

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

РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЬ І ПЕРЕМІЩЕНЬ ТИПОВИХ БАЛОК ПРОГОНОВИХ БУДОВ ПОСИЛЕНИХ ЗВИЧАЙНОЮ І ПОПЕРЕДНЬО-НАПРУЖЕНОЮ АРМАТУРОЮ

Анотація

Вступ. Багато мостових конструкцій по всьому світу були спроектовані відповідно до застарілих норм і сьогодні не відповідають вимогам сучасних транспортних навантажень. Це створює глобальну проблему безпеки, що робить розроблення ефективних рішень для їхнього посилення критично важливим завданням.

Проблематика. Переважна більшість мостового фонду, особливо в країнах, що розвиваються, була побудована в середині ХХ століття. Проектування цих споруд здійснювалося з урахуванням нормативних навантажень того часу, які були значно нижчими за сучасні. На сьогоднішній день, зростання інтенсивності руху, поява великогабаритного та великовагового транспорту призводить до перевантаження мостів. Це викликає передчасний фізичний знос конструкцій, появу тріщин, зниження їхньої несної здатності та, як наслідок, створює загрозу безпеці для всіх учасників дорожнього руху.

Мета. На основі розрахункового моделювання, кількісно оцінити та порівняти ефективність двох методів посилення: додатковою звичайною та попередньо-напруженою арматурою для типових залізобетонних балок мостових прогонових будов, що були спроектовані за старими нормами.

Результати. Аналіз проведеного розрахункового моделювання підтвердив, що існуючі конструкції мають значний дефіцит міцності: розрахунковий згинальний момент від сучасних навантажень (184 тс·м) перевищує несну здатність існуючих балок (141 тс·м). Було встановлено, що обидва методи посилення — звичайною та попередньо напруженою арматурою — ефективно підвищують несну здатність конструкцій, доводячи її до 193 тс·м та 215 тс·м відповідно. Використання зовнішнього попереднього напруження значно покращило експлуатаційні характеристики конструкції. Розрахунковий прогин від власної ваги зменшився з 21,3 мм до 3,2 мм, а стискальні напруження в бетоні усунули ризик появи тріщин.

Висновки. На основі проведеного розрахунку зусиль, переміщень і порівняльного аналізу, було встановлено, що існуючі залізобетонні балки прогонових будов, спроектовані за старими нормами, мають значний дефіцит несної здатності та не відповідають сучасним вимогам безпеки. Кількісний аналіз підтвердив, що посилення конструкцій додатковою арматурою є ефективним рішенням для підвищення їхньої міцності. Однак, порівняльний аналіз показав, що метод посилення зовнішньою попередньо напруженою арматурою не тільки забезпечує значний приріст несної здатності, але й значно підвищує жорсткість і тріщиностійкість конструкції, що суттєво подовжує її строк експлуатації та знижує майбутні витрати на обслуговування. Таким чином, результати дослідження є науковим та інженерним обґрунтуванням для вибору оптимального методу модернізації типових залізобетонних мостових конструкцій.

Ключові слова: автомобільна дорога, довговічність, залізобетонна конструкція, підсилення, попереднє напруження, міст, моделювання, напружено-деформований стан, несна здатність, реконструкція, транспортне навантаження.

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.

Значна частина транспортної інфраструктури України, зокрема залізобетонних мостів, була побудована в 1960–1980-х роках минулого століття. Розрахунок цих споруд виконувався згідно з нормативними документами, що діяли на той час, зокрема, з урахуванням навантажень від рухомого складу класів Н-30 та НК-80. Однак, за останні десятиліття інтенсивність та вага транспортних потоків значно зросли. Сучасні нормативні документи вимагають проектування та експлуатації мостів з урахуванням вищих класів навантажень, таких як А15 та НК-100. Це призвело до виникнення критичної ситуації, коли існуючі конструкції не можуть повною мірою забезпечити безпечну експлуатацію під впливом сучасних навантажень. Також відбувається фізичне зношення, що обмежує термін 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.

Таким чином, виникає актуальна проблема, яка полягає у визначенні фактичної несної здатності існуючих залізобетонних прогонових будов та розробці ефективних методів їх модернізації. Це дозволить підвищити клас навантаження на існуючі мости, подовжити їх термін служби та уникнути необхідності зведення нових, дороговартісних споруд.

