування зразків відбувається плавніше, оскільки в роботу системи підсилення стиснутої зони включається фібра, яка сприймає навантаження від крупного заповнювача.

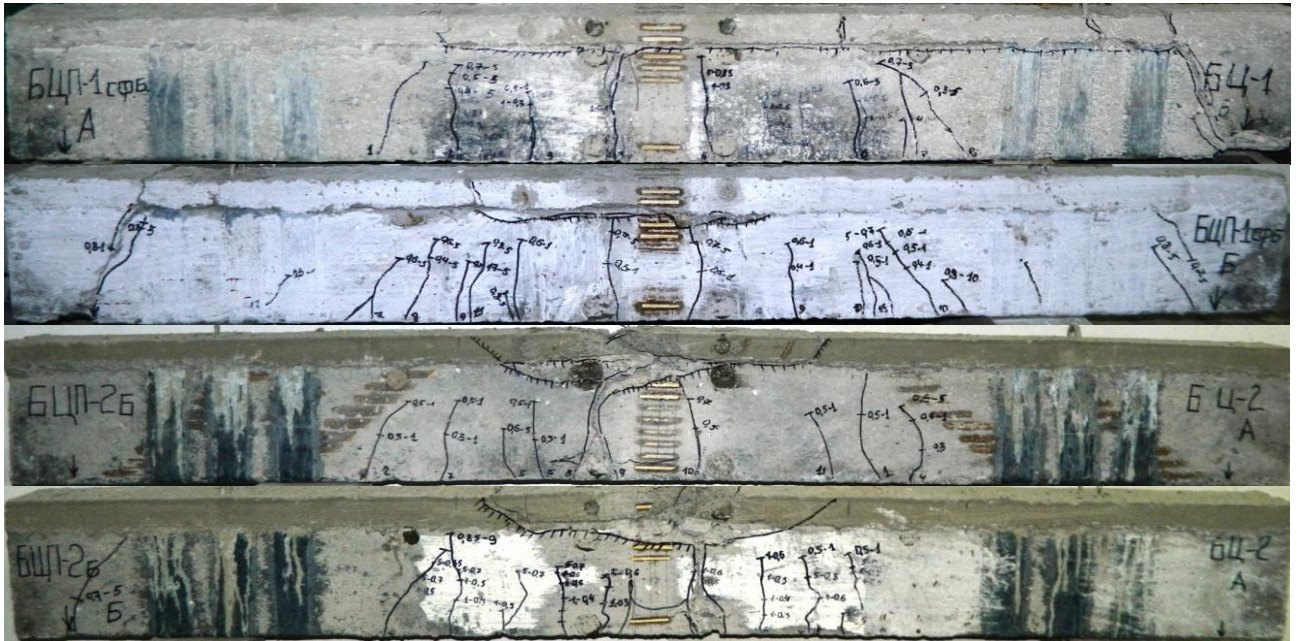


Рисунок 12 – Характер тріщиноутворення підсилених балок БЦП-1<sub>СФБ</sub> та БЦП-2<sub>Б</sub> після дії повторних малоциклових навантажень

