

УДК 624.21

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОШКОДЖЕНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХОПРОВОДУ ТА ЙОГО ПІДСИЛЕННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Т.Л. Чирва,

канд. техн. наук, доцент

В.М. Колякова,

канд. техн. наук, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.347-359

Дослідження присвячене проблемі підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій транспортних споруд з використанням сучасних композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна (CFRP).

Проведений аналіз світового досвіду застосування FRP-композитів у будівництві показав переваги підсилення конструкцій порівняно з традиційними методами підсилення: підвищена несуча здатність при мінімальному збільшенні власної ваги, покращені міцнісні характеристики, стійкість до корозії та агресивного середовища, збереження габаритів конструкції та швидке відновлення експлуатаційних властивостей. Дослідження підтверджує ефективність роботи залізобетонних конструкцій, підсилених вуглецевими композитними матеріалами, для об'єктів транспортної інфраструктури України в умовах обмеженого бюджетного фінансування та необхідності мінімізації часу виробництва робіт.

Ключові слова: підсилення залізобетонних конструкцій, композитні матеріали, вуглецеве волокно, CFRP, метод скінчених елементів, транспортні споруди, шляхопровід, напружено-деформований стан, вуглепластик, реконструкція мостів.

1. Вступ

Потреба у відновленні несучої здатності залізобетонних конструкцій виникає у двох основних випадках. Перший пов'язаний з реконструкцією об'єктів транспортної інфраструктури та необхідністю адаптації до зростаючих експлуатаційних навантажень, обумовлених збільшенням інтенсивності руху та підвищенням осьових навантажень рухомого складу. Другий випадок визначається необхідністю відновлення несучої здатності, втраченої в процесі тривалої експлуатації внаслідок корозійних процесів, механічних пошкоджень, дефектів виготовлення або монтажу, а також дії екстремальних навантажень.

У сучасній практиці реконструкції та підсилення залізобетонних конструкцій особливе місце займає метод застосування композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна (Carbon Fiber Reinforced Polymers - CFRP), який отримав широке поширення у світовій будівельній практиці та активно впроваджується в Україні [3-6]. Цей метод розглядається як перспективне рішення для відновлення несучої здатності прогонових будов автодорожніх та залізничних мостів, особливо в умовах обмеженого бюджетного фінансування та необхідності мінімізації часу виробництва робіт.

Композитні матеріали на основі вуглецевого волокна знаходять широке застосування у будівельній галузі України як система зовнішнього армування при підсиленні несучих конструкцій транспортних споруд. До основних переваг вуглецевих композитних матеріалів належать: висока технологічність застосування, незначна маса, видатні міцнісні характеристики, стійкість до впливу агресивних чинників навколишнього середовища, мінімальні габарити підсилюючих елементів, спрощені вимоги до виробництва монтажних робіт, а також висока швидкість виконання підсилення. Основними елементами системи зовнішнього армування згинальних залізобетонних конструкцій є вуглецеві тканини та ламелі різних марок, які приклеюють до поверхні підсилюваних конструкцій за допомогою полімерної матриці, що забезпечує надійне зчеплення армуючого наповнювача з бетоном. Найбільш ефективним та поширеним методом підсилення є влаштування вуглецевих ламелей, що дозволяє значно підвищити несучу здатність конструкцій при згині.



Рис. 1. Ремонт та підсилення прогонових будов шляхопроводу на км 219+400 а/д М-13 Кіровоград-Платаново. (фото: Т.Л. Чирва, ООО «Придніпров'я»)

підсиленнях конструкцій. Особливу увагу приділено технологічним аспектам застосування FRP-тканин, які легко адаптуються до будь-якої геометрії, включаючи U-подібне обгортання балок.

Робота містить детальні рекомендації щодо розрахунку несучої здатності підсилення елементів та методики визначення оптимальних параметрів підсилення.

Значний внесок у розвиток теорії підсилення конструкцій композитними матеріалами зробили Hollaway L.C. та Teng J.G. (2008), які систематизували методи підсилення та реабілітації об'єктів цивільної інфраструктури [8]. Їхня робота охоплює широкий спектр застосування FRP-композитів, від підсилення окремих елементів до комплексної реконструкції споруд. Автори підкреслюють основні переваги FRP-композитів: високу міцність, легку вагу та корозійну стійкість.

Фундаментальні дослідження [9] заклали основи застосування сучасних композитних матеріалів у мостобудуванні, розглядаючи як теоретичні аспекти, так і практичні рішення для різних типів мостових конструкцій. Дослідження містить аналіз напружено-деформованого стану підсиленнях конструкцій та методики оцінки ефективності підсилення.

Оглядова стаття [10] Bakis C.E. та співавторів (2002) представляє стан науки в галузі

Приклади підсилення залізобетонних конструкцій шляхопроводів і мостів композитними матеріалами на основі вуглецевого волокна на території України наведені на рис. 1, 2.

2. Аналіз попередніх фундаментальних досліджень

Багато вчених, як закордонних так і вітчизняних проводили дослідження підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами [1-26].

Дослідження Teng J.G. та співавторів (2002) представляють комплексний підхід до проектування підсилення залізобетонних конструкцій з використанням FRP-композитів [7]. Автори детально аналізують механізми взаємодії композитного матеріалу з бетоном, розглядаючи різні види руйнування



Рис. 2. Ремонт аварійного ригеля руслової опори мосту на км 106+976 автомобільної дороги Т-26-01 Чернівці - Вашківці – КПП". (фото В.М.Чирва, ООО «Придніпров'я»)

застосування FRP-композитів у будівництві на початок XXI століття. Дослідники відзначають ключові переваги FRP-матеріалів порівняно з традиційними будівельними матеріалами: високе співвідношення міцності до ваги, підвищену довговічність та корозійну стійкість. Робота містить критичний аналіз існуючих методів проектування та рекомендації щодо подальшого розвитку технології.

Спеціалізовані методи підсилення

Дослідження Barros J.A. та Fortes A.S. (2005) присвячені інноваційному методу підсилення згинальних залізобетонних балок шляхом вклеювання CFRP-ламель у попередньо виконані пази [11]. Цей метод, відомий як Near Surface Mounted (NSM), показав високу ефективність порівняно з традиційним зовнішнім приклеюванням ламелей. Автори провели комплексні експериментальні дослідження, що підтвердили переваги цього підходу в умовах знакозмінних навантажень.