Аналіз міжнародних наукових публікацій показує, що більшість досліджень зосереджено на основних напрямках посилення зовнішнім попереднім напруженням (External Prestressing). Цей метод широко вивчається, оскільки він ефективно підвищує несну здатність конструкції, зменшує прогини та запобігає утворенню тріщин. У публікаціях відзначається, що зовнішнє попереднє напруження є особливо ефективним для старих мостів, розрахованих на менші навантаження, оскільки воно дозволяє відновити деформаційні характеристики та збільшити стійкість до втоми. Наприклад в дослідженні, опублікованому в MDPI, *Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method*, проводиться експериментальний аналіз ефективності зовнішнього попереднього напруження на реальному мосту, що експлуатувався понад 45 років.

Основна частина

Основне завдання дослідження полягає у визначенні несної здатності типової балки Вип. 56 довжиною 16,76 м, розрахованої на навантаження Н-30 і НК-80, та розрахунку необхідного посилення для забезпечення прийняття навантажень А15 та НК-100.

До початку 2000-х років основним нормативним документом у галузі мостобудування в Україні був СНиП 2.05.03-84 [1]. Для автомобільних доріг загального користування найпоширенішим розрахунковим навантаженням був клас Н-30, який моделював проїзд автопоїзда масою 30 т. Цей клас був обраний, виходячи з параметрів транспортних засобів 1960–1980-х років, що забезпечувало достатній запас міцності для тогочасних транспортних потоків.

Однак, зі зростанням інтенсивності дорожнього руху та появою важких автопоїздів вантажопідйомністю понад 40 т, виникла необхідність перегляду розрахункових схем. У сучасних українських будівельних нормах впроваджено нові класи навантажень, зокрема:

А15 — автопоїзд масою 40 – 44 т і НК-80, НК-100 — розрахункові навантаження для надважких транспортних засобів [2]. Основні відмінності між Н-30 та новими класами полягають у збільшенні розрахункової повної маси, зміні схеми навантаження та зростанні інтенсивності смугового навантаження.

За даними розрахунків, перехід від Н-30 до А15 призводить до зростання максимальних згинальних моментів у балках на 15 – 25 %, що безпосередньо впливає на вимоги до міцності та жорсткості конструкцій. Для залізобетонних прогонових будов, спроектованих під клас Н-30, запас міцності виявляється недостатнім для прийняття навантаження А15 без додаткового підсилення. Як наслідок, значна кількість мостів, збудованих у 1960–1970-х роках, не відповідає вимогам сучасних норм і потребує переведення на вищий клас навантаження або обмеження руху важкого транспорту.

Переведення на клас А15 без заміни прогонових будов можливе лише за умови застосування ефективних методів підсилення.

За даними ДП «НІРІ», прогонові будови 211 мостів української дорожньої мережі були виготовлені відповідно до типового проекту залізобетонних прогонових будов — «Типові проекти споруд на автомобільних дорогах. Випуск 56».

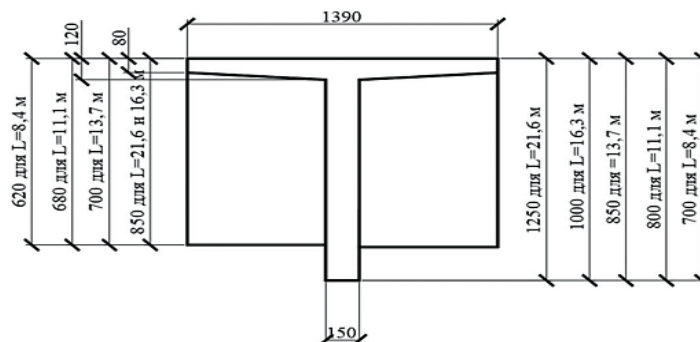


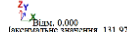
Рисунок 1 — Поперечний переріз балки за типовим проектом «Випуск 56»

Залізобетонна прогонова будова складається із декількох балок таврового поперечного перерізу із каркасною арматурою (без попереднього натягу). Балки з'єднуються між собою зварюванням сталевих закладних деталей у поперечних діафрагмах. Ці діафрагми виконані у вигляді вертикальних залізобетонних поперечних пластин з обох сторін кожної балки, крім крайніх. Арматування і бетонування діафрагм виконували одночасно з балкою. Висота балок залежить від довжини прогону, а кількість балок в поперечному перерізі мосту визначається розміром проїзної частини і шириною тротуарів. Кожна балка складається з вертикальної стінки постійної товщини і горизонтальної плити. Плита сприймає стиснення при згині балки і, одночасно, підтримує конструкцію проїзної частини. Розтяг при згині балки сприймає нижня поздовжня стрижнева арматура. На ділянках поблизу опор частина стрижнів нижньої поздовжньої арматури відігнута вгору для сприйняття поперечної сили. Попередній натяг арматури відсутній [3]. Проектна несна здатність балки, згідно з типовим проектом, становить 141 тс·м.

