

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ БАЛОК ДЛЯ ВІДПОВІДНОСТІ СУЧАСНИМ ТРАНСПОРТНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Мінюкова А. Д.

Національний транспортний університет

Анотація. У статті обґрунтовано методику підвищення несної здатності типових залізобетонних мостових балок для їх адаптації до вимог сучасних транспортних навантажень. Актуальність роботи зумовлена фізичним і моральним старінням наявного мостового фонду, значна частина якого була спроектована під застарілі нормативні навантаження (Н-30, НК-80). Аналіз показав, що наявні конструкції наразі демонструють дефіцит міцності (до 20–25 %) щодо сучасних класів навантажень (АК-15, НК-100). Це створює загрозу безпеці руху й призводить до передчасного руйнування конструкцій. Для розв'язання проблеми використано розрахунковий аналіз напружено-деформованого стану типової балки, визначено кількісний дефіцит міцності й змодельовано процес підсилення із застосуванням зовнішньої попередньо напруженої арматури. Розроблена методика є послідовним алгоритмом інженерних дій, що передбачає визначення оптимальних параметрів армування й розрахункового зусилля попереднього напруження, необхідного для компенсації дефіциту міцності.

Ключові слова: довговічність, залізобетонна конструкція, підсилення, попереднє напруження, міст, моделювання, напружено-деформований стан, несна здатність, реконструкція, транспортне навантаження, метод скінченних елементів (МСЕ).

Вступ

Вважається, що термін служби мостових споруд становить 100 років, оскільки найбільш довговічними їх елементами є опори й фундаменти.

Водночас термін експлуатації прогонових будов є значно коротшим (приблизно 40 років) за умови повної відсутності систематичних ремонтних робіт. Переважна більшість мостів в Україні залізобетонні. На автомобільних дорогах загального користування державного значення їх частка становить майже 94 % [1].

Більшість прогонових будов мостового фонду України, зокрема типові балки Вип. 122-62, були спроектовані відповідно до застарілих нормативних навантажень того часу, зокрема Н-30 та НК-80. Ці навантаження є значно нижчими за сучасні. За останні десятиліття зросла інтенсивність руху. Поява великогабаритного й великовагового транспорту вимагає переведення мостів на сучасні класи навантажень, зокрема АК-15 та НК-100.

Це спричиняє передчасний фізичний знос конструкцій, появу тріщин і зниження їх несної здатності. Отже, значна частина життєвого циклу споруди проходить в умовах перевантаження, що призводить до передчасного руйнування й перевитрат коштів на ремонт.

Аналіз публікацій

Проблема зниження несної здатності та морального старіння залізобетонних мостових конструкцій є однією з найбільш актуальних у сучасному будівництві, що підтверджується численними науковими роботами й галузевими звітами [2]. Переважна більшість мостового фонду була побудована в середині ХХ ст., а конструкції розраховувалися відповідно до нормативних навантажень того часу, наприклад Н-30 і НК-80 [3]. У роботах українського науковця П. Сташука широко розглядається методика підвищення довговічності прогонових будов за допомогою зовнішнього армування [4, 5].

Науковці з Дніпровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (М. Попович, О. МIRONЮК, В. Борщов) у своїх роботах [6] наголошують, що найбільш ефективним способом підсилення за наявності значної втрати несної здатності є влаштування додаткових розвантажувальних пристроїв, що передбачають використання шпренгелів і попередньо напружених стрижнів.

Це підтверджується тим, що зовнішня попередньо напружена арматура дає змогу додати в конструкцію контрольоване стискальне зусилля, яке комплексно покращує характеристики балки: забезпечує повне відновлення несної здатності, значне підвищення

Частина пучків попередньо напруженої арматури на ділянках балок поблизу опор відігнута вгору й таким чином сприймає поперечну силу на цих ділянках [7].

Метою статті є обґрунтування та деталізація методики підвищення несної здатності типових залізобетонних балок мостів (на прикладі балки Вип. 122-62 завдовжки 16,76 м) за допомогою зовнішнього попередньо напруженого армування та адаптації до сучасних навантажень.