Роботи Bonacci J.F. та Maalej M. (2001) містять аналіз поведінкових тенденцій залізобетонних балок, підсилених зовнішньо приклеєними FRP-матеріалами [12]. Дослідники виявили закономірності зміни жорсткості, тріщиностійкості та несучої здатності підсилених конструкцій залежно від параметрів підсилення.

Значне практичне значення мають рекомендації [13] щодо проектування, розроблені у (2004) в Лулеоському технологічному університеті Швеції. Täljsten B. підкреслює, що для інфраструктурних об'єктів і ремонту бетонних конструкцій композити є оптимальним рішенням завдяки можливості швидкого монтажу та значно меншій вазі порівняно з альтернативними методами. Документ містить детальні методики розрахунку та практичні рекомендації щодо виконання робіт.

Роботи Meier U, щодо застосування композитних матеріалів у ремонті мостових споруд заклали основи сучасних підходів до підсилення транспортних конструкцій [14]. Автор розглянув перспективи використання різних типів композитних матеріалів та проаналізував їхню ефективність при різних видах пошкоджень.

Останні дослідження у галузі підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами демонструють значний прогрес у розумінні поведінки FRP-композитів у різних умовах експлуатації.

Автори [15] провели широкий аналіз експериментальних досліджень застосування FRP для підсилення мостових конструкцій. В останні роки FRP широко використовують, як підсилюючий матеріал у цивільному будівництві завдяки високій міцності, легкій вазі, корозійній стійкості та опору втомі. В роботі систематизовано різні типи FRP-композитів та їхнє застосування для підсилення та реабілітації мостових конструкцій, включаючи FRP-листи, стрижні, сітки та попередньо напружені FRP-тяжі.

Значний внесок у розуміння механічних властивостей FRP-матеріалів зробили Feng G., Zhu, D., Guo, S., Rahman, M.Z., Jin, Z. та Shi, C. [16], які досліджували поведінку FRP-стержнів у агресивних середовищах. Порівняно з традиційними сталевими стержнями, FRP-стрижні мають значно вищу міцність (наприклад, GFRP-стержні можуть мати границю міцності на розтяг у діапазоні від 550 МПа до 1380 МПа) та приблизно четверть густини сталі.

Дослідження [17] присвячені аналізу поведінки зчеплення FRP-стержнів у самоущільнювальному сталевібробетоні, що має важливе значення для розуміння механізмів передачі зусиль у підсилених конструкціях.

Zhang D. та інші вивчали вплив природного вивітрювання на довговічність зчеплення FRP-арматури в бетоні [18], що є критично важливим для довгострокової експлуатації підсилених конструкцій.

У роботі [19] автори провели комплексне дослідження застосування FRP у бетоні. FRP-армування має краще співвідношення міцності до ваги, ніж сталь; можна зменшити загальну вагу конструкцій, не зменшуючи їхню структурну міцність, використовуючи FRP. Автори [20] представили сучасний огляд методів структурного підсилення за допомогою FRP. FRP-залізобетонні конструкції демонструють у вісім разів більшу міцність порівняно з традиційними сталевими залізобетонними конструкціями.

Сучасні дослідження також включають роботи [21, 22 та 23], присвячені втомній поведінки сталі-FRP композитних стержнів [21], повзучості базальтових FRP-тяжів для попередньо напружених конструкцій [22], та впливу вологи на властивості FRP-композитів [23].

В роботі [24] проведено аналіз ефективності, проблем та можливостей підсилення залізобетонних конструкцій з використанням FRP. Техніка FRP була успішно реалізована для підсилення мостів, будівель, тунелів, силосів, резервуарів та підземної інфраструктури завдяки таким перевагам, як легкість, опір втомі, висока міцність на розтяг.

Аналіз сучасних досліджень показує, що застосування композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна для підсилення залізобетонних конструкцій є високоефективним та перспективним напрямом. Сучасні дослідження демонструють значний прогрес у розумінні поведінки FRP-композитів в умовах тривалого навантаження, впливу чинників навколишнього середовища на довговічність підсилених конструкцій, а також розвиток нових методів моніторингу стану підсилених споруд.

Разом з тим, залишається актуальною необхідність подальшого розвитку методики розрахунку та проектування підсилення з урахуванням специфіки роботи транспортних споруд в умовах динамічних навантажень.

Мета і методи роботи. Дослідження несучої здатності та підсилення пошкодженого залізничного шляхопроводу [1, 2].

Опис об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження є залізничний шляхопровід Запорізького заводу феросплавів - трипрогонова балкова конструкція з розмірами в плані 16,5+13,5+16,5 м [1, 2]. Особливістю цієї споруди є кут перетину шляхопроводу з вулицею, що становить 39° , що обумовлює специфіку розподілу навантажень та напружено-деформованого стану конструкції (рис. 3).



Рис. 3. Загальний вигляд шляхопроводу [1]

3. Виклад основного матеріалу

Конструктивне рішення передбачає змінне армування з відводом частини стрижнів у стиснену зону бетону в приопорних ділянках, що забезпечує раціональне використання матеріалу та відповідає епюрі згинальних моментів (рис.4).

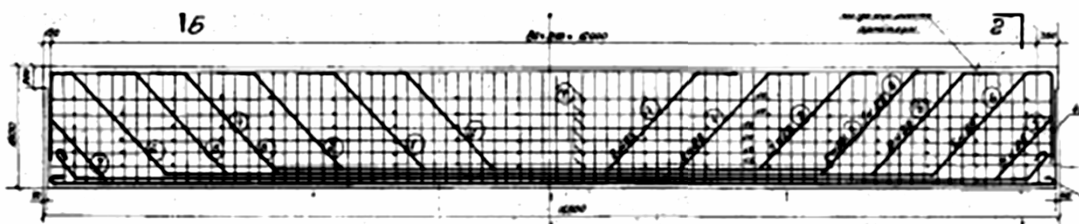


Рис. 4.Схема армування балки прольотної будови [2]

Для влаштування баластного корита передбачені довгі консолі з встановленими на них перилами огороження. Проектне тимчасове навантаження на прогонові будови відповідає класу Н-7 згідно з діючими нормативними документами.