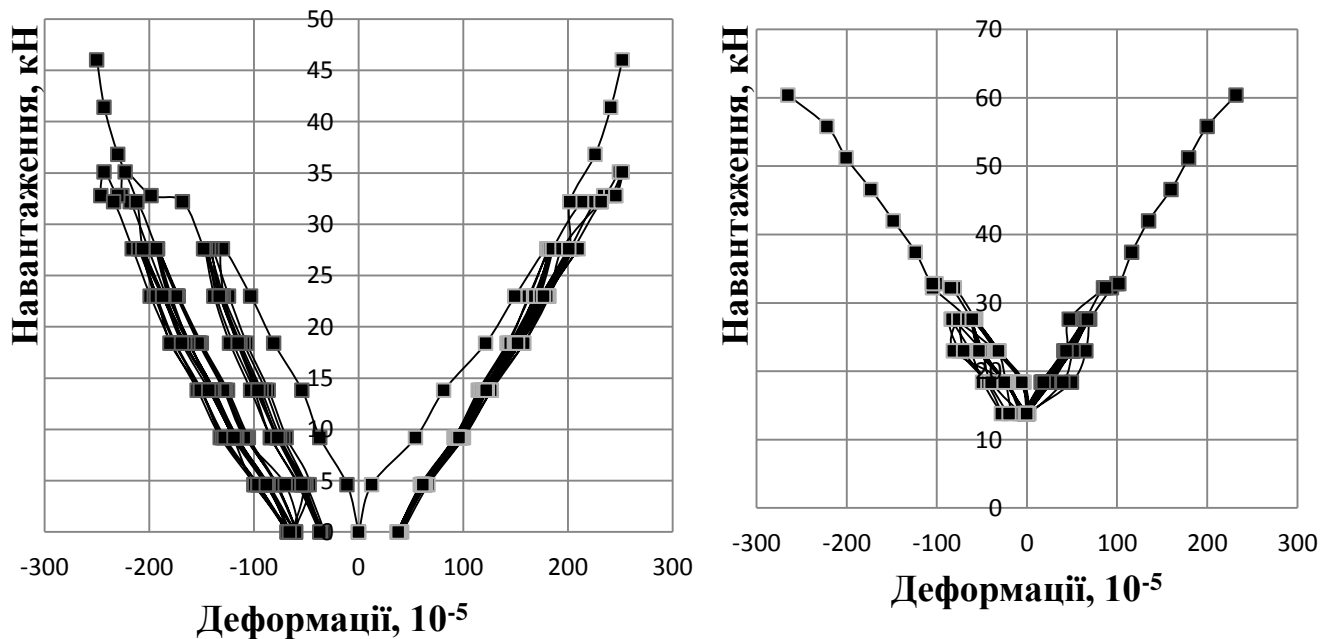


Рисунок 13 – Зміна деформацій розтягнутої арматури та стиснутого бетону в балці БЦП-5 до підсилення балки БЦП<sub>0,6-5Б</sub> після підсилення

При навантаженні до моменту тріщиноутворення прогину у балках підсилених під навантаженням відбувається практично однаково. Ширина розкриття тріщин в

непідсилених балках при однакових величинах навантаження є більшою, ніж в підсилених. На початкових етапах навантаження прогини балок практично не відрізняються. У підсилених балках зі збільшенням навантаження прогини, у порівнянні з не підсиленими, зменшуються. Тут відбувається включення в роботу систем підсилення (сталевібробетону та стрічки).

Напружено-деформований стан підсилених балок під навантаженням під час випробування умовно можна розділити на три стадії як описано у роботах. Ці стадії спостерігають у інших серіях підсилених балок. На першій стадії після підсилення в роботу включалась стрічка та сталевібробетон, тому приріст деформації основної арматури значно зменшувався. Друга стадія починалася з приросту деформації робочої арматури, прогинів та утворення похилих тріщин другого порядку, досягнення граничних напружень в стрічці. Руйнування – остання третя стадія. На третій стадії роботи балки спостерігався стрімкий приріст деформації робочої арматури, та значне збільшення прогинів балки.

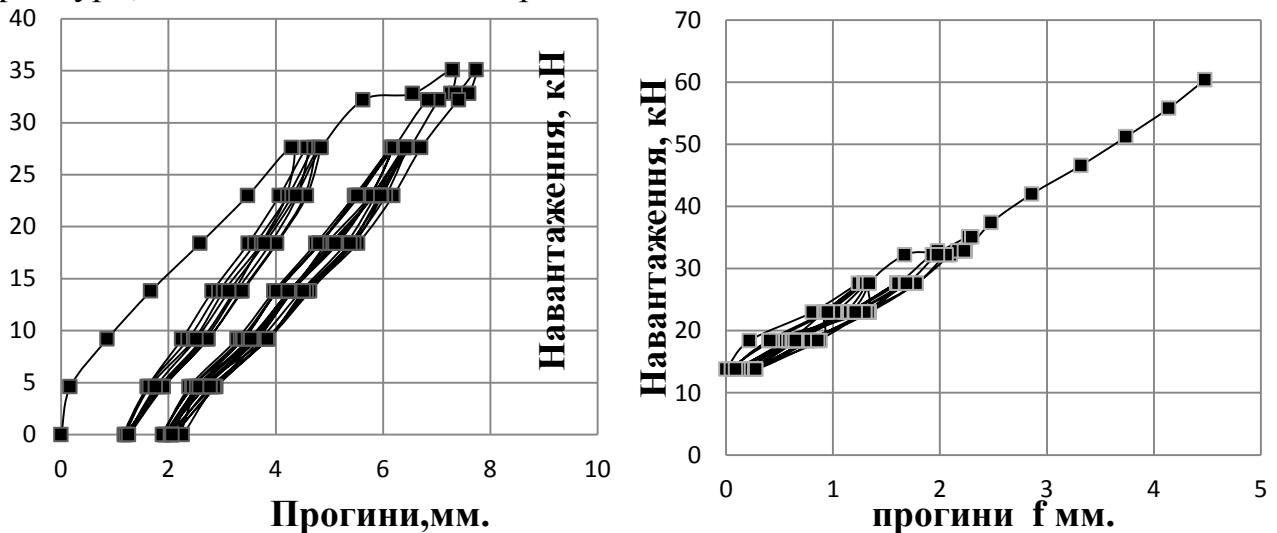


Рисунок 14 – Зміна прогинів балок в балці БЦ-5 до підсилення та після в БЦП<sub>0,6-5</sub> Б при повторних навантаженнях