Розрахункове дослідження ґрунтується на застосуванні методу граничних станів, що є основним підходом у сучасному проектуванні залізобетонних конструкцій. Цей метод дозволяє комплексно оцінити роботу прогонових будов як за умовою міцності (перша група граничних станів), так і за умовою експлуатаційної придатності, що включає контроль за деформаціями та тріщиностійкістю (друга група граничних станів). На першому етапі було виконано комп'ютерне моделювання прогонової будови типу Вип. 56 довжиною 16,76 м у програмному комплексі «Ліра-Сапр». Це дало змогу створити точну просторову модель конструкції, врахувати спільну роботу головних балок, плити проїзної частини та інших елементів. Під час моделювання було враховано повний спектр навантажень, що діють на міст, а саме:

- постійні навантаження включають власну вагу залізобетонних елементів (балок, плити), а також масу всіх елементів багатошарової конструкції проїзної частини, таких як гідроізоляція, асфальтобетонне покриття, деформаційні шви та тротуарні блоки;
- тимчасові навантаження були прийняті відповідно до чинних норм, що регламентують розрахунок мостових споруд;
- нормативні навантаження від автотранспорту, відповідно до стандартних схем навантажень, з урахуванням сучасного складу транспортного потоку.

У розрахунковій моделі було відтворено реальні геометричні параметри та фізико-механічні характеристики бетону та арматури. Для бетону були прийняті характеристики, що відповідають його класу за міцністю, з урахуванням фізичного зносу, а для арматури — характеристики, що відповідають її класу.



E . . .

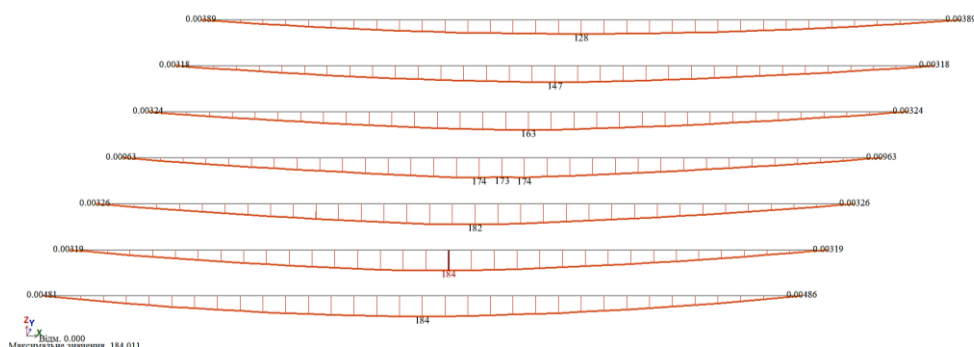


Рисунок 4 — Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, A15 + постійні ($\max = 184 \text{ тс} \cdot \text{м}$)

За посилення балки прогонової будови двома стержнями діаметром 32 мм, несну здатність балки прогонової будови відносно навантажень A15 буде забезпечено, $184 \text{ тс} \cdot \text{м} < 193 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

Несну здатність перерізу визначали за формулою:

$$M_{\text{Гр}} = \begin{cases} R_b \cdot b_{f1} \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) & \text{if } x < h_{f1} \\ R_b \cdot (b_{f1} - b) \cdot h_{f1} \cdot \left(h_0 - 0,5 \cdot h_{f1}\right) + R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

- де $M_{\text{Гр}}$ — граничний момент опору перерізу балки, який визначає її несну здатність;
 R_b — розрахунковий опір бетону на стиск, характеристика міцності бетону, яка враховує коефіцієнти надійності, що залежить від класу бетону;
 b — ширина ребра балки;
 h_0 — робоча висота перерізу балки, яку визначають як відстань від стиснутої грані до центру ваги розтягнутої арматури;
 b_{f1} — ширина полиці (верхньої частини);
 h_{f1} — товщина полиці (верхньої частини) балки;
 x — висота нейтральної осі від найбільш стиснутої грані перерізу.