Характеристика пошкоджень конструкції

З метою вивчення розподілу зусиль в арматурі пошкодженої прогонової будови і розробки способу посилення, була створена тривимірна модель шляхопроводу в ПК Ліра (рис. 5). Моделювання бетону виконане об'ємними кінцевими елементами, діафрагми - кінцевими елементами балки-стілки, а стержні поздовжньої і поперечної арматури виконано кінцевими елементами типу ферм.

У результаті проведеного технічного обстеження встановлено, що одна з прогонових будов, розташована з боку промислового підприємства, має значні пошкодження у вигляді руйнування бетону розтягнутої зони та обриву частини стрижнів робочої арматури. Найбільш критичними є

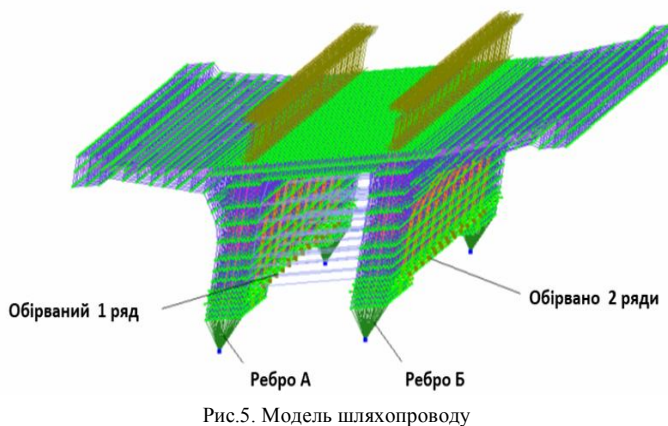


Рис.5. Модель шляхопроводу

пошкодження одного з ребер, де відбувся обрив двох нижніх рядів поздовжньої арматури.

Встановлено, що в існуючій моделі, створеній згідно з проектом та наявними дефектами, напруга в робочій арматурі перевищує гранично допустиму.

При цьому небезпечний переріз знаходиться не в центрі прольоту, де діє максимальний згинальний момент, а у країв пошкодженої ділянки [2]. Це обумовлено тим, що частина поздовжніх стержнів не доходить до даного перерізу, а частина, яка згідно з проектом повинна доходити до опори, обірвана (рис. 6).

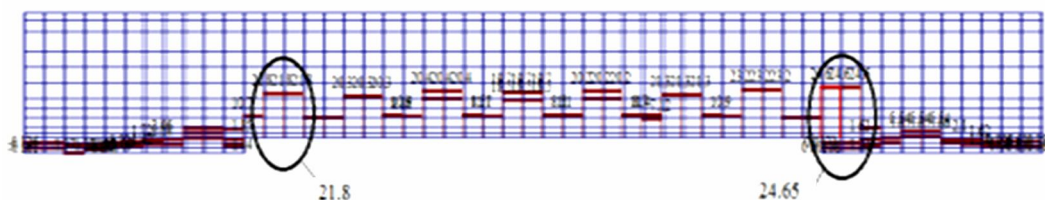


Рис. 6. Напруження в робочій арматурі невідсиленої конструкції під дією нормативних навантажень

Інструментальне визначення міцності бетону монолітних балок та діафрагм, виконане з використанням склерометра ADA Schmidt Hammer 225, показало значення в межах 25,8-26,8 МПа, що перевищує проектну марку бетону М250. Виняток становлять пошкоджені ділянки, де середня міцність бетону знизилась до 18,8 МПа, що свідчить про деградацію матеріалу в зоні пошкодження.

Аналіз причин виникнення пошкоджень (рис. 7) показав, що вони обумовлені систематичними поперечними ударами вантажного автомобільного транспорту об нижню грань балок внаслідок зменшення габариту підмостового простору. Причиною зменшення габариту є поступове збільшення висоти проїзної частини при проведенні періодичних ремонтних дорожніх робіт без відповідного коригування висотних позначок.

Для оцінки несучої здатності конструкції у вихідному та пошкодженному стані, а також для розробки схеми підсилення застосовано метод скінченних елементів з використанням програмного комплексу ANSYS [25]. Цей підхід дозволяє проводити детальний аналіз напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів та геометричних особливостей споруди.



Рис. 7. Прольотна будова з пошкодженими балками

Для створення 3D моделі були розроблені тривимірні скінченно-елементні моделі, що враховують фактичну геометрію конструкції до та після пошкодження (рис. 8). До розрахункових моделей прикладалося тимчасове навантаження класу С14 відповідно до вимог ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби та ДБН В.2.3-14:2006.

При побудові розрахункової скінченно-елементної моделі для чисельного аналізу враховувалася симетрія розрахункової області, що дозволило оптимізувати обчислювальні витрати при збереженні точності результатів.

Для моделювання різних компонентів конструкції використовували наступні типи скінчених елементів:

- бетону класу С30/35- елемент SOLID186 - тривимірний твердий елемент високого порядку, що складається з 20 вузлів з квадратичним законом переміщень. Елемент має три ступені свободи в кожному вузлі (переміщення в напрямках x , y , z) та підтримує моделювання пластичності, гіперпружності, повзучості, геометричної нелінійності та великих деформацій;
- арматура (сталь класу А300 (А-II) діаметром 28 мм) - елемент REINF264, спеціально призначений для аналізу структурного підсилення тривимірних балок, оболонок та твердих елементів. Елемент забезпечує моделювання армуючих волокон з довільною орієнтацією, при цьому кожне волокно моделюється як окремий елемент з одновісною жорсткістю;
- для створення сітки арматури застосовувався допоміжний елемент MESH200.

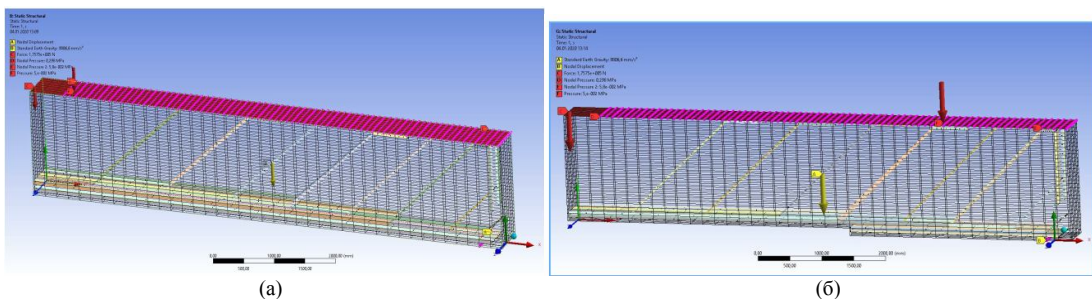


Рис. 8. FEM модель балки: (а) – до пошкодження; (б) – після пошкодження

Фізико-механічні характеристики матеріалів, використані в розрахунках, визначалися відповідно до результатів лабораторних випробувань та нормативних вимог.