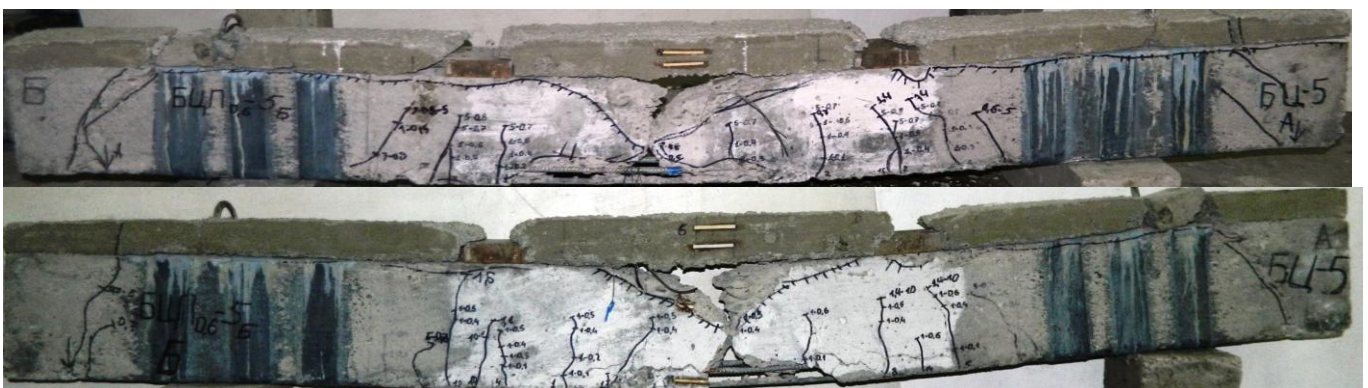


Рисунок 15 – Характер тріщиноутворення підсиленої балки БЦП<sub>0,6-5</sub> Б після дії повторних малоциклових навантажень

Підсилені балки під навантаженням показали підвищені експлуатаційні якості у порівнянні з непідсиленими. Зусилля тріщиноутворення для балок збільшилося від 80...100%. Несуча здатність підсилених залізобетонних балок під навантаженням БЦП 0,6-5 Б, БЦП 0,6-6 СФБ, на 56% більша ніж в непідсилених залізобетонних

балках при одноразовому навантаженні . Прогин залізобетонних балок підсилених під навантаженням на 48 % менший ніж в непідсилених балках при повторних навантаженнях.

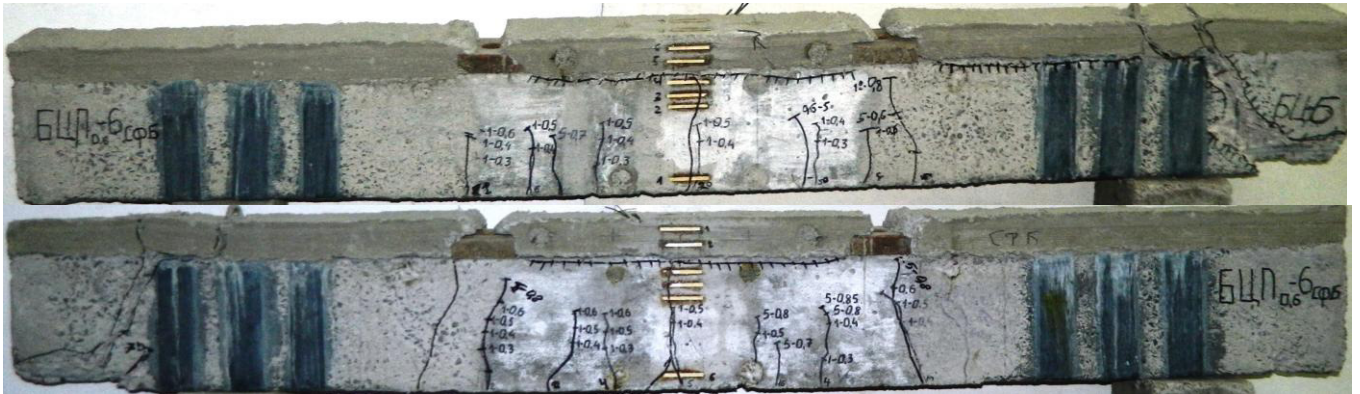


Рисунок 16 – Характер тріщиноутворення підсиленої балки БЦП<sub>0,6-6</sub> СФБ після дії повторних малоциклових навантажень

Дослідні зразки підсилених балок показали кращі експлуатаційні якості порівняно з непідсиленими. Момент утворення перших тріщин у підсилених балках віддаляється на 23...26%, порівняно з контрольними, що дозволяє покращити експлуатаційні характеристики балок в агресивному середовищі.

Слід відмітити про суттєве зменшення ширини розкриття нормальних тріщин та їх кількості при порівнянні підсилених і непідсилених зразків.

Дослідження показали, що підсилені балки за дії малоциклових навантажень працюють аналогічно тим, що випробувано без підсилення, при цьому мали незначне збільшення несучої здатності. Підтверджено результати Є.М. Бабица та його учнів, які виявили, що після п'ятого-шостого циклу завантаження відбувається стабілізація деформацій, прогинів та ширини розкриття тріщин в балках.

