

УДК 624.21

Мінюкова А. Д.¹, <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>Сташук П. М.², канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>¹Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна²Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗОВНІШНЬОГО ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОГО АРМУВАННЯ ДЛЯ ПІДСИЛЕННЯ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація

Вступ. Залізобетонні мостові конструкції зазнають значних навантажень у процесі експлуатації, що призводить до їх фізичного зносу, утворення тріщин та поступового зниження несної здатності. Одним із методів продовження терміну служби мостів без їхньої повної реконструкції є використання зовнішнього попереднього напруженого армування, яке дозволяє підвищити жорсткість конструкції та рівномірно розподілити навантаження, мінімізуючи деформації.

Проблематика. Більшість мостів, що експлуатуються в Україні, були збудовані в 60-80-х роках ХХ століття відповідно до нормативних вимог того періоду. Проектні навантаження та інтенсивність руху, передбачені під час їх будівництва, значно нижчі за сучасні реальні умови. Зростання інтенсивності руху, поява великовагового транспорту та фізичне старіння матеріалів призводять до перевантаження мостів, що викликає деформації прогонових будов, збільшення прогинів, появу тріщин у бетоні, корозію арматури, зниження жорсткості конструкцій та значні витрати на капітальний ремонт.

Мета. Оцінити ефективність застосування зовнішнього попереднього напруженого армування для підвищення довговічності залізобетонних мостових конструкцій на основі експериментальних даних.

Результати. Дослідження показало, що застосування методу зовнішнього попереднього напруженого армування зменшує розтягувальні напруження у бетоні, що підвищує тріщиностійкість конструкції, підвищує жорсткість мосту та забезпечує стабільність анкерних блоків, що підтверджує надійність кріплення натягнутих елементів. Використання зовнішнього попереднього напруженого армування дозволяє підвищити клас навантаження мосту без необхідності його капітальної реконструкції.

Висновки. Застосування зовнішнього попереднього напруженого армування є ефективним рішенням для відновлення та продовження експлуатації залізобетонних мостових конструкцій. Метод дозволяє рівномірно перерозподілити навантаження, зменшити деформації та підвищити довговічність конструкції без значних фінансових витрат. Для досягнення максимального ефекту необхідно проводити інженерний моніторинг стану мосту, моделювання напружено-деформованого стану та контроль якості робіт при натягу арматурних пучків.

Ключові слова: довговічність залізобетонних конструкцій, зовнішнє попереднє напруження, напружено-деформований стан, підсилення мостів, реконструкція мостів.

Вступ

Мости відіграють ключову роль у транспортній інфраструктурі, однак із часом їх експлуатаційні характеристики погіршуються через втомні процеси, корозію арматури, збільшення інтенсивності руху та маси транспортних засобів. Відбувається фізичне зношення, що обмежує термін їх служби. Бетонні конструкції поступово деградують внаслідок зносу матеріалів, надмірних навантажень та інших факторів навколишнього середовища, а їх початкові характеристики поступово погіршуються, що впливає на довговічність та безпеку конструкцій. Крім фізичного зносу, відбувається моральне відставання мостів від зростаючих вимог транспорту в зв'язку зі збільшенням нормативних розрахункових навантажень і швидкостей руху [1, 2, 3]. Особливо це стосується мостів

з попередньо напруженого бетону, де було зафіксовано випадки руйнування конструкції через корозію сталевих тросів або канатів, які є частиною попередньо натягнутих елементів. Ці троси прокладаються всередині бетонної конструкції і піддаються попередньому натягу для підвищення її несної здатності та зниження тріщиноутворення. Корозія цих елементів може значно ослабити конструкцію, що підкреслює важливість регулярного технічного обслуговування [4, 5, 6].

Необхідність в посиленні виникає внаслідок недостатньої несної здатності конструкції моста через фізичний знос або невідповідності збільшеним вимогам вантажопідйомності. Посилення виробляють окремих елементів або всього моста, зберігаючи незмінними габарити мосту. Своєчасне посилення або реконструкція мостів дозволяють збільшити їх термін служби.

Метод зовнішнього попереднього напруження є одним із методів зміцнення зношених мостів, який збільшує несну здатність існуючої конструкції шляхом встановлення арматури на зовнішню зону розтягування конструкції та безпосередньо зусилля натягу. Метод широко використовується завдяки таким перевагам, як запобігання корозії арматурних стержнів і відновлення прогину шляхом закриття тріщин у зоні розтягування [7].