Після аналізу конструктивних характеристик матеріалів, використаних при розрахунках, були прийняті вихідні дані для розрахунку.

Для бетону приймалися наступні параметри: модуль пружності - 22360 МПа, коефіцієнт Пуассона - 0,18, границя міцності на стиск - 41,0 МПа, границя міцності на розтяг - 5,0 МПа.

Для арматурної сталі класу А-II характеристики становили: модуль пружності - 200000 МПа, коефіцієнт Пуассона - 0,30, границя текучості на стиск - 250 МПа, границя міцності на розтяг - 490 МПа, границя текучості на розтяг - 295 МПа.

Результати аналізу напружено-деформованого стану

За результатами розрахунків отримані дані напружено деформованого стану бетону та арматури до та після пошкодження (рис. 9-11).

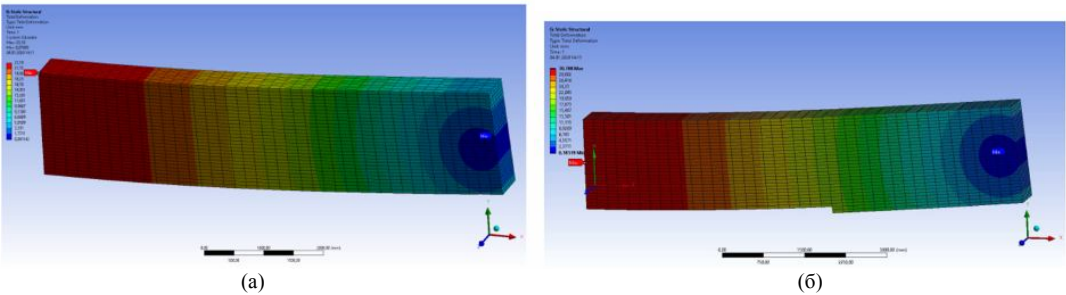


Рис. 9. Розрахункові деформації балки (а) - до пошкодження; (б) - після пошкодження

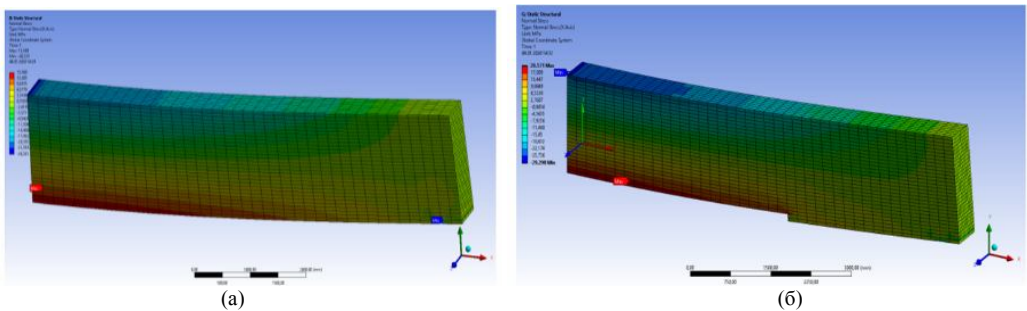


Рис. 10. Розподіл нормальних напружень в бетоні балки до пошкодження:
(а) - до пошкодження; (б) - після пошкодження

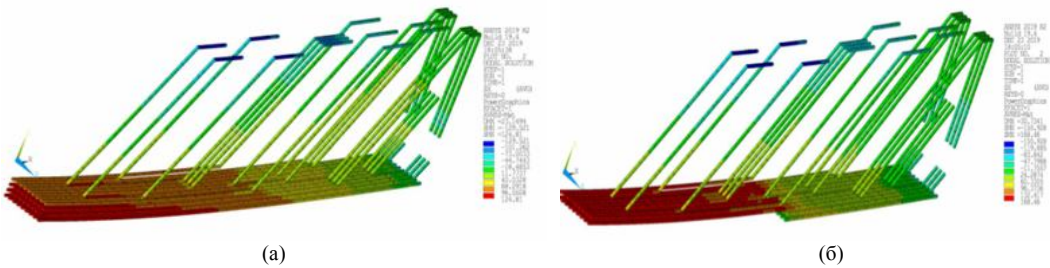


Рис.11. Розподіл нормальних напружень в арматурі балки:
(а) - до пошкодження; (б) - після пошкодження

Чисельне моделювання дозволило отримати детальну картину розподілу напружень та деформацій у конструкції до та після пошкодження.

Максимальні значення параметрів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Максимальні деформації та напруження в конструкції до та після пошкодження

Максимальні значення параметрів	до пошкодження	після пошкодження	Δ , %
прогин балки	23,18	30,8	32,9
нормальні напруження в бетоні			
розтяг	15	20	33,3
стиск	26,3	29,3	11,4
нормальні напруження в арматурі	127	168,5	32,7

Аналіз результатів розрахунків (табл. 1) показав, що максимальний прогин непошкодженої балки становить 23,18 мм, при цьому максимальні нормальні напруження в бетоні на розтяг не перевищують 15 МПа, а на стиск - 26,3 МПа. Напруження в арматурі становлять 127 МПа, що значно нижче границі текучості матеріалу.

Після моделювання пошкодження у вигляді обриву двох нижніх рядів арматури спостерігається суттєва зміна напружено-деформованого стану конструкції. Максимальний прогин збільшується до 30,8 мм (зростання на 32,9%), напруження розтягу в бетоні зростають до 20 МПа (збільшення на 33,3%), а напруження стиску - до 29,3 МПа (зростання на 11,4%). Найбільш критичним є збільшення напружень в арматурі до 168,5 МПа (зростання на 32,7%).