Таблиця 2 –Результати дослідження несучої здатності балок

Назва балки	Площа поперечного перерізу елемента підсилення			Площа армування внутрішньої сталеві арматури	Експериментальний згинальний момент	Ефект підсилення
	$A_f, \text{см}^2$	$A_b, \text{см}^2$	$A_{sfb}, \text{см}^2$	$A_s, \text{см}^2$	$M_{ULS}^{\text{exp}}, \text{кН}\times\text{м}$	$\delta_{ULS}^{\text{exp}}, \%$
БО-1	-	-	-	1,57	14,3	-
БО-2	-	-	-	1,57	14,1	-
БЦ-3	-	-	-	1,57	13,5	-
БЦ-4	-	-	-	1,57	13,8	-
БП-1 <sub>СФБ</sub>	0,3	-	50	1,57	20,91	46,7
БП-2 <sub>Б</sub>	0,3	50	-	1,57	22,46	57,6
БЦП-1 <sub>СФБ</sub>	0,3	-	50	1,57	21,96	60,9
БЦП-2 <sub>Б</sub>	0,3	50	-	1,57	18,13	32,8
БЦП <sub>0,6-5</sub> <sub>Б</sub>	0,3	50	-	1,57	22,72	66,5
БЦП <sub>0,6-6</sub> <sub>СФБ</sub>	0,3	-	50	1,57	22,59	65,5

У четвертому розділі розроблено методу розрахунку залізобетонних балок, підсилених одночасно у стиснутій і розтягнутій зонах, яка адаптована до основних положень національних норм проектування. Розроблений метод визначення міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів, який застосований на нелінійній деформаційній моделі і має задовільну збіжність з експериментальними даними. Метод може використовуватися при проектуванні підсилення або відновлення залізобетонних згинальних елементів.

Розглянемо згинальний залізобетонний елемент з одиночним армуванням, який підсилений в стиснутій зоні шаром будь-якого бетону товщиною  $h_{cf}$ , а в розтягнутій зоні вуглецевою стрічкою з розміром  $b_{sf} \times h_{sf}$ .

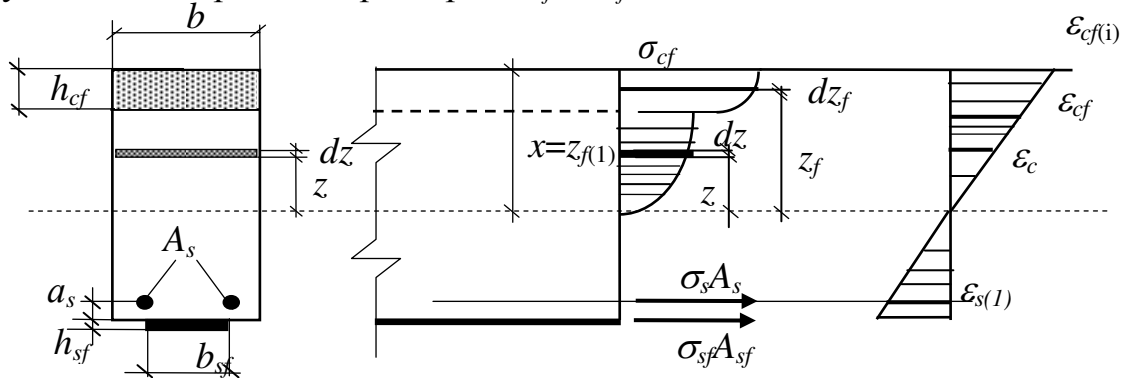


Рисунок 17 – Напружено - деформований стан нормального перерізу згинального залізобетонного елемента, підсиленого в стиснутій і розтягнутій зонах

Поперечний переріз розглядається як суцільний; при підсилення розтягнутої зони вуглецевими стрічками рівнодіюча зусилля в стрічці прикладена на рівні шва, руйнування елемента може відбутися при досягненні деформаціями в крайніх фібрах матеріалу підсилення граничних значень  $\epsilon_{cfu1}$ , а в розтягнутій зоні може відбутися розрив матеріалу підсилення внаслідок досягнення в ньому граничних деформацій  $\epsilon_{fu}$ ; при перевищенні деформаціями в матеріалі підсилення розтягнутої зони значення  $\epsilon_{f0}$  ( $\epsilon_{f0} = f_{yf}/E_f$ ) напруження в ньому приймаються рівними  $\sigma_{sf} = f_{yf}$ .

При заданій деформації крайнього стиснутого волокна матеріалу підсилення  $\epsilon_{cf(1)}$  за гіпотезою плоских перерізів (рис. 3) деформації в інших матеріалах можуть бути визначеними по аналогії з (2) і (3) за формулами:

$$\epsilon_{s(1)} = \frac{\epsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)} - a_s); \quad (1)$$

$$\epsilon_{sf(1)} = \frac{\epsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)}); \quad (2)$$

$$\epsilon_{cf} = \frac{\epsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} z_f; \quad \epsilon_c = \frac{\epsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} z; \quad (3)$$

$$\epsilon_{cfc} = \frac{\epsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (z_{f(1)} - h_{cf}), \quad (4)$$

де  $\epsilon_{cfc}$  - деформація суміжних волоко бетону підсилення та існуючого бетону. Значення  $z$  і  $dz$  при  $\epsilon_{c(1)} = \epsilon_{cf(1)}$ , а  $z_f$  і  $dz_f$  - за формулами

$$z_f = \frac{z_{f(1)}}{\varepsilon_{cf(1)}} \varepsilon_{cf}; \quad dz_f = \frac{z_{f(1)}}{\varepsilon_{cf(1)}} d\varepsilon_{cf}. \quad (5)$$

Значення  $z$  можна також визначити за виразом  $z = z_f - h_{cf}$ , а при  $z_f \leq h_{cf}$  приймати  $z_f = 0$ .