Відповідно до виконаних розрахунків:

$$M_{\text{Гр}} = 51,6 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, сумарний граничний момент опору посиленої балки ($M_{\text{Гр.пос}}$) був визначений як:

$$M_{\text{Гр.пос}} = 141 \text{ тс} \cdot \text{м} + 74,1 \text{ тс} \cdot \text{м} = 215 \text{ тс} \cdot \text{м} > 184 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Порівняння розрахункового моменту опору посиленої балки з моментом від зовнішніх навантажень показало, що після посилення звичайною арматурою конструкція відповідає вимогам міцності за першою групою граничних станів та здатна безпечно сприймати задані навантаження.

$$M_{\text{Гр.пос}} = 141 \text{ тс} \cdot \text{м} + 52 \text{ тс} \cdot \text{м} = 193 \text{ тс} \cdot \text{м} > 184 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

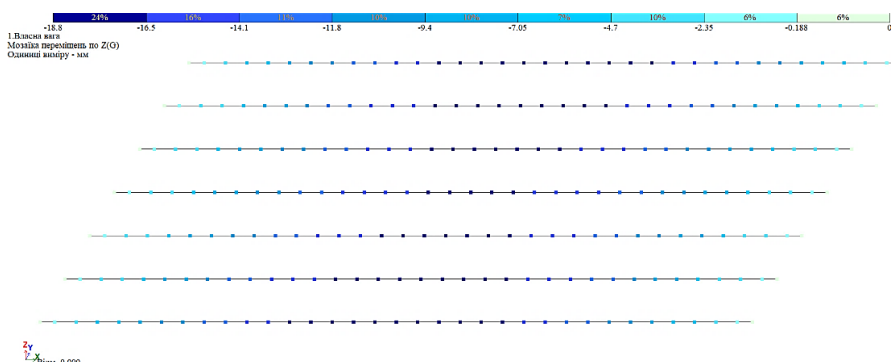


Рисунок 5 — Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги ($\max = 18,8 \text{ мм}$) за посилення звичайною арматурою

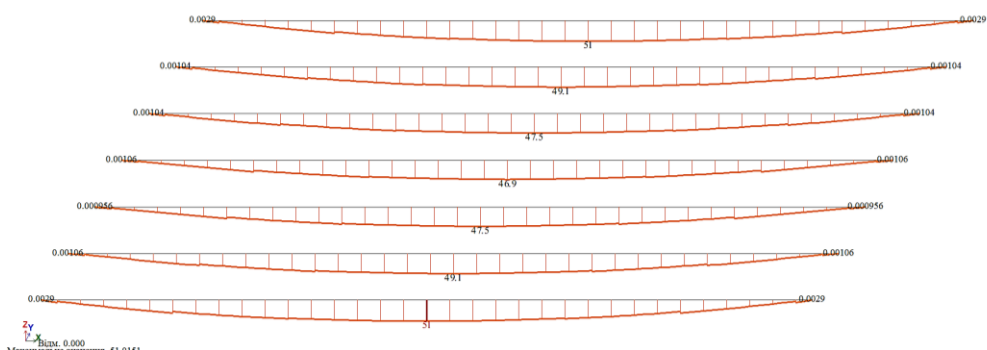


Рисунок 6 — Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від власної ваги ($\max = 51 \text{ тс} \cdot \text{м}$)

Посилення конструкції додатковою звичайною арматурою значно підвищує її несну здатність, проте цей метод має суттєвий недолік, що обмежує його застосування. Він не змінює принципу роботи залізобетонної конструкції, яка залишається схильною до утворення тріщин у розтягнутій зоні під впливом експлуатаційних навантажень.

Це відбувається через те, що бетон добре працює на стиск, але погано на розтяг. Тому навіть після посилення, коли зовнішні навантаження перевищують певну межу, в бетоні все одно виникають розтягувальні напруження, які призводять до розкриття тріщин. Наявність тріщин, у свою чергу, відкриває шлях для агресивних факторів навколишнього середовища (вода, солі, кисень), що призводить до корозії арматури та зниження довговічності всієї конструкції. Таким чином, посилення звичайною арматурою є лише частковим вирішенням проблеми.

Враховуючи виявлені обмеження, наступним етапом є моделювання посилення зовнішньою попередньо-напруженою арматурою. Цей метод є принципово відмінним, оскільки дозволяє активно керувати напружено-деформованим станом конструкції, забезпечуючи її високу тріщиностійкість та довговічність.

Моделювання посилення зовнішньою попередньо-напруженою арматурою здійснювали шляхом введення в розрахункову схему додаткового зусилля попереднього обтиску. Це зусилля, що діє на балку, створює у нижній, розтягнутій зоні бетону постійні стискальні напруження. Це дозволяє компенсувати або значно зменшити розтягувальні напруження, які виникають від зовнішніх навантажень.