Основна частина

Метод зовнішнього попереднього напруженого армування можна застосовувати як до звичайного залізобетону, так і до попередньо напруженого залізобетону. Проте ефект і мета його використання будуть дещо різними залежно від типу конструкції.

Для звичайного залізобетону основною проблемою є утворення тріщин у зоні розтягування, що значно знижує довговічність конструкції. Це відбувається через нерівномірний розподіл напружень, що призводить до поступового руйнування матеріалу. Зовнішнє попередньо напружене армування дозволяє перерозподілити напруження таким чином, що зовнішні натягнуті елементи створюють стиск у розтягненій зоні, зменшуючи розтягувальні напруження і знижуючи ризик тріщиноутворення. Завдяки цьому конструкція стає більш стійкою до навантажень і довговічною. Такий підхід значно підвищує несну здатність прогонової будови і продовжує строк служби моста без необхідності заміни елементів.

У конструкціях, що вже мають попереднє напруження, з часом може відбутися релаксація напружень у арматурі або зменшення ефективного попереднього напруження через повзучість і усадку бетону. Це призводить до втрати несної здатності та підвищеного ризику пошкоджень. Зовнішнє попередньо напружене армування допомагає відновити і збільшити початковий рівень напружень, що запобігає перевантаженню конструкції та її подальшому руйнуванню. Цей метод широко застосовується під час реконструкції мостів, які втратили свої проєктні характеристики, дозволяючи ефективно продовжити їхній строк експлуатації.

Зовнішнє попередньо напружене армування є особливо ефективним для підсилення старих конструкцій, зокрема звичайних залізобетонних мостів, що мають ознаки пошкодження. Для нових конструкцій, де спочатку застосовується попереднє напруження, зовнішнє попередньо напружене армування може використовуватися для підвищення запасу міцності або адаптації конструкцій до збільшених навантажень. Таким чином, метод зовнішнього попереднього напруженого армування можна застосовувати для обох типів залізобетону, але з різною метою: для компенсації слабких місць звичайного залізобетону або для підсилення вже напружених конструкцій.

Підсилення конструкцій виконується відповідно до норм [8] і розраховується за граничними станами першої та другої груп.

Граничний стан конструкції — це такий неприпустимий стан, при якому вона перестає відповідати експлуатаційним вимогам. Розрахунок за методикою граничних станів дозволяє гарантувати, що під час будівництва або експлуатації не буде досягнуто жодного з цих станів. Граничні стани поділяються на дві групи.

До першої групи належать стани, при яких конструкція стає повністю непридатною для подальшої експлуатації. Це може статися через втрату несної здатності споруди (підгрупа 1-А) або через значні деформації матеріалу, повзучість бетону, надмірне утворення тріщин (підгрупа 1-Б), що робить подальшу експлуатацію неможливою. Для запобігання цим станам проводяться розрахунки на міцність і витривалість прогонових будов.

Граничні стани другої групи не вимагають припинення експлуатації конструкції, проте можуть суттєво ускладнювати її використання через значні переміщення, неприпустиме розкриття тріщин у бетоні або інші дефекти. Щоб уникнути цих проблем, проводяться розрахунки на утворення, розкриття та закриття тріщин, а також на деформації (прогини) прогонових будов.

Розглянемо практичний приклад. Під час капітального ремонту мосту через Русанівську протоку виконувався науково-технічний супровід та інструментальні вимірювання натягу пучків канатів зовнішнього попереднього напруженого армування.

Міст через Русанівську протоку був побудований у 1964 році та після понад 60 років експлуатації зазнав значного фізичного зносу. Міст розрахований на пропуск 2-х смуг метропоїздів (по одному в кожному напрямку), 4-х смуг автомобільного руху (по дві у кожному напрямку) з габаритом їздового полотна 14 м і одного тротуару, шириною 2,2 м. Міст розрахований на пропуск навантаження Н-18, НК-80 за нормами СН 200-62. Основні геометричні характеристики автодорожньої частини моста:

- повна довжина – 348,2 м;
- ширина проїзної частини – 14,0 м;
- ширина тротуару – 2,2 м;
- геометрична схема – $11,36 + 2 \times 52,30 + 52,9 + 51,7 + 2 \times 52,3 + 11,36$ м.