Для підсиленого перерізу умови рівноваги в загальному вигляді можна представити у вигляді:

$$M_{cf(1)} + M_{c(1)} + M_{sf(1)} + M_{s(1)} - M = 0; \quad (6)$$

$$S_{cf(1)} + S_{c(1)} = S_{sf(1)} + S_{s(1)}, \quad (7)$$

де  $M$ ;  $M_{cf(1)}$ ;  $M_{c(1)}$ ;  $M_{sf(1)}$ ;  $M_{s(1)}$  - значення відповідно згинального моменту від дії зовнішнього навантаження та моментів внутрішніх зусиль у стиснутому бетоні підсилення і основного бетону, в розтягнутій стрічці підсилення та в основній арматурі при значенні  $\varepsilon_{cf} = \varepsilon_{cf(1)}$ ;

$S_{cf(1)}$ ;  $S_{c(1)}$ ;  $S_{sf(1)}$ ;  $S_{s(1)}$  - внутрішні зусилля відповідно у стиснутому бетоні підсилення, в основному бетоні, в матеріалі підсилення та в розтягнутій арматурі  $A_s$  при значенні  $\varepsilon_{cf} = \varepsilon_{cf(1)}$ .

Зусилля в стиснутому бетоні підсилення можна знайти за формулою при заданій деформації стиснутого крайнього волокна  $\varepsilon_{cf(1)}$

$$S_{cf(1)} = b \int_{z_{f(1)} - h_{cf}}^{z_{f(1)}} \sigma_{cf} dz_f = b \frac{z_{f(1)}}{\varepsilon_{cf(1)}} \int_{\varepsilon_{cf(1)}}^{\varepsilon_{cf(1)}} \sigma_{cf} d\varepsilon_f \quad (8)$$

а в бетоні елемента, який підсилюється,

$$S_{c(1)} = b \int_0^{z_{f(1)} - h_{cf}} \sigma_c dz = b \frac{z_{c(1)}}{\varepsilon_{cf(1)}} \int_0^{\varepsilon_{cf(1)}} \sigma_c d\varepsilon_c. \quad (9)$$

Після інтегрування та математичних перетворень формули (6) та (7) можуть набути такого вигляду

$$S_{cf(1)} = \omega_f f_{cfm} b z_{f(1)}; \quad S_{c(1)} = \omega f_{cm} b z_{f(1)} \quad (8)$$

де  $f_{cfm}$  - середня призмова міцність бетону підсилення;

$\omega$  - коефіцієнт, що визначається при  $\varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cf(1)}$ ;

$\omega_f$  - коефіцієнт, який визначається за формулою

$$\omega_f = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{cf(1)}^{k+1} - \varepsilon_{cf(1)}^{k+1}}{\varepsilon_{cf(1)}^{k+1}} \right) \quad (9)$$

де  $\varepsilon_{cf(1)}$  - деформація при максимальних напруженнях на діаграмі механічного стану бетону підсилення.

Внутрішні зусилля в арматурі та в стрічці підсилення визначаються за формулами:

$$S_{s(1)} = A_s \sigma_{s(1)} = A_s E_s \varepsilon_{s(1)} = A_s E_s \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)} - a_s) \quad (10)$$

$$S_{sf(1)} = A_{sf} \sigma_{sf(1)} = A_{sf} E_f \varepsilon_{sf(1)} = A_{sf} E_f \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)}) \quad (11)$$

Таким же шляхом можна отримати формули для визначення згинальних моментів в нормальному перерізі елемента відносно нейтральної осі при заданій деформації крайнього стиснутого волокна

$$\begin{aligned} M_{cf(1)} &= b \int_{z_{f(1)} - h_{cf}}^{z_{f(1)}} \sigma_{cf} z_f dz_f = \\ &= b \left[ \frac{z_{f(1)}}{\varepsilon_{cf(1)}} \right]^2 \int_{\varepsilon_{cf(1)}}^{\varepsilon_{cf(1)}} \sigma_{cf} \varepsilon_{cf} d\varepsilon_f = \beta_f f_{cfm} b z_{f(1)}^2; \end{aligned} \quad (12)$$



$$M_{c(1)} = b \int_0^{z_{f(1)} - h_{cf}} \sigma_c z dz =$$

$$= b \left[ \frac{z_{f(1)}}{\varepsilon_{cf(1)}} \right]^2 \int_0^{\varepsilon_{cf(1)}} \sigma_c \varepsilon_c d\varepsilon_c = \beta f_{cm} b z_{(1)}^2 \quad (13)$$

$$M_{s(1)} = A_s E_s \varepsilon_{s(1)} = A_s E_s \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{f(1)} - a_s)^2 \quad (14)$$

$$M_{sf(1)} = A_{sf} E_f \varepsilon_{sf(1)} = A_{sf} E_f \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)})^2 \quad (15)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який визначається при  $\varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cf(1)}$ ;

$\beta_f$  – коефіцієнт, який визначається за формулою

$$\beta_f = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{cf(1)}^{k+2} - \varepsilon_{cf(1)}^{k+2}}{\varepsilon_{cf(1)}^{k+2}} \right) \quad (16)$$