Результати розрахунків, отримані після моделювання посилення за цією методикою, продемонстрували її значні переваги.

За посилення балки прогонової будови чотирма попередньо напруженими канатами діаметром 15,2 мм, несну здатність балки прогонової будови відносно навантажень А15 буде забезпечено, $184 \text{ тс} \cdot \text{м} < 215 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

За формулою (1) — граничний момент опору перерізу балки, після підпислення складає:

$$M_{\text{гр}} = 74,1 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, сумарний граничний момент опору посиленої балки ($M_{\text{гр.пос}}$) був визначений як:

$$M_{\text{гр.пос}} = 141 \text{ тс} \cdot \text{м} + 74,1 \text{ тс} \cdot \text{м} = 215 \text{ тс} \cdot \text{м} > 184 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Порівняння розрахункового моменту опору посиленої балки з моментом від зовнішніх навантажень показало, що після посилення звичайною арматурою конструкція відповідає вимогам міцності за першою групою граничних станів та здатна безпечно сприймати задані навантаження.

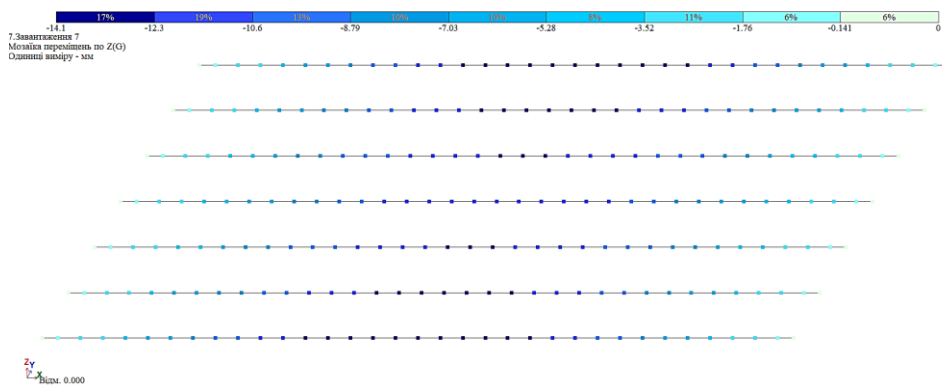


Рисунок 7 — Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги (max = 14,1 мм)

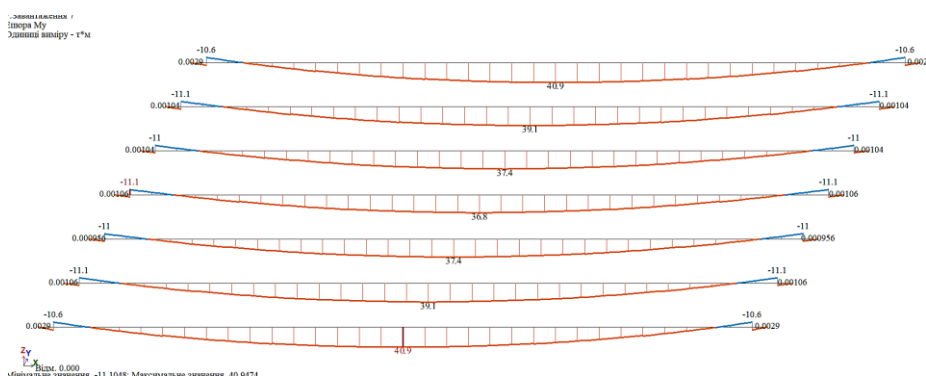


Рисунок 8 — Епюри згинальних моментів M_x балок прогонової будови від власної ваги (max = 40,9 тс · м)

Для оцінки довговічності та захисту арматури від корозії необхідним є розрахунок на тріщиностійкість під дією експлуатаційних навантажень.

На стадії експлуатації проводиться розрахунок на тріщиностійкість для повних експлуатаційних навантажень, що включають постійні та тимчасові навантаження. Нормативний момент у середині прогону від постійних навантажень становить: $M_{\text{п}} = 205$ тис · м. При цьому від власної ваги балки та плити: $M_{\text{пе}} = 125$ тис · м, а від тимчасових навантажень, асфальтобетонного покриття, перил та бар'єрної огорожі: $M_{\text{т}} = M_{\text{п}} - M_{\text{пе}} = 80$ тис · м.