В плані міст розташований на прямій. Прогонові будови 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 і 6-7 довжиною 52,3 м складаються з членованих по довжині коробчастих балок із сухими стиками за індивідуальним проектом. Блоки виготовлені методом відбитку, стягнуті насухо попередньо напруженою високоміцною арматурою. Балки для проїзду автомобільного транспорту об'єднані між собою по плиті проїзної частини. Матеріал прогонових будов — бетон марки М-500, напружена арматура — пучки за ЧМТУ/ЦНИИЧМ 65-58, звичайна арматура — ВСт5 ГОСТ 380-60, ГОСТ 5781-58 і ВСт3 ГОСТ 380-60, ГОСТ 2590-57. Кожна коробчаста балка складається з 17 збірних блоків, які поєднуються між собою по всій довжині прогону. Кожен блок складається з нижньої плити, 2-х вертикальних стінок і верхньої плити з вутами. Пучки напруженої арматури, розташовані відкрито всередині коробок і в подальшому омонолічені бетоном.

Зміст роботи полягав у контролі напружено-деформованого стану балки прогонової будови та анкерних ділянок на стадії натягу додаткового напруженого армування. Вимірювання місцевих деформацій на стиснених та розтягнених гранях балок прогонової будови у трьох перерізах (1/2 та 1/4 довжини прогону) при роботах із натягу нових пучків напруженого армування з визначенням зміни напружень обтиснення бетону, порівняння результатів із розрахунками. Вимірювання будівельного підйому (прогину) балок прогонової будови у трьох перерізах (1/2 та 1/4 довжини прогону) при роботах із натягу нових пучків напруженого армування із використанням високоточного вимірювального обладнання, порівняння результатів із розрахунками.

Процес натягу пучків канатів у мостових конструкціях — це технологічна операція, яка використовується в методі зовнішнього попереднього напруження для підсилення мостових конструкцій. Вона полягає у прикладенні напруження до зовнішніх арматурних елементів (канатів, тросів, стрижнів), які закріплюються на кінцях прогонових будов або через анкерні пристрої. Основна мета — зменшити розтягувальні напруження в бетоні та підвищити несну здатність конструкції, шляхом перерозподілу внутрішніх сил. Процес включає встановлення анкерних блоків і закріплення канатів (пучків арматури). Канати закріплюють в анкерних блоках, які зазвичай монтують на кінцях прогонів або на спеціальних консолях моста. Для підсилення використовують пучки з кількох сталевих канатів. Вони можуть бути:

- Зовнішніми — встановленими поза конструкцією моста.
- Внутрішніми — розміщеними в спеціальних каналах у бетоні.

Вимірювання місцевих деформацій на стиснених та розтягнених гранях балок прогонової будови у трьох перерізах (1/2 та 1/4 довжини прогону) при натягуванні пучків канатів виконували із використанням програмно-технічного комплексу НВМ (Німеччина). В якості первинного перетворювача використовувати тензорезистори з базою вимірювання 100 мм. Точність вимірювання місцевих деформацій складає $\pm 1 \times 10^{-6}$ відносних одиниць.

Схема розташування точок вимірювання місцевих деформацій в поперечному перерізі балки представлена на **рис. 1**.

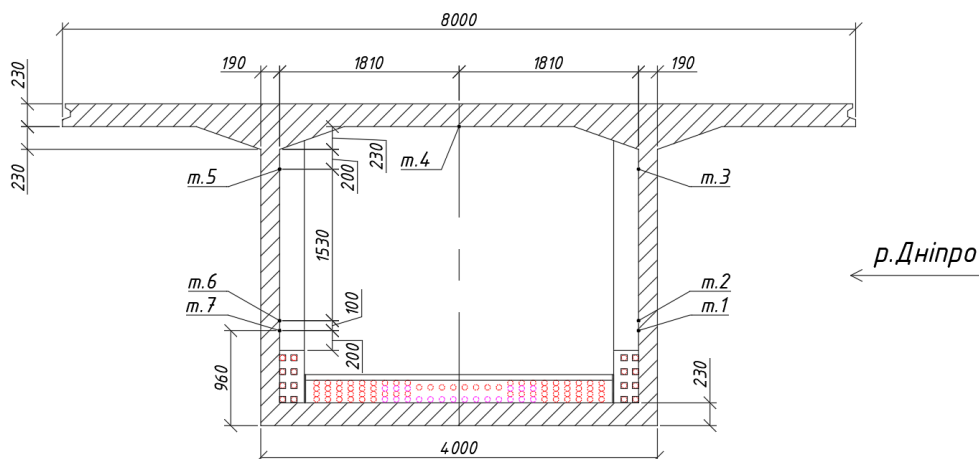


Рисунок 1 — Схема розташування точок вимірювання місцевих деформацій в поперечному перерізі балки

Вимірювання будівельного підйому (прогину) балок прогонової будови в $\frac{1}{2}$ довжини прогону під час натягування пучків канатів виконували із використанням цифрового нівеліру SOKIA SDL50 (рис. 2). Для вимірювання нівелір встановлювали у сусідньому прогоні.