Technical drawing of a bridge cross-section. The total width is 7000. The deck width on each side is 1240. The slope of the deck is $i=0.015$. The bridge has five piers, creating four spans of 1620 each. The pier width is 40.

Для визначення зусиль у конструктивних елементах прогонової будови було створено тривимірну модель залізобетонної балки (рис. 2) у програмному комплексі «ЛПР-САПР», на основі якої сформовано відповідну розрахункову схему (рис. 3). Такий підхід забезпечив можливість відтворити просторову роботу конструкції.

Предметом дослідження є прогонові будови, виконані за типовими проектами Вип. 122-62. Проект набув чинності 1962 року. Це один з перших типових проектів прогонових будов мостів із попереднім натягом робочої арматури. Попередньо напружена робоча арматура в нижньому поясі виконана з пучків високоміцного дроту діаметром 5 мм. Натяг арматури виконувався на упори до бетонування (стендова технологія). Прогонова будова містить декілька балок постійної висоти, об'єднаних декількома поперечними діафрагмами.

The image shows a 3D perspective view of a multi-story building structure. The building has a sloped roof and is composed of multiple levels. The structure is primarily grey, with blue and red elements highlighting specific components. A side elevation view is shown below the main perspective view, illustrating the building's profile and the placement of the highlighted components.

Рис. 4. Розрахункова схема в ПК «ЛІР-САПР»

Несна здатність балки по згинальному моменту, згідно з типовим проектом, становить 192 тс*м.

У межах дослідження проведено моделювання на навантаження Н-30. Розрахунковий згинальний момент від навантажень Н-30 та НК-80 становить 175 тс*м. Це свідчить про те, що на момент проектування несна здатність прогонової будови задовольняла нормативні вимоги.

Проте несна здатність балки прогонової будови щодо навантажень АК-15 та НК-100 не забезпечена, оскільки, відповідно до обчислень, розрахунковий згинальний момент становить 240 тс*м.

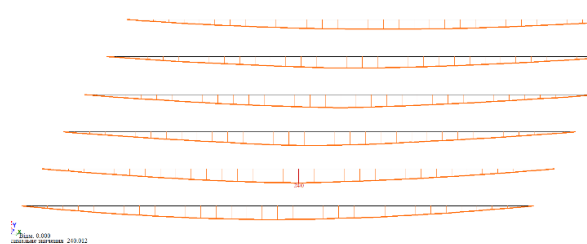


Рис. 5. Епюри згинальних моментів балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, АК-15 + постійні (мах = 240 тс*м)

Кількісний дефіцит несної здатності по згинальному моменту становить:

$$\text{Дефіцит} = 240 - 192 = 48 \text{ тис} \cdot \text{м}.$$

Для оцінювання необхідного підсилення розраховано дефіцит міцності у відсотках δ способом порівняння величини дефіциту несної здатності $\Delta M = 48 \text{ тис} \cdot \text{м}$ з необхідною несною здатністю за сучасними нормами $M_{\text{необхідне}} = 240 \text{ тс} \cdot \text{м}$ та наявною проектною несною здатністю $M_{\text{наявне}} = 192 \text{ тс} \cdot \text{м}$

$$\delta = \frac{\Delta M}{M_{\text{необхідне}}} \times 100\%;$$

$$\delta = \frac{48 \text{ тис} \cdot \text{м}}{240 \text{ тис} \cdot \text{м}} \times 100\% = 20\%.$$

Це свідчить про необхідність підсилення конструкції для її адаптації до сучасних транспортних навантажень і забезпечення безпечної експлуатації.

Для ліквідації встановленого дефіциту несної здатності було обрано метод підсилення зовнішньою попередньо напруженою арматурою, який дає змогу долучити в конструкцію контрольоване стискальне зусилля до

прикладення зовнішніх експлуатаційних навантажень. Це зусилля компенсує розтягальні напруження в розтягнутій зоні балки, які виникають від власної ваги й тимчасового навантаження.