Незважаючи на значне збільшення напружень та деформацій, аналіз показав, що статична несуча здатність пошкодженої балки залишається достатньою для сприйняття проектних навантажень. Прогин конструкції не перевищує допустимих значень, а напруження в матеріалах знаходяться в межах розрахункових опорів.

Розробка схеми підсилення

Для запобігання подальшому розвитку пошкоджень, забезпечення довговічності конструкції та захисту арматури від корозії розроблена схема підсилення шляхом приклеювання до нижнього поясу балки шару однонаправленого вуглепластику Carbon fabric-tape-1000-12K-420.Ст-11083 товщиною 1 мм.

Застосовуваний вуглепластик характеризується наступними фізико-механічними властивостями (див. табл.1): модуль пружності в поздовжньому напрямку - 121000 МПа, в поперечному напрямку - 8600 МПа, границя міцності на розтяг в поздовжньому напрямку - 2231 МПа, що забезпечує високу ефективність підсилення.

Технологія підсилення передбачає попереднє відновлення бетонного покриття в зоні пошкодження нижнього поясу балки з подальшим приклеюванням вуглепластику високоякісними епоксидними складами.

Аналіз ефективності підсилення

FEM модель підсиленої балки наведено на (рис. 12).

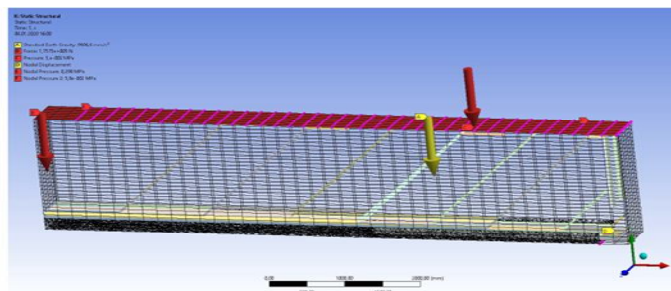


Рис. 12. Розрахункова модель підсиленої балки

Розподіл напружень та деформацій в бетоні та арматурі див рис. 13-14.

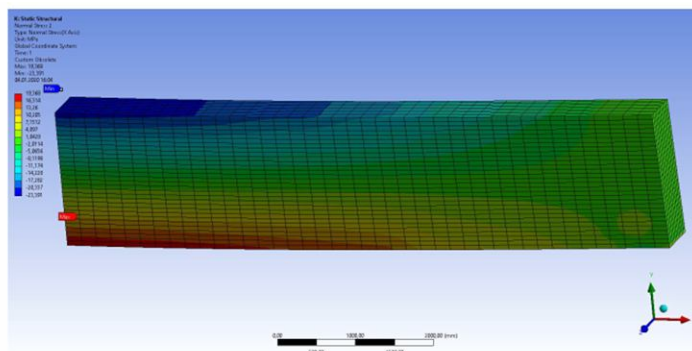


Рис. 13. Нормальні напруження в бетоні підсиленої балки

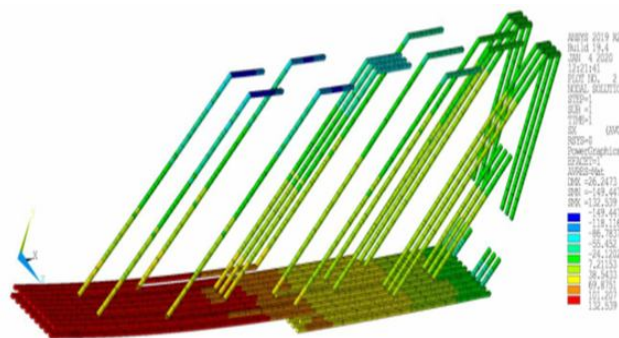


Рис. 14. Нормальні напруження в арматурі підсиленої балки

В таблиці 2 представлені параметри напружень та деформацій в бетоні та арматурі підсиленої балки.

Таблиця 2

Максимальні деформації та напруження в конструкції до та після підсилення

Максимальні значення параметрів	до пошкодження	після пошкодження	Δ , %
прогин балки	23,18	26,2	13,0
нормальні напруження в бетоні			
розтяг	15	19,36	29,1
стиск	26,3	23,39	11,1
нормальні напруження в арматурі	127	132,39	4,2

Аналіз отриманих даних показує, що результати чисельного моделювання підсиленої конструкції демонструють високу ефективність запропонованого рішення. Максимальний прогин підсиленої балки становить 26,2 мм, що перевищує значення для непошкодженої конструкції лише на 13,0% (проти 32,9% для непідсиленої пошкодженої балки) (див. табл. 2).

Напруження розтягу в бетоні знижуються до 19,36 МПа (збільшення відносно вихідного стану становить 29,1% проти 33,3% для непідсиленої конструкції). Напруження стиску в бетоні становлять 23,39 МПа, що на 11,1% менше значення для непошкодженої конструкції (див. табл. 2).

Найбільш значущим є зниження напружень в арматурі до 132,39 МПа, що перевищує вихідні значення лише на 4,2% (проти 32,7% для непідсиленої пошкодженої конструкції). Це свідчить про те, що вуглепластикове підсилення ефективно сприймає додаткові розтягуючі зусилля, розвантажуючи пошкоджену арматуру.

Аналіз напруженого стану елемента підсилення показав, що максимальні напруження у вуглепластику не перевищують 5% його несучої здатності, що свідчить про значні резерви міцності системи підсилення. Максимальні фрикційні напруження між балкою та елементом підсилення становлять 19 МПа, що вимагає застосування високоякісних епоксидних клеїв типу 3M Scotch-Weld 7240 B/A для забезпечення надійного зчеплення.