а)



б)

Рисунок 2 — Цифровий нівелір SOKIA SDL50 для вимірювання будівельного підйому встановлений у балці сусідньої прогонової будови

Вимірювання деформацій зсуву на анкерних блоках прогонових будов під час натягування пучків канатів виконували із використанням механічних мікроіндикаторів з ціною поділки 0,001 мм, встановлених на штативах висотою 500 мм, що були нерухомо заанкерені в «старий» бетон анкерних блоків (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3 — Вимірювання деформацій зсуву на анкерних блоках прогонових будов

Результати інструментальних досліджень деформацій прогонової будови під час натягування пучків канатів. Результати вимірювання будівельного підйому (прогину) в 1/2 довжини прогонів 1-2, 2-3 при натягуванні пучків канатів представлено на **рис. 4** та **рис. 5**.

Згідно результатів інструментальних вимірювань, загальний будівельний підйом балки 1 від натягу пучків канатів в прогоні 1-2 становить 6 мм, а в прогоні 2-3 — 9 мм. Будівельний підйом — це показник зміни геометрії конструкції внаслідок напруженого стану після натягу зовнішньої арматури. Збільшення будівельного підйому підтверджує, що після натягування пучків жорсткість конструкції зросла та збільшилась тріщиностійкість. Менший прогин означає менше навантаження на бетон, що сприяє зниженню ризику утворення тріщин. Величина підйому корелює з жорсткістю балки: чим вищий підйом, тим ефективніше працює натягнуте зовнішнє армування.

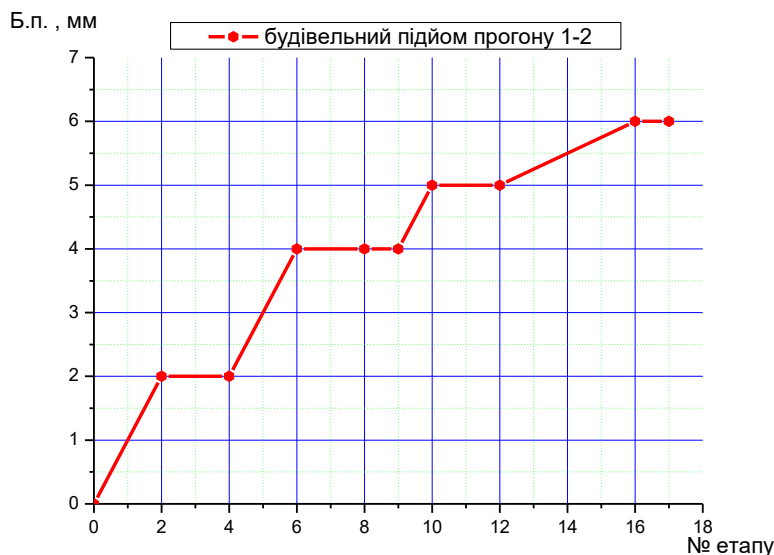


Рисунок 4 — Графік зміни будівельного підйому в 1/2 довжини прогону 1-2 балки 1 на етапах натягу пучків канатів