Максимальний (руйнуючий) згинальний момент  $M_u$  знаходиться спільним рішенням рівнянь (6) і (7) з урахуванням значень внутрішніх зусиль за (8), (9), (10), (11) – (15), розв'язуючи їх відносно  $M=M_u$ , при цьому використовується максимальний критерій. Для цього визначаються значення моментів при зміні крайніх деформацій бетону підсилення  $\varepsilon_{cf}$  з певним кроком, наприклад через  $0,1 \varepsilon_{cf1}$ . На кожному кроці задача вирішується методом послідовних наближень, для чого можна на першому кроці прийняти висоту стиснутої зони  $x=z_{(1)}=0,5d$  і перевірити умову (6). Якщо різниця між лівою і правою частинами рівняння (6) складає менше 5%, то можна вважати, що значення  $z_{(1)}$  прийнято вірно. Якщо різниця між ними перевищує 5%, то необхідно корегувати значення  $z$  до тих пір, поки не буде задовольнятися умова (7). З знайденого значення  $z$  із формули (5) знаходиться значення моменту  $M$ .

Наведені вище рівняння рівноваги можуть бути використані в розрахунках міцності нормальних перерізів за граничними станами першої групи при дії розрахункового моменту від зовнішнього навантаження  $M_{Ed}$ , при цьому в наведених вище розрахункових формулах використовуються розрахункові значення міцнісних і деформативних характеристик матеріалів. В цьому випадку міцність підсиленого нормального перерізу згинального елемента буде забезпечена при виконанні наступних рівнянь:

$$M_{Ed} \leq \beta_f f_{cfd} b z_{f(1)}^2 + \beta f_{cd} b z_{(1)}^2 +$$

$$+ A_{sf} E_f \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)})^2 + A_s E_s \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{f(1)} - a_s)^2 \quad (17)$$

$$\omega_f f_{cfd} b z_{f(1)} + \omega f_{cd} b z_{(1)} =$$

$$= A_{sf} E_f \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)}) + A_s E_s \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{z_{f(1)}} (h - z_{f(1)} - a_s) \quad (18)$$

Підбір площі перерізу зовнішньої композитної арматури та сталевібробетону проводиться ітераційно, задаючи деяку початкову їх величину, а потім коригуючи її за результатами розрахунків по міцності на дію згинальних моментів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу щодо встановлення реального напружено-деформованого стану та удосконалення методики розрахунку залізобетонних елементів, підсилених одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні з урахуванням впливу повторних навантажень, на основі проведених комплексних експериментально-теоретичних досліджень. Основними висновками, які відображають результати дисертаційної роботи, є наступні:

1. Апробована програма та методика експериментальних досліджень згинальних залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами на основі вуглепластиків в розтягнутій зоні, дрібнозернистим бетоном та сталевібробетоном в стиснутій зоні, що зазнають впливу як однократних, так і малоциклових повторних навантажень, з врахуванням передісторії їх роботи до підсилення.

2. Виконані експериментальні дослідження міцності нормальних перерізів, жорсткості та тріщиностійкості згинальних залізобетонних балок до та після підсилення композитними матеріалами на основі вуглепластиків в розтягнутій зоні, бетоном та сталевібробетоном в стиснутій зоні, за дії на них однократних та малоциклових навантажень різних рівнів.

3. Підсилення згинальних залізобетонних елементів збільшує несучу здатність. При однократному навантаженні відбулось збільшення несучої здатності: в балках підсилених бетоном на 57%, в балках підсилених сталевібробетоном на 46%. При малоцикловому навантаженні для перших на 32%, для других на 60,9%. Для балок підсилених під навантаженням бетоном на 66%, в балках підсилених сталевібробетоном на 65%.

4. Встановлено, що підсилення зменшує прогини залізобетонних балок, в балках підсилених бетоном на 50%, в балках підсилених сталевібробетоном на 40%. При малоцикловому навантаженні для перших на 16%, для других на 10%. Для балок підсилених під навантаженням бетоном на 10%, в балках підсилених сталевібробетоном на 9%. Момент тріщиноутворення у підсилених балок збільшився у два рази, а це свідчить про збільшення їх жорсткості. Також зменшилась ширина розкриття нормальних тріщин в бетоні та деформації внутрішньої сталевіброарматури.

5. Встановлено такі особливості роботи балок: - руйнування підсилених дослідних зразків проходило одночасно по стиснутій та розтягнутій зоні перерізу, що свідчить про максимальне використання ресурсу підсилюваної конструкції; - малоциклові навантаження, сприяють збільшенню несучої здатності згинальних залізобетонних елементів підсилених у порівнянні із однократним навантаженням.