Розтягувальні напруження в бетоні нижньої грані балки не повинні перевищувати величину:

$$\sigma_{bc.n} \leq 0,8 \cdot R_{bt.ser}, \quad (2)$$

де $\sigma_{bc.n}$ — розтягувальне напруження в бетоні на нижній грані балки;

$R_{bt.ser.}$ — розрахунковий опір бетону розтягу для другої групи граничних станів.

Також накладається обмеження на стискальні напруження в бетоні верхньої грані. Вони не повинні перевищувати:

$$\sigma_{bt.v} \leq R_{b.mc2}, \quad (3)$$

де $\sigma_{bt.v}$ — стискальне напруження в бетоні на верхній грані балки.

Рівнодійна зусилля попереднього напруження в напруженій арматурі з урахуванням втрат:

$$N_p = A_p \cdot \sigma_p, \quad (4)$$

де N_p — рівнодійна сила попереднього напруження;

A_p — площа поперечного перерізу напруженої арматури;

σ_p — напруження в арматурі.

$$N_p = 59,2 \text{ тс}.$$

Напруження в бетоні верхньої грані в середині прогону:

$$\sigma_{bt.be} = \frac{N_p}{A_{red}} - \frac{N_p \cdot e_0 \cdot Y_{red.b}}{I_{red}} + \frac{M_{пе} \cdot Y_{red.b}}{I_{red}}, \quad (5)$$

де $\sigma_{bt.be}$ — стискальне напруження в бетоні на верхній грані балки;
 A_{red} — площа поперечного перерізу приведеної конструкції;
 e_0 — ексцентриситет сили попереднього напруження N_p ;
 $Y_{red.b}$ — відстань від центру ваги приведеного перерізу до верхньої грані балки;
 I_{red} — момент інерції приведеного перерізу;
 $M_{пе}$ — момент від навантаження (постійного та тимчасового експлуатаційного).

$$\sigma_{bt.b1} = 300,9 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2} < 0,8 \cdot R_{b.mc2} = 1460 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2}.$$

Умову виконано, поздовжні тріщини на стадії експлуатації не виникають.

Напруження в бетоні нижньої грані визначають за формулою:

$$\sigma_{bc.ne} = \frac{-N_p}{A_{red}} - \frac{N_p \cdot e_0 \cdot Y_{red.n}}{I_{red}} + \frac{M_{пе} \cdot Y_{red.n}}{I_{red}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{bc.ne} = -13,8 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2} < 0,8 R_{bt.ser} = 144 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2} \text{ — напруження в бетоні нижньої грані будуть стискаючими.}$$

Результати розрахунків на тріщиностійкість підтвердили ключову перевагу зовнішнього попереднього напруження. На відміну від посилення звичайною арматурою, яке хоча й збільшує несну здатність, але не усуває розтягувальні напруження у бетоні, метод попереднього напруження створює постійне стискальне зусилля. Це стискальне зусилля повністю компенсує розтягувальні напруження, які виникають від зовнішніх навантажень, що запобігає утворенню тріщин у бетоні. Таким чином, цей метод не лише підвищує міцність, а й значно збільшує довговічність конструкції та її стійкість до корозії.

Отримані розрахункові дані щодо міцності, жорсткості та тріщиностійкості дозволяють провести комплексний порівняльний аналіз. Для наочної демонстрації переваг кожного з методів посилення, а також обґрунтування їх доцільності, нижче представлена порівняльна таблиця, що узагальнює ключові техніко-економічні показники.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз ефективності посилення балок звичайною та попередньо напруженою арматурою

Критерій порівняння	Без посилення	Посилення звичайною арматурою	Посилення попередньо напруженою арматурою
Несна здатність (розрахункова)	141 тс·м	193 тс·м	215 тс·м
Запас міцності	Недостатній (141 тс·м < 184 тс·м)	Достатній (193 тс·м > 184 тс·м)	Значний (215 тс·м >> 184 тс·м)
Прогин від власної ваги	21,3 мм	18,8 мм	14,1 мм
Жорсткість конструкції	Стандартна	Вища	Значно вища
Довговічність та тріщиностійкість	Наявні тріщини, ризик корозії	Можливе утворення тріщин, ризик корозії	Утворення тріщин усувається, висока стійкість до корозії
Технологічна складність	Відсутня	Відносно проста	Вища, вимагає спеціального обладнання
Експлуатаційні витрати	Високі (необхідність постійного ремонту)	Можуть бути вищими (обслуговування)	Нижчі

Висновки

У результаті проведеного дослідження були визначені два ефективні методи посилення типової балки за типовим проектом Вип. 56 та виконані розрахунки, які підтверджують їхню ефективність.