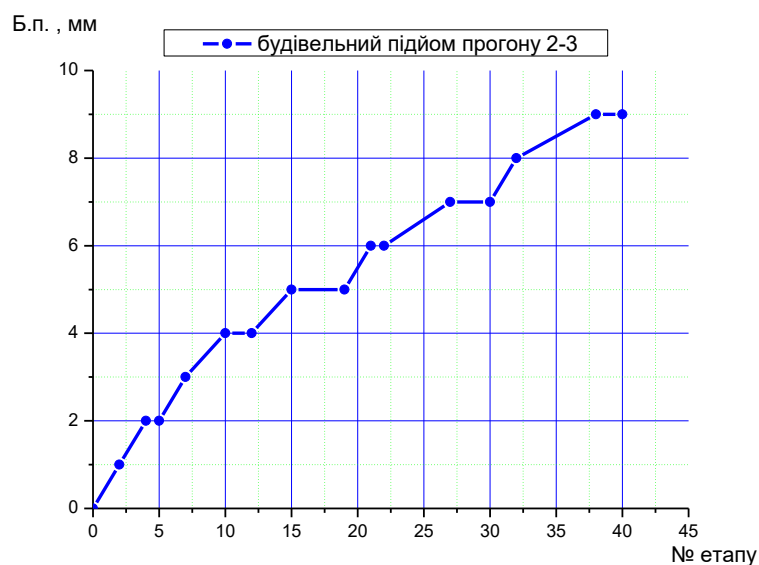
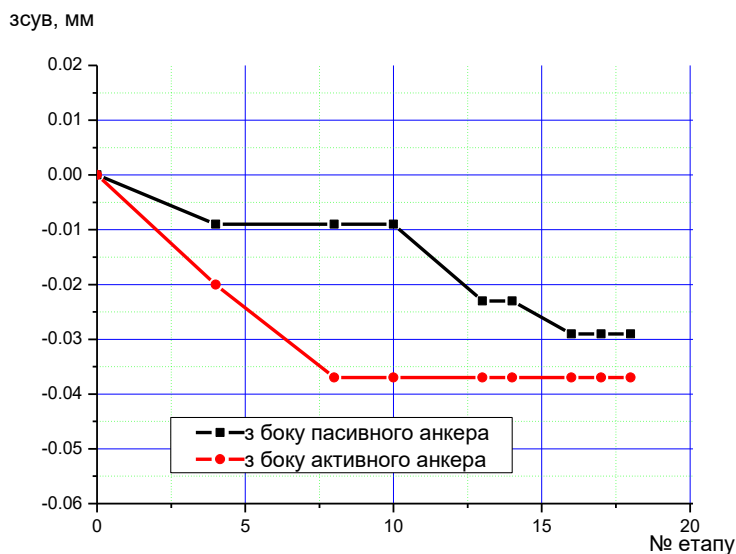
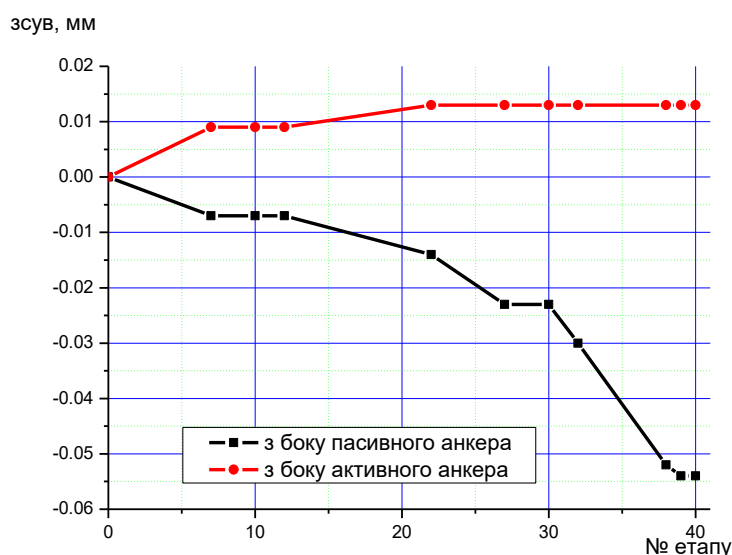


Рисунок 5 — Графік зміни будівельного підйому в 1/2 довжини прогону 2-3 балки 1 на етапах натягу пучків канатів

Аналіз деформацій зсуву на анкерних блоках. Анкерні блоки є критичними елементами в системі зовнішнього попереднього напруження, оскільки вони закріплюють натягнуті канати. Будь-які значні зсуви або зміщення анкерів можуть свідчити про недостатню жорсткість кріплення або ризик втрати напруженого стану. На графіку **рис. 6 (а, б)** представлені результати вимірювання деформацій зсуву на анкерних блоках прогонових будов при натягуванні пучків канатів прогонах 1-2 і 2-3.



а)



б)

Рисунок 6 — Графік зміни деформацій зсуву на анкерних блоках прогонової будови 1-2 (а) і прогонової будови 2-3 (б)

Величина зсуву залишається в межах нормативних допусків, що свідчить про стабільність анкерів після натягування. Незначні деформації анкерних блоків вказують на надійність кріплення пучків канатів і підтверджують ефективність їх передачі зусилля на балкову конструкцію. Відсутність критичних зміщень свідчить, що зовнішнє попереднє напруження не спричинило небажаних локальних деформацій у місцях закріплення канатів.