Висновок

Використання програмного комплексу ANSYS дає можливість виконати аналіз напружено-деформованого стану пошкодженої конструкції, виявити найбільш критичні зони та розробити оптимальну схему підсилення пошкоджених елементів на основі чисельного моделювання методом скінчених елементів для подальшого розрахунку підсилення залізобетонних елементів. Отримані результати досліджень демонструють значну ефективність використання композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна для відновлення несучої здатності пошкоджених залізобетонних конструкцій транспортних споруд. Запропонований підхід може бути використаний для практичного застосування в реконструкції та модернізації мостових споруд, забезпечуючи підвищення довговічності при експлуатації, а також ефективності ремонтних робіт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Sakhno S., Liulchenko Y., Chyryva T., Yanova L., Pischikova O.* Determination of Bearing Capacity and Calculation of the Gain of the Damaged Span of a Railway Overpass by the Finite Element Method (March 5, 2020). Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing. Multi-authored monograph. – Sofia: Publishing House "St.Ivan Rilski", 2020. – p.446 p., Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=3549150>
2. *Chirwa, T., Chirwa, T., Savchenko, A., Novickova, Y., & Ryzhykh, O.* (2017). Оцінка технічного стану і розробка способу посилення залізничного шляхопроводу в м. Запоріжжя. Будівельні конструкції. Теорія і практика, 1(1), 106–111. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.1.2017.106-111>
3. *Blikharskyi, Z., Vegera, V., Vashkevych, R., Shnal, T.*, 2018. Fracture toughness of RC beams on the shear, strengthening by FRCM system. MATEC web of conferences, 183, 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201818302009.
4. *Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L.* (2002). "FRP-strengthened RC structures." John Wiley & Sons, Chichester, UK.
5. *Hollaway, L.C., Teng, J.G. (Eds.)* (2008). "Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites." Woodhead Publishing, Cambridge, UK. DOI: 10.1533/9781845694890
6. *Neale, K.W., Labossière, P. (Eds.)* (1992). "Advanced composite materials in bridges and structures." Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada.
7. *Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafyllou, T.C.* (2002). "Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review." Journal of Composites for Construction, 6(2), 73-87. DOI 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)
8. *Barros, J.A.O., Fortes, A.S.* (2005). "Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits." Cement and Concrete Composites, 27(4), 471-480. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.004
9. *Bonacci, J.F., Maalej, M.* (2001). "Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP." Journal of Composites for Construction, 5(2), 102-113. DOI 10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:2(102)
10. *Täljsten, B.* (2006). "FRP strengthening of existing concrete structures: Design guidelines. (fourth edition)" Luleå University of Technology, Sweden. ISBN 91-89580-03-6
11. *Meier, U.* (2000). "Composite materials in bridge repair." Applied Composite Materials, 7(2-3), 75-94. DOI: 10.1023/a:1008919824535
12. *Hu, Z., Cao, M., Zhang, J., Wang, X.* (2020). "Review of Experimental Studies on Application of FRP for Strengthening of Bridge Structures." Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2020, Article ID 8682163.
13. *Feng, G., Zhu, D., Guo, S., Rahman, M.Z., Jin, Z., Shi, C.* (2022). "A Review on Mechanical Properties and Deterioration Mechanisms of FRP Bars under Severe Environments." Cement and Concrete Composites, Vol. 134, 104758.
14. *Ghorbani, M., Mostofinejad, D., Hosseini, A.* (2023). "Experimental Investigation on Bond Behavior of FRP Bars in Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete." Construction and Building Materials, Vol. 389, 131685.
15. *Zhang, D., Tan, K.H., Dasari, A., Weng, Y.* (2020). "Effect of Natural Weathering on Bond Durability of FRP Rebars in Concrete." Journal of Composites for Construction, Vol. 24, No. 4, 04020020.
16. *Al-Tamimi, A.K., Hawileh, R., Abdalla, J., Rasheed, H.A.* (2024). "Fiber-reinforced polymer (FRP) in concrete: A comprehensive survey." Construction and Building Materials, Vol. 408, 133636.
17. *Mahdi, A., Mehdipour, S., Khayat, K.H.* (2024). "State-of-the-Art Review on Structural Strengthening Techniques with FRPs: Effectiveness, Shortcomings, and Future Research Directions." Materials, Vol. 17, No. 6, 1408.
18. *Parvez, A., Foster, S.J.* (2023). "Fatigue behavior of steel-FRP composite bars under high cycle loading." Engineering Structures, Vol. 280, 115692.
19. *Wang, X., Shi, J., Liu, J., Yang, L., Wu, Z.* (2022). "Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressed concrete structures." Materials & Design, Vol. 214, 110389.
20. *Sciolti, M.S., Frigione, M., Aiello, M.A.*, (2010). "Wet lay-up manufactured FRPs for concrete and masonry repair: Influence of water on the properties of composites and on their epoxy components." Journal of Composites for Construction, Vol. 14, Issua 6, p. 823-833 DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000132
21. *Siddika, A., Mamun, M.A.A., Alyousef, R., Amran, Y.H.M.* (2020). "Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review." Engineering Failure Analysis, Vol. 111, 104480.
22. *Бліхарський, Я.З., Копійка, Н.С.* Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2019 (37), ст. 316-322. Blikharskyi Y.Z., Kopyika, N.S./ Research of damaged reinforced concrete elements, basic methods of their restoration and strengthening. Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures, 2019 (37), pages. 316-322.
23. *Бамбура А.М., Сазонова І.Р., Собко Ю.М.* Підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами фірми Sika. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Дніпро: ПДАБА, 2014. Вип. 77. С. 8-12.
24. *Кожушко В.П., Сова Я.І., Воронова Є.М.* Актуальність застосування композитних матеріалів для посилення залізобетонних балок прогонових будов мостів. Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, 2018. Вип. 93 (3). С. 137-143.
25. *Mand Kamal Askar, Ali Falyeh Hassan, Yaman S.S. Al-Kamaki,* Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art, Case Studies in Construction Materials, Volume 17, 2022, e01189, p.1-28 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01189>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522003217>)
26. *Barabash, Maria & Gencerskyi, I. & A.V., A & Bashynska, O.* (2017). Methods of modeling of composite materials and composite structures on «LIRA-SAPR». Academic Journal Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. 1. 129-137. 10.26906/zmp.2017.48.786.