Розрахунки показали, що несна здатність типової залізобетонної балки, розрахованої на навантаження Н-30 та НК-80, становить 141 тс·м, що є недостатнім для прийняття сучасних навантажень А15 та НК-100. Нормативна несна здатність, яка відповідає цим новим навантаженням, становить 184 тс·м. Це обґрунтувало необхідність посилення конструкції. Посилення звичайною арматурою передбачає додаткове армування розтягнутої зони балки. За допомогою розрахунків було встановлено, що після посилення звичайною арматурою несна здатність балки зростає до 193 тс·м. Цей показник перевищує необхідну несну здатність (184 тс·м), що свідчить про ефективність методу. При цьому прогин балки під навантаженням становить 18,8 мм.

Посилення попередньо напруженою арматурою дозволило не тільки збільшити несну здатність, а й змінити напружено-деформований стан конструкції. За результатами розрахунків, несна здатність балки після такого посилення досягла 215 тс·м, що забезпечує значний запас міцності. Крім того, попереднє напруження значно зменшило прогин балок до 14,1 мм, що є важливим для довговічності та тріщиностійкості конструкції.

Наукова новизна дослідження полягає у кількісному обґрунтуванні переваг методу посилення з використанням зовнішньої попередньо напруженої арматури. Порівняльний аналіз довів, що цей метод є більш ефективним, оскільки він не тільки забезпечує необхідну міцність, але й значно підвищує жорсткість і тріщиностійкість конструкції, що є важливим для її довговічності.

Список літератури

1. СНиП 2.05.03-84*. Мости і труби. 1984. 141 с. (Інформація та документація).
2. Остапчук В. Ю., Веретельников О. С. Перспективи та можливості будівництва мостів зі зменшеною кількістю проміжних опор на автомобільних дорогах України із застосуванням сучасних технологій. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. С. 273–279. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.273>.
3. Боднар Л. П., Завгородній С. С., Яструбінецький В. Л. Аналіз типових проектів найбільш поширених залізобетонних прогонових будов мостів на автомобільних дорогах України. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 176–186. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.176>.
4. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2009. 47 с. (Інформація та документація).
5. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2009. 53 с. (Інформація та документація).
6. Каськів В. І., Панібратець Л. Г., Степанов С. М., Грінів В. С., Чайковська Л. І. Стан мостового господарства України на дорогах загального користування державного значення на підконтрольних територіях за 2023 рік. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. С. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.280>.
7. Попович, М. М., Миронюк, О. С., Борщов, В. І. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів. Електронний ресурс. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92$) (дата звернення: 15.09.2025)
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. 53 с. (Інформація та документація).

10. Р В.3.2-218-03450778-741:2008 Рекомендації з підсилення конструкцій мостів під навантаженням, в т. ч. з регулюванням зусиль. Київ, 2008. Київ, 2013. 57 с. (Інформація та документація).

11. Kim, S. H., Park, J. S., Jung, W. T., Kim, T. K., & Park, H. B. (2018). Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method. MDPI, March 2021, Advanced Composites Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Gyeonggi-do, Korea.

References

1. SNiP 2.05.03-84. Bridges and culverts (Bridges and pipes). 1984. 141 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia).

2. Ostapchuk V. Yu., Veretelnikov O. S. Perspektyvy ta mozhlyvosti budivnytstva mostiv zi zmenshenoiu kilkistiu promizhnykh opor na avtomobilnykh dorohakh ukraïny iz zastosuvanniam suchasnykh tekhnolohii (Prospects and possibilities for the construction of bridges with a reduced number of intermediate supports on Ukrainian motorways using modern technologies). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 29. P. 273–279 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.273> [in Ukrainian].

3. Bodnar L. P., Zavhorodnii S. S., Yastrubynetskyi V. L. Analiz typovykh proektiv naibilsh poshyrenykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv na avtomobilnykh dorohakh Ukraïny (Analysis of typical designs of the most common reinforced concrete bridge spans on motorways in Ukraine. Roads and Bridges). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2020. Issue 22. P. 176–186 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.176> [in Ukrainian].

4. DBN V.2.3-22:2009 Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (Bridges and Culverts. General Design Requirements). Kyiv, 2009. 47 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

5. DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia (Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions.). Kyiv, 2009. 53 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

6. Kaskiv V. I., Panibratets L. H., Stepanov S. M., Hriniv V. S., Chaikovska L. I. Stan mostovoho hospodarstva ukraïny na dorohakh zahalnoho korystuvannia derzhavnogo znachennia na pidkontrolnykh terytoriiakh za 2023 rik (State of bridge facilities of ukraïne on public roads of national importance in the controlled territories in 2023.). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 29. P. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.280> [in Ukrainian].