Результати випробувань підтвердили ефективність методу зовнішнього попереднього напруження та правильність прийнятих проектних рішень при капітальному ремонті споруди, оскільки після натягування пучків канатів відбулося зменшення розтягувальних напружень у бетоні, що суттєво покращило тріщиностійкість конструкції та знизило ризик її передчасного руйнування. Графіки будівельного підйому показали, що жорсткість мосту зросла, а прогини в середній частині прогонів зменшилися на 6–9 мм, що позитивно впливає на його експлуатаційну надійність. Водночас вимірювання деформацій анкерних блоків довели, що кріплення натягнутих канатів залишається стабільним і не зазнало критичних зміщень, що підтверджує надійність конструкції після підсилення. Зменшення напружень у бетоні, рівномірний розподіл деформацій та підвищення жорсткості дозволяють не лише продовжити строк служби мосту, а й адаптувати його до підвищених навантажень, що є вагомим аргументом для використання цього методу в реконструкції інших інфраструктурних об'єктів.

Висновки

У зв'язку зі зростанням навантаження на транспортні споруди та фізичним зношенням мостів, застосування методу зовнішнього попередньо напруженого армування є ефективним рішенням для продовження терміну служби мостових конструкцій. Метод зовнішнього попередньо напруженого армування дозволяє збільшити клас навантаження мостів за рахунок перерозподілу напружень. Для цього використовується попередньо напружена арматура, яка: зменшує розтягувальні напруження в бетоні, знижуючи ризик утворення тріщин; збільшує жорсткість конструкції, зменшуючи прогини при дії транспортних навантажень; підвищує опір динамічним навантаженням, що особливо важливо для мостів з інтенсивним рухом.

Використання методу зовнішнього попереднього напруження є перспективним способом посилення зношених бетонних мостів, що дозволяє значно підвищити їхню несну здатність та продовжити строк служби. Метод може бути рекомендований для мостів із напруженим станом балок, які зазнали значного фізичного зносу без руйнування несних елементів. Однак для досягнення максимального ефекту важливо проводити комплексний аналіз конструкції до і після зміцнення, використовуючи сучасні методи комп'ютерного моделювання, а також забезпечувати регулярний моніторинг і обслуговування конструкцій.

Список літератури

1. Jung, W. T., Park, J. S., Kang, J. Y., Park, H. B. Strengthening effect of prestressed near-surface-mounted CFRP tendon on reinforced concrete beam. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018, 9210827.
2. Park, H. B., Park, J. S., Kang, J. Y., Jung, W. T. Fatigue Behavior of Concrete Beam with Prestressed Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement According to the Strength and Developed Length. *Materials* 2019, 12, 51.
3. Jung, W. T., Park, J. S., Kang, J. Y., Keum, M. S. Flexural behavior of concrete beam strengthened by near-surface mounted CFRP reinforcement using equivalent section model. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017, 2017, 1–16.
4. Kim, S. H., Park, S. Y., Park, Y. H., Jeon, S. J. Friction characteristics of post-tensioning tendons in full-scale structures. *Eng. Struct.* 2019, 183, 389–397.
5. Kim, S. H., Park, S. Y., Jeon, S. J. Long-term characteristics of prestressing force in post-tensioned structures measured using smart strand. *Appl. Sci.* 2020, 10, 4084.
6. Potson, R. W., Frank, K. H., West, J. S. Enduring strength. *Civ. Eng. ASCE* 2003, 73, 58–63.
7. Lee, B. J. Park, J. K., Kim, M. Y., Shin, H. M., Park, C. H. Experimental study on flexural behavior of PSC I girder and the effect of external prestressing. *J. Korea Concr. Inst.* 2007, 19, 755–762.
8. ДБН В.2.3-14:2006 Мости та труби. Правила проектування. Київ, 2006. 48 с. (Інформація та документація).
9. РВ.3.2-03450778-832:2013 Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи). Київ, 2013.

10. РВ.3.2-218-03450778-741:2008 Рекомендації з підсилення конструкцій мостів під навантаженням, в т.ч. з регулюванням зусиль. Київ, 2008.
11. Більченко А. В., Кіслов О. Г., Синьковська О. В., Ігнатенко А. В. Довговічність залізобетонних конструкцій є основою життєвого циклу мостових споруд. *Дороги і мости*, 2015. С. 25–31.
12. Страхова Н. Є., Голубев В. О., Ковальов П. М., Тодіріка В. В. Експлуатація і реконструкція мостів. 2-е вид., випр. К., 2002. 408 с., іл. за редакцією Лантуха-Лященка А. І.
13. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).
14. Лантух-Лященко А. І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 62. К. 2001.
15. Лантух-Лященко А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 57. 1999. С. 183–188.
16. Дегтяр В. Г., Лантух-Лященко А. І. До проблеми оцінки зносу елементів моста. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 59. Український транспортний університет. К., 2000. С. 12–20.
17. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування (Інформація та документація).
18. Борщов, В. І., Закора, О. Л. Мости і труби. Підручник. Том 2. Залізобетонні мости. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2012. 393 с.
19. Попович, М. М., Миронюк, О. С., Борщов, В. І. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів.