REFERENCES

1. *Sakhno S., Liulchenko Y., Chyryva T., Yanova L., Pischikova O.* Determination of Bearing Capacity and Calculation of the Gain of the Damaged Span of a Railway Overpass by the Finite Element Method (March 5, 2020). Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing. Multi-authored monograph. – Sofia: Publishing House “St.Ivan Rilski”, 2020. – p.446 p., Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=3549150>
2. *Chirwa, T., Chirwa, V., Savchenko, A., Novickova, Y., & Ryzhykh, O. (2017).* Otsinka tekhnichnoho stanu i rozrobka sposobu posylennia zaliznychnoho shliakhoprovodu v m. Zaporizhzhia. Budivelni konstruktzii. Teoriia i praktyka, 1(1), 106–111. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.1.2017.106-111>
3. *Blikharskyi, Z., Vegera, P., Vashkevych, R., Shnal, T., (2018).* Fracture toughness of RC beams on the shear, strengthening by FRCM system. MATEC web of conferences, 183, 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201818302009.
4. *Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L. (2002).* "FRP-strengthened RC structures." John Wiley & Sons, Chichester, UK.
5. *Hollaway, L.C., Teng, J.G. (Eds.) (2008).* "Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites." Woodhead Publishing, Cambridge, UK. DOI: 10.1533/9781845694890
6. *Neale, K.W., Labossiere, P. (Eds.) (1992).* "Advanced composite materials in bridges and structures." Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada.
7. *Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafyllou, T.C. (2002).* "Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review." Journal of Composites for Construction, 6(2), 73-87. DOI 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)
8. *Barros, J.A.O., Fortes, A.S. (2005).* "Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits." Cement and Concrete Composites, 27(4), 471-480. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.004
9. *Bonacci, J.F., Maalej, M. (2001).* "Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP." Journal of Composites for Construction, 5(2), 102-113. DOI 10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:2(102)
10. *Täljsten, B. (2006).* "FRP strengthening of existing concrete structures: Design guidelines. (fourth edition)" Luleå University of Technology, Sweden. ISBN 91-89580-03-6
11. *Meier, U. (2000).* "Composite materials in bridge repair." Applied Composite Materials, 7(2-3), 75-94. DOI: 10.1023/a:1008919824535
12. *Hu, Z., Cao, M., Zhang, J., Wang, X. (2020).* "Review of Experimental Studies on Application of FRP for Strengthening of Bridge Structures." Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2020, Article ID 8682163.
13. *Feng, G., Zhu, D., Guo, S., Rahman, M.Z., Jin, Z., Shi, C. (2022).* "A Review on Mechanical Properties and Deterioration Mechanisms of FRP Bars under Severe Environments." Cement and Concrete Composites, Vol. 134, 104758.
14. *Ghorbani, M., Mostofinejad, D., Hosseini, A. (2023).* "Experimental Investigation on Bond Behavior of FRP Bars in Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete." Construction and Building Materials, Vol. 389, 131685.
15. *Zhang, D., Tan, K.H., Dasari, A., Weng, Y. (2020).* "Effect of Natural Weathering on Bond Durability of FRP Rebars in Concrete." Journal of Composites for Construction, Vol. 24, No. 4, 04020020.
16. *Al-Tamimi, A.K., Hawileh, R., Abdalla, J., Rasheed, H.A. (2024).* "Fiber-reinforced polymer (FRP) in concrete: A comprehensive survey." Construction and Building Materials, Vol. 408, 133636.
17. *Mahdi, A., Mehdi pour, S., Khayat, K.H. (2024).* "State-of-the-Art Review on Structural Strengthening Techniques with FRPs: Effectiveness, Shortcomings, and Future Research Directions." Materials, Vol. 17, No. 6, 1408.
18. *Parvez, A., Foster, S.J. (2023).* "Fatigue behavior of steel-FRP composite bars under high cycle loading." Engineering Structures, Vol. 280, 115692.
19. *Wang, X., Shi, J., Liu, J., Yang, L., Wu, Z. (2022).* "Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressed concrete structures." Materials & Design, Vol. 214, 110389.
20. *Sciolti, M.S., Frigione, M., Aiello, M.A., (2010).* "Wet lay-up manufactured FRPs for concrete and masonry repair: Influence of water on the properties of composites and on their epoxy components." Journal of Composites for Construction, Vol. 14, Issue 6, p. 823-833 DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000132
21. *Siddika, A., Mamun, M.A.A., Alyousef, R., Amran, Y.H.M. (2020).* "Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review." Engineering Failure Analysis, Vol. 111, 104480.
22. *Blikharskyi Y.Z., Kopyika, N.S.* Doslidzhennia poshkodzhennykh zalizobetonnykh elementiv, osnovni metody yikh vidnovlennia ta pidsylennia (Research of damaged reinforced concrete elements, basic methods of their restoration and strengthening) - Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures, 2019 (37), pages. 316-322.
23. *Bambura A.M., Sazonova I.R., Sobko Yu.M.* Pidsylennia zalizobetonnykh konstruktzii kompozytnymy materialamy firmy Sika. Budivnytstvo (Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials from Sika). - Materialoznavstvo. Mashynobudu-vannia. Dnipro: PDABA, 2014. Vyp. 77. S. 8-12.
24. *Kozhushko V.P., Sova Ya.I., Voronova Ye.M.* Aktualnist zastosuvannia kompozytnykh materialiv dlia posylennia zalizobetonnykh balok prohonovykh budov mostiv (The relevance of the use of composite materials for strengthening reinforced concrete beams of bridge spans) - Naukovyi visnyk budivnytstva. Kharkiv: KhNUBA, 2018. Vyp. 93 (3). S. 137-143.
25. *Mand Kamal Askar, Ali Falyeh Hassan, Yaman S.S. Al-Kamaki.* Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art, Case Studies in Construction Materials, Volume 17, 2022, e01189, p.1-28 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01189>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522003217>)
26. *Barabash, Maria & Genzerskyi, I. & A.V., A & Bashynska, O. (2017).* Methods of modeling of composite materials and composite structures on «LIRA-SAPR». Academic Journal Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. 1. 129-137. 10.26906/zmp.2017.48.786.

Чирва Т.Л., Колякова В.М.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОШКОДЖЕНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ШЛЯХОПРОВОДУ ТА ЙОГО ПІДСИЛЕННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Дослідження присвячене проблемі підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій транспортних споруд з використанням сучасних композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна (CFRP). На прикладі залізничного шляхопроводу Запорізького заводу феросплавів виконано детальне дослідження напружено-деформованого стану елементів до та після виникнення дефектів із залученням методу скінченних елементів у програмному середовищі ANSYS. Виявлено, що руйнування у формі обриву двох нижніх рядів поздовжньої арматури спричиняє зростання прогину балки на 32,9%, напружень розтягу в бетоні на 33,3% та напружень в арматурі на 32,7%.