6. Удосконалено та апробовано методику розрахунку несучої здатності нормальних перерізів згинальних залізобетонних балок, підсилених в стиснутій і розтягнутій зонах при дії на них однократного та малоциклового навантаження за деформаційною моделлю. На підставі виконаних порівняльних розрахунків, встановлено високу збіжність експериментальних та теоретичних даних, отриманих за методикою розрахунку, запропонованою в дисертаційній роботі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових виданнях України

1. Борисюк О. П. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених у стиснутій і розтягнутій зоні / О. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2013. – Випуск 27. – С. 27 – 33. *(Розроблено методику дослідження підсилення залізобетонних балок сталевібробетоном у стиснутій та наклеєними композитами у вигляді вуглецевих волокон у розтягнутій зоні)*

2. Зятюк Ю. Ю. Операційність технології виконання робіт при підсиленні дослідних залізобетонних зразків (матеріалами фірми «Sika») / Ю. Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2016. – Випуск 32. – С. 466 – 475.

3. Зятюк Ю. Ю. Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок підсилених в стиснутій та розтягнутій зонах / Ю. Ю. Зятюк // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник / відпов. ред. М. М. Осетрін. – К. : КНУБА, 2016. – Випуск 61 – С. 216 – 222.

4. Зятюк Ю. Ю. Робота залізобетонних балок підсилених у стиснутій та розтягнутій зонах при дії малоциклових навантажень. / Ю. Ю. Зятюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк : ЛНТУ, 2016. – Випуск 5. – С. 215 -223.

5. Борисюк О. П. Напружено-деформований стан залізобетонних балок підсилених під навантаженням сталевібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень// О. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2016. – Випуск 33. – С. 298 – 303. *(Визначено несучу здатність, деформативність та тріщиностійкість підсилених залізобетонних балок, виконано аналіз їх результатів).*

6. Борисюк О. П. Сумісна робота шарів підсилення залізобетонних балок/ О. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк, М. О. Лисюк, А. В. Крамаренко // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк : ЛНТУ, 2017. – Випуск 8. – С. 50 – 57. *(Досліджено роботу шарів конструкції підсилення залізобетонних балок, побудовано графічні залежності).*

7. Гуйван Є. Ф. Високоєфективні матеріали в будівництві автомобільних доріг і аеродромів/ Є. Ф. Гуйван, В. В. Харипончук, Ю. Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2017. – Випуск 34. – С. 24 – 32. *(Проведено аналіз міцності та деформативності дослідних зразків, виконаних з сталевібробетону).*

8. Borisyuk A. P. Strengthening and calculation analysis of bending reinforced concrete elements (англійською) / A. P. Borisyuk, Y. Y. Ziatyuk, M. O. Lysyuk, V. S. Yevtushenko // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2018. – Випуск 36. – С. 341 – 348. *(Розроблено блок-схеми розрахунку підсилених залізобетонних балок).*

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях

9. Борисюк А. П. Исследование деформационных характеристик фибробетона со стальной фиброй / А. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк // Вестник Белорусско-Российского университета, УПКП МЭУП.–№ 2 (51). Могилев, – 2016. – С.145 – 151. *(Проведено аналіз міцності та деформативності дослідних зразків і побудовано графічні залежності).*

Публікації тез та доповідей за матеріалами конференцій

10. Зятюк Ю. Ю. Сучасні високоефективні матеріали в підсилені залізобетонних елементів. / Ю. Ю. Зятюк // Матеріали 12-ої міжнародної науково-технічної конференції. «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація». – 18-20 жовтня 2016р. м. Полтава: ПНТУ, 2016. – С.16-24.

11. Борисюк О. П. Аналіз стану підсилення та розрахунку залізобетонних згинальних елементів / О. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк, М.О. Лисюк, В.С. Євтушенко // Матеріали 9-міжнародної науково-технічної конференції. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»: – 16-18 жовтня 2018р.: м. Рівне, НУВГП, 2018 – С.19-20.*(Розроблено блок-схеми розрахунку підсиленних залізобетонних балок).*

## АНОТАЦІЯ

**Зятюк Ю.Ю. Напружено-деформований стан та розрахунок залізобетонних згинальних елементів, підсиленних в стиснутій і розтягнутій зонах. - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - Будівельні конструкції, будівлі та споруди. - Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено вивченню напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсиленних підсиленними композитними матеріалами на основі вуглепластиків в розтягнутій, дрібнозернистим бетоном та сталеві фібробетоном в стиснутій зонах, за дії одноразового та малоциклового повторного навантаження.

Отримано нові експериментальні дані щодо несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних балок, підсиленних композитними матеріалами на основі вуглепластиків в розтягнутій зоні, дрібнозернистим бетоном та сталеві фібробетоном в стиснутій зоні.

Встановлено, що система підсилення збільшує несучу здатність балок, підвищує тріщиностійкість, віддаляє момент утворення перших тріщин, суттєво зменшує ширину розкриття нормальних тріщин порівняно з балками без підсилення.

Наведено методику розрахунку залізобетонних балок, підсиленних композитними матеріалами на основі вуглепластиків в розтягнутій зоні, сталеві фібробетоном в стиснутій зоні. Для практичного використання результатів досліджень складено рекомендації.

**Ключові слова:** залізобетонна балка, підсилення, сталеві фібробетон, композити, несуча здатність, нормальні перерізи, тріщиностійкість, деформативність.

## ANNOTATION

### **Ziatiuk Y.Y. Stress-strain state and calculation of reinforced concrete bending elements reinforced in compressed and stretched zones. - On the rights of a manuscript.**

Thesis for obtaining of a scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D. in Technical Sciences) in specialty 05.23.01 - Construction structures, buildings and facilities. National University of Water and Environmental Engineering, city of Rivne, 2019.