References

1. Jung, W. T., Park, J. S., Kang, J. Y., Park, H. B. Strengthening effect of prestressed near-surface-mounted CFRP tendon on reinforced concrete beam. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018, 9210827 [in English].
2. Park, H. B., Park, J. S., Kang, J. Y., Jung, W. T. Fatigue Behavior of Concrete Beam with Prestressed Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement According to the Strength and Developed Length. *Materials* 2019, 12, 51 [in English].
3. Jung, W. T., Park, J. S., Kang, J. Y., Keum, M. S. Flexural behavior of concrete beam strengthened by near-surface mounted CFRP reinforcement using equivalent section model. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017, 2017, 1–16 [in English].
4. Kim, S. H., Park, S. Y., Park, Y. H., Jeon, S. J. Friction characteristics of post-tensioning tendons in full-scale structures. *Eng. Struct.* 2019, 183, 389–397 [in English].
5. Kim, S. H., Park, S. Y., Jeon, S. J. Long-term characteristics of prestressing force in post-tensioned structures measured using smart strand. *Appl. Sci.* 2020, 10, 4084 [in English].
6. Potson, R. W., Frank, K. H., West, J. S. Enduring strength. *Civ. Eng. ASCE* 2003, 73, 58–63 [in English].
7. Lee, B. J., Park, J. K., Kim, M. Y.; Shin, H. M., Park, C. H. Experimental study on flexural behavior of PSC I girder and the effect of external prestressing. *J. Korea Concr. Inst.* 2007, 19, 755–762 [in English].
8. ДБН В.2.3-14:2006 Мости та труби. Правила проєктування. (State Building Norms (DBN V.2.3-14:2006) Bridges and Pipes. Design Rules). Kyiv, 2006. (Information and documentation) [in Ukrainian].
9. РВ.3.2-03450778-832:2013 Рекомендaтsії з проєктування монолітих попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (post-naпружені системи). (Recommendations for the design of monolithic post-tensioned bridges with concrete stress). Kyiv, 2013 [in Ukrainian].
10. РВ.3.2-218-03450778-741:2008 Рекомендaтsії з підсилення конструктsії мостів під

navantazhenniam, v t. ch. z rehuliuvanniam zusyl' (Recommendations for strengthening bridge structures under load, including tension regulation). Kyiv, 2008 [in Ukrainian].

11. Bilchenko, A. V., Kislov, O. H., Synkovska, O. V., Ihnatenko, A. V. Dovichichnist zalizobetonnykh konstrukttsii ye osnovoiu zhyttievoho tsykliu mostovykh sporud. (Durability of reinforced concrete structures is the basis of the life cycle of bridge structures). Kyiv, 2016 [in Ukrainian].

12. Strakhova, N. Ye., Holubiev, V. O., Kovaliov, P. M., Todirika V.V. Ekspluatatsiia i rekonstrukttsiia mostiv, 2-e vyd., vypr. K., 2002. 408 p., il. Za redaktsiiu Lantukha-Liaschenka A. I. (Operation and reconstruction of bridges, 2nd ed., revised. K., 2002. 408 p., ill. Edited by Lantukh-Liaschenko A. I.) [in Ukrainian].

13. DSTU 9181:2022 Nastanova z otsiniuvannia ta prohnozuvannia tekhnogo stanu avto-dorozhnikh mostiv. Kyiv, 2022. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

14. Lantukh-Liaschenko, A. I. Model' vyznachennia nadiinosti prohonovoi budovy v umovakh nepovnoi informatsii. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhne budivnytstvo*. Vyp. 62. K.: 2001. (Model for determining the reliability of the span structure under incomplete information. Collection of "Roads and Road Construction". Issue 62. Kyiv: 2001) [in Ukrainian].