Розроблено методику підсилення через приклеювання до нижнього поясу балки односпрямованого вуглепластику товщиною 1 мм з модулем пружності 121000 МПа та межею міцності на розтяг 2231 МПа. Отримані результати числового моделювання підсиленої конструкції засвідчують високу ефективність запропонованого підходу: прогин підсиленої балки перевищує параметри для неушкодженої конструкції лише на 13,0%, а напруження в арматурі збільшуються тільки на 4,2%. Максимальні напруження у вуглепластику не досягають 5% його граничної міцності, що вказує на суттєві запаси несучої здатності системи підсилення та обґрунтованість використання композитних матеріалів для відновлення працездатності пошкоджених залізобетонних елементів.

Виконаний огляд міжнародного досвіду використання FRP-композитів у будівельній галузі виявив переваги підсилених конструкцій порівняно з традиційними методами відновлення: ефективне виконання робіт, мінімальне навантаження від власної ваги, високі показники міцності, опірність корозії та впливу агресивних середовищ, збереження габаритів елементів та швидке відновлення експлуатаційних характеристик. Дослідження обґрунтовує доцільність застосування вуглецевих композитних матеріалів для реконструкції та підсилення об'єктів транспортної інфраструктури України за умов обмежених фінансових ресурсів та потреби у скороченні термінів виконання будівельних робіт.

Ключові слова: підсилення залізобетонних конструкцій, композитні матеріали, вуглецеве волокно, CFRP, метод скінченних елементів, транспортні споруди, шляхопровід, напружено-деформований стан, вуглепластик, реконструкція мостів.

Chyrya T.L., Koliakova V.M.

STRESS-STRAIN STATE OF A DAMAGED RAILWAY OVERPASS AND ITS STRENGTHENING WITH CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC MATERIALS

The research addresses the problem of strengthening damaged reinforced concrete structures of transportation facilities using modern composite materials based on carbon fiber (CFRP). Using the railway overpass of the Zaporizhzhia Ferroalloy Plant as an example, a detailed investigation of the stress-strain state of structural elements before and after damage occurrence was conducted using the finite element method in the ANSYS software environment. It was revealed that failure in the form of rupture of two lower rows of longitudinal reinforcement causes an increase in beam deflection by 32.9%, tensile stresses in concrete by 33.3%, and stresses in reinforcement by 32.7%.

A strengthening methodology was developed through bonding unidirectional carbon fiber reinforced plastic with a thickness of 1 mm, elastic modulus of 121,000 MPa, and tensile strength of 2,231 MPa to the bottom flange of the beam. The obtained results of numerical modeling of the strengthened structure demonstrate high efficiency of the proposed approach: the deflection of the strengthened beam exceeds the parameters for the undamaged structure by only 13.0%, while stresses in the reinforcement increase by only 4.2%. Maximum stresses in the carbon fiber reinforced plastic do not reach 5% of its ultimate strength, indicating significant load-carrying capacity reserves of the strengthening system and justifying the use of composite materials for restoring the serviceability of damaged reinforced concrete elements.

The conducted review of international experience in the use of FRP composites in the construction industry revealed advantages of strengthened structures compared to traditional restoration methods: efficient work execution, minimal dead load, high strength characteristics, resistance to corrosion and aggressive environments, preservation of element dimensions, and rapid restoration of operational characteristics. The research substantiates the feasibility of applying carbon fiber composite materials for reconstruction and strengthening of transportation infrastructure facilities in Ukraine under conditions of limited financial resources and the need to reduce construction work duration.

Keywords: reinforced concrete structure strengthening, composite materials, carbon fiber, CFRP, finite element method, transportation structures, overpass, stress-strain state, carbon fiber reinforced plastic, bridge reconstruction.

УДК 624.21

Чирва Т.Л., Колякова В.М. Напружено-деформований стан пошкодженого залізничного шляхопроводу та його підсилення вуглепластиковими матеріалами // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2025. – Вип. 115. – С. 345-359. – Укр.

Наведено результати дослідження підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій транспортних споруд з використанням сучасних композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна (CFRP). Розглянуто напружено-деформований стан елементів залізничного шляхопроводу Запорізького заводу феросплавів до та після виникнення дефектів у формі обриву поздовжньої арматури із залученням методу скінченних елементів у програмному середовищі ANSYS. Достовірність методу підтверджена порівнянням результатів числового моделювання з фактичним станом конструкції, що показало значне зростання прогинів та напружень у пошкодженій балці. Розроблена методика підсилення через приклеювання односпрямованого вуглепластику до нижнього поясу балки демонструє високу ефективність відновлення несучої здатності конструкції. Доведена доцільність застосування композитних матеріалів для відновлення працездатності пошкоджених залізобетонних елементів транспортної інфраструктури базується на результатах чисельного аналізу, який показав суттєве зниження напружень та деформацій у підсиленій конструкції при збереженні значних резервів міцності системи підсилення.

Іл. 14. Бібліогр. 26 назв.

UDC 624.04

Chyrva T.L., Koliakova V.M. Stress-strain state of a damaged railway overpass and its strengthening with carbon fiber reinforced plastic materials // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. 2025. – Issue 115. – P. 347-359.

The results of research on strengthening damaged reinforced concrete structures of transportation facilities using modern composite materials based on carbon fiber (CFRP) are presented. The stress-strain state of structural elements of the railway overpass of the Zaporizhzhia Ferroalloy Plant before and after damage occurrence in the form of longitudinal reinforcement rupture was examined using the finite element method in the ANSYS software environment. The reliability of the method was confirmed by comparing numerical modeling results with the actual structural condition, which showed significant increase in deflections and stresses in the damaged beam. The developed strengthening methodology through bonding unidirectional carbon fiber reinforced plastic to the bottom flange of the beam demonstrates high efficiency in restoring the load-carrying capacity of the structure. The conclusion regarding the feasibility of applying composite materials for restoring the serviceability of damaged reinforced concrete elements of transportation infrastructure is based on the results of numerical analysis, which showed substantial reduction of stresses and deformations in the strengthened structure while maintaining significant strength reserves of the strengthening system.

Fig. 14. Ref. 26.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри архітектурних конструкцій КНУБА, ЧИРВА Тетяна Леонідівна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail: chyrva.tl@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6657-5443>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій КНУБА, КОЛЯКОВА Віра Маркусівна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail: koliakova.vm@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-8520>