Thesis is applied to the study of the stress-strained state of concrete beams reinforced carbon fiber-based composite materials in stretched, fine-grained concrete and steel-fiber concrete in compressed zones for the actions of a single and low-cycle loading.

New experimental data concerning the carrying capacity, deformation and fracture of the reinforced concrete beams reinforced carbon fiber-based composite materials in stretched, fine-grained concrete and steel-fiber concrete in compressed zones.

The system of carbon-reinforced plastics for reinforcement of the stretched zone of reinforced concrete beams is represented by two types of reinforcement products: carbon fiber plastic tape Sika® CarboDur® S-512 for reinforcement of beam structures in the area of the bending moment and carbon fiber SikaWrap®-230 C/45 and creating a clip.

To enhance the compressed zone of reinforced concrete beams, fine-grained concrete of class C16/20 and 3% wire fiber 50 mm long were used; the layer thickness was 50 mm. The concrete matrix for all samples was made from a single concrete composition.

For research was made twelve research beams. Reinforced concrete beams with dimensions of  $100 \times 200 \times 2000$  mm, concrete of class C16 / 20. Longitudinal working core reinforcement  $2\text{Ø}10$  A 500C and transverse reinforcement  $\text{Ø}6$  A240C with a step of 50 mm, except for the zone of pure bending. Upper mounting fittings from wire  $\text{Ø}4$  B500 (Bp-I).

Carbon fibers - a material consisting of thin filaments with a diameter of 5 to 15 microns, formed mainly by carbon atoms. Composite tapes consist of 99% carbon fibers placed in 1% synthetic fibers.

Steel fiber concrete is a composite material with a concrete matrix, reinforced with short steel fibers - fibers with a diameter of  $d_f = 0.25 \dots 1.2$  mm, with a ratio of length to diameter  $l_f / d_f = 50 \dots 120$ , volume content  $\mu_{fv} = 0.5 \dots 3\%$

Experimental studies of the strength of normal cross sections, stiffness and crack resistance of bending reinforced concrete beams before and after reinforcement with composite materials based on carbon plastics in the stretched zone, concrete and steel fiber concrete in the compressed zone, for the actions of single and low-cycle loads of various levels on them were performed.

Reinforcement of flexible concrete elements increases the carrying capacity. With a single load, there was an increase in bearing capacity: in beams reinforced with concrete by 57%, in beams reinforced with steel fiber concrete by 46%. With a low-cycle load for the first by 32%, for the second by 60.9%. For beams reinforced under concrete load by 66%, in beams reinforced with steel fiber reinforced concrete by 65%.

It has been established that reinforcement reduces deflections of reinforced concrete beams, in beams reinforced with concrete by 50%, in beams reinforced with steel fiber

concrete by 40%. With a low-cycle load for the first at 16%, for the second at 10%. For beams reinforced under load by concrete by 10%, in beams reinforced with steel fiber reinforced concrete by 9%. The moment of cracking in reinforced beams doubled, and this indicates an increase in their stiffness. The width of the opening of normal cracks in concrete and the deformation of internal steel reinforcement also decreased.

It has been established that the amplification system increases the carrying capacity of the beams and crack resistance, postpones the time of formation of the first crack, significantly reduces the width of the disclosure of a normal cracks compared to beams without reinforcement.

A method for calculation of reinforced concrete beams reinforced with composite materials on the basis of carbon plastics in the stretched zone, steel fiber concrete in the compressed zone. Recommendations were composed for practical use of the research findings.

**Keywords:** reinforced concrete beam, reinforcement, steel fiber concrete, composites, bearing capacity, normal cross sections, crack resistance, deformability.

## АННОТАЦИЯ

**Зятюк Ю.Ю. Напряженно-деформированное состояние и расчет железобетонных изгибаемых элементов, усиленных в сжатой и растянутой зонах. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения. - Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, 2019.

Диссертационную работу посвящено изучению напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных композитными материалами на основе углепластиков в растянутой, мелкозернистым бетоном и сталефибробетоном в сжатой зонах при действии кратковременной однократной и малоцикловой повторной нагрузки.

Получены новые экспериментальные данные несущей способности, деформативности и трещиностойкости железобетонных балок, усиленных композитными материалами на основе углепластиков в растянутой, мелкозернистым бетоном и сталефибробетоном в сжатой зонах.

Установлено, что система усиления увеличивает несущую способность балок, повышает трещиностойкость, отдалает момент образования первых трещин, существенно уменьшает ширину раскрытия нормальных трещин по сравнению с балками без усиления.

Для практического использования результатов исследований составлены блок-схемы для расчета по нормальным сечениям.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, усиление, сталефибробетон, композиты, несущая способность, нормальные сечения, трещиностойкость, деформативность.

Підписано до друку 03.05.2019 р. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Папір друкарський №1. Гарнітура Times.  
Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 прим. Зам. № 2019-20

---

*Віддруковано*  
*Комп'ютерний інформаційно-видавничий центр Національного університету*  
*водного господарства та природокористування,*  
*33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11*