15. Lantukh-Liaschenko, A. I. Otsinka nadiinosti sporudy za modelem markovskogo vypadkovoho protsesu z dyskret-nymy stanamy. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhne budivnytstvo*. Vyp. 57. 1999. P. 183–188. (Reliability assessment of the structure using a model of a Markov random process with discrete states. Collection of "Roads and Road Construction". Issue 57. 1999. P. 183–188) [in Ukrainian].

16. V. H. Dehtiar, A. I. Lantukh-Liaschenko. Do problemy otsinky znozu elementiv mosta. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhne budivnytstvo*. Vyp. 59. Ukrain's'kyi transportnyi universytet. K.: 2000. (On the problem of assessing the wear of bridge elements. V. H. Dehtiar, A. I. Lantukh-Liaschenko. Collection of "Roads and Road Construction". Issue 59. Ukrainian Transport University. Kyiv: 2000) [in Ukrainian].

17. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and Culverts. Basic Design Requirements [in Ukrainian].

18. Borshchov V. I., Zakora O. L. Bridges and Culverts. Textbook. Volume 2. Reinforced Concrete Bridges. Dnipro: DNURT Publishing House, 2012. 393 p. [in Ukrainian].

19. Popovych M. M., Myroniuk O. S., Borshchov V. I. Strengthening of Reinforced [in Ukrainian].

Anna Miniukova¹, <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>

Pavlo Stashuk², Ph.D., <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

¹National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

²State Enterprise "National Institute for Development Infrastructure" (SE "NIDI"), Kyiv, Ukraine

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF EXTERNALLY PRE-STRESSED REINFORCEMENT FOR STRENGTHENING BRIDGE STRUCTURES

Abstract

This study explores the effectiveness of external prestressed reinforcement as a method for enhancing the durability of reinforced concrete bridge structures. Over time, many bridges experience significant deterioration due to increased traffic loads, aging materials, and environmental factors, leading to reduced load-bearing capacity. External prestressed reinforcement offers a solution to extend the service life of bridges without full reconstruction. The research demonstrates that this method improves the structural rigidity of the bridge, redistributes loads more evenly, and reduces deformations, contributing to the overall longevity and reliability of the structure. Experimental data indicates that external prestressed reinforcement enhances crack resistance, increases bridge stiffness, and ensures the stability of anchor blocks. By applying this technique, it is possible to increase the load capacity of a bridge without the need for costly capital

repairs. The findings suggest that this approach is an effective and economical solution for strengthening and maintaining bridges, particularly those built in previous decades, and that ongoing monitoring and quality control are crucial for optimizing its application.

Introduction. Reinforced concrete bridge structures experience significant loads during operation, leading to physical deterioration, crack formation, and a gradual decrease in load-bearing capacity. One method for extending the service life of bridges without full reconstruction is the use of external prestressed reinforcement. This method enhances the rigidity of the structure and ensures a more uniform distribution of loads, minimizing deformations.

Problem Statement. Most bridges currently in use in Ukraine were built in the 1960s–1980s according to the regulatory requirements of that period. The design loads and traffic intensity considered during their construction are significantly lower than today's actual conditions. Increased traffic intensity, the emergence of heavy vehicles, and the physical aging of materials lead to bridge overloading, causing span deformations, increased deflections, crack formation in concrete, reinforcement corrosion, reduced structural rigidity, and high capital repair costs.

Materials and methods. The material for the article is based on the experience of using external prestressed reinforcement for strengthening bridge structures in Ukraine, including the example of the overhaul of the bridge across the Rusaniv Strait in Kyiv. The following research methods were used: analysis of data from scientific sources, analysis of regulatory documents, and measurement of shear deformations on the anchor blocks of span structures.

Objective. To assess the effectiveness of external prestressed reinforcement in improving the durability of reinforced concrete bridge structures based on experimental data.

Results. The study showed that the use of external prestressed reinforcement reduces tensile stresses in concrete, enhancing crack resistance, increasing bridge stiffness, and ensuring the stability of anchoring blocks, which confirms the reliability of the tensioned element fastening. The application of external prestressed reinforcement allows for an increase in the bridge's load-bearing capacity without requiring major reconstruction.

Conclusions. The use of external prestressed reinforcement is an effective solution for restoring and extending the service life of reinforced concrete bridge structures. This method enables a uniform redistribution of loads, reduces deformations, and enhances the durability of the structure without significant financial costs. To achieve maximum efficiency, engineering monitoring of the bridge condition, modeling of the stress-strain state, and quality control during the tensioning of reinforcement bundles are necessary.

Keywords: external prestressing, bridge strengthening, durability of reinforced concrete structures, stress-strain state, bridge reconstruction.