7. Popovych, M. M.; Myroniuk, O. S.; Borshchov, V. I. Pidsylennia zalizobetonnykh balkovykh prohinykh budov z vykorystanniam shprenheliv i poperedno napruzhenykh stryzhniv (Strengthening of Reinforced). Elektronnyi resurs. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92$) (data zvernennia: 15.09.2025) [in Ukrainian].

8. DBN V.2.3-14:2006. Mosty ta truby. Pravila proektuvannia. (State Building Norms (DBN V.2.3-14:2006) Bridges and Pipes. Design Rules). Kyiv, 2006. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. Р В.3.2-03450778-832:2013. Rekomendatsii z proektuvannia monolitykh poperedn'o-napruzhenykh mostiv z napruzheniam na beton (post-napruzheni systemy). (Recommendations for the design of monolithic post-tensioned bridges with concrete stress). Kyiv, 2013 [in Ukrainian].

10. Р В.3.2-218-03450778-741:2008. Rekomendatsii z pidsylenia konstruktsii mostiv pid navantazhenniam, v t. ch. z rehuliuivanniam zusyl' (Recommendations for strengthening bridge structures under load, including tension regulation). Kyiv, 2008 [in Ukrainian].

11. Kim, S.-H., Park, J.-S., Jung, W.-T., Kim, T.-K., & Park, H.-B. (2018). Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method. MDPI, March 2021, Advanced Composites Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Gyeonggi-do, Korea [in English].

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

CALCULATION OF FORCES AND DISPLACEMENTS OF TYPICAL BRIDGE SPAN BEAMS REINFORCED WITH ORDINARY AND PRESTRESSED REINFORCEMENT

Abstract

Introduction. Many bridge structures worldwide were designed in accordance with outdated standards and no longer meet the demands of modern transport loads. This creates a global safety issue, making the development of effective solutions for their strengthening a critically important task.

Problem Statement. The vast majority of the global bridge infrastructure, particularly in developing countries, was constructed in the mid-20th century. The design of these structures was based on the normative loads of that time, which were significantly lower than current ones. Today, the increase in traffic intensity and the emergence of oversized and heavy-duty vehicles lead to bridge overloading. This causes premature physical wear of the structures, the appearance of cracks, a reduction in their load-bearing capacity, and, consequently, poses a safety threat to all road users.

Materials and methods. The methodology of this study is based on a comprehensive approach that combines theoretical analysis, mathematical modeling, and numerical calculations. The purpose of using these selected methods is to substantiate the need for strengthening existing reinforced concrete bridge structures and to prove the effectiveness of external prestressed reinforcement compared to traditional solutions. The research is based on the Finite Element Method (FEM). This numerical method allows for approximating the behavior of a complex structure by dividing it into a set of simple elements (finite elements). This makes it possible to accurately determine the stress-strain state of the entire object. The calculations were performed using the licensed software package LIRA-SAPR, a modern tool for modeling, analyzing, and designing building 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 analysis confirmed that the existing structures have a significant strength deficit: the calculated bending moment from modern loads (184 tm) exceeds the load-bearing capacity of the existing beams (141 tm). It was found that both strengthening methods—with ordinary and prestressed reinforcement—effectively increase the load-bearing capacity of the structures, bringing it up to 193 tm and 215 tm, respectively. The use of external prestressing significantly improved the operational characteristics of the structure. The calculated deflection from self-weight decreased from 21.3 mm to 14.1 mm, and the compressive stresses in the concrete eliminated the risk of crack formation.

Conclusions. Based on the conducted calculation of forces, displacements, and comparative analysis, it was established that existing reinforced concrete bridge span beams, designed with outdated standards, have a significant deficit in load-bearing capacity and do not meet modern safety requirements. The quantitative analysis confirmed that strengthening the structures with additional reinforcement is an effective solution for increasing their strength. However, the comparative analysis showed that the method of strengthening with external prestressed reinforcement is the most appropriate, as it not only provides a significant increase in load-bearing capacity but also considerably improves the stiffness and crack resistance of the structure, which substantially extends its service life and reduces future maintenance costs. Thus, the results of this study provide a scientific and engineering justification for selecting the optimal method for modernizing typical reinforced concrete bridge structures.

Keywords: road, external prestressing, strengthening, load-bearing capacity, durability reinforced concrete structure, stress-strain state, bridge, reconstruction, transport loads, computational modeling.