Для реалізації цього методу було розроблено розрахункову модель, що передбачає вибір матеріалу: використовуються високоміцні сталеві канати, що мають високу стійкість до релаксації напружень і визначення геометрії; канати розміщуються зовнішньо з ексцентриситетом щодо нейтральної осі, що забезпечує максимальний стискальний ефект у розтягнутій зоні.

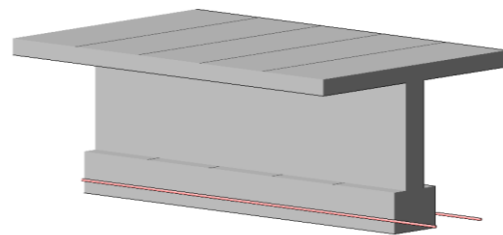


Рис. 5. Розрахункова модель поперечного перерізу балки прогонової будови за типовим проектом Вип. 122-62 з підсиленням двома стрижнями попередньо напруженою арматурою

Унаслідок розрахунків визначено, що для балки Вип. 122-62 необхідний приріст несної здатності може бути досягнутий за допомогою чотирьох канатів діаметром 15,2 мм.

Несна спроможність перерізу визначається за формулою:

$$M_{zp} = R_b \cdot b_{f1} \cdot x \cdot h_0 - x_2 \cdot \text{if} \cdot x < h_{f1} R_b \cdot b_{f1} \cdot h_0 - 0,5 h_{f1} + Rb \cdot b \cdot x \times (h_0 - x_2) \text{otherwise}$$

де $M_{гр}$ – граничний момент опору перерізу балки, який визначає її несну здатність;

R_b – розрахунковий опір бетону на стиск, характеристика міцності бетону, яка містить коефіцієнти надійності, що залежить від класу бетону;

b – ширина ребра балки;

h_0 – робоча висота перерізу балки, що визначається 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:

$$M_{гр} = 70,2 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Отже, найбільший розрахунковий згинальний момент від постійних і тимчасових навантажень, що виникає в середині прогону ($M_{гр.пос}$), визначено як:

$$M_{гр.пос} = 192 \text{ тс} \cdot \text{м} + 70 \text{ тс} \cdot \text{м};$$

$$M_{гр.пос} = 262 \text{ тс} \cdot \text{м} > 240 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Після цього підсилення несна здатність балки щодо навантажень АК-15 та НК-100 буде забезпечена, $240 \text{ тс} \cdot \text{м} < 262 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

Залізобетонні елементи, посилені приварюванням додаткової арматури в розтягненій зоні, розраховуються як елементи суцільного перерізу (з умовою забезпечення спільної роботи), приймаючи, що граничний стан посиленої конструкції настає одночасно з досягненням наявної та додаткової арматури розрахункового опору.

Для визначення тріщиностійкості конструкції проведено розрахунок відповідно до вимог другої групи граничних станів. Результати такого аналізу дають змогу встановити можливість утворення тріщин під дією експлуатаційних навантажень.

Висновки

Дослідження підтвердило, що наявний фонд типових залізобетонних мостових балок, спроектованих під застарілі нормативні навантаження, має дефіцит несної здатності щодо сучасних вимог до транспортних навантажень (АК-15 та НК-100). Для ліквідації цього дефіциту обґрунтовано методику підсилення зовнішньою попередньо напруженою арматурою. Ця методика передбачає послідовний розрахунковий аналіз напружено-деформованого стану, визначення необхідного зусилля попереднього напруження й підбір оптимальної кількості армувальних елементів.

Моделювання довело, що застосування зовнішньої попередньо напруженої арматури забезпечує повне відновлення необхідної несної здатності, що гарантує відповідність сучасним нормам міцності. Отже, впровадження запропонованої методики є науково обґрунтованим і найбільш доцільним технічним рішенням для комплексної модернізації та адаптації типових мостових балок до сучасних умов експлуатації.

Література

1. 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.
2. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2009. 112 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів Київ, 2011. 84 с.
4. РВ.3.2-03450778-832:2013. Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (постнапружені системи). Київ, 2013. 53 с. (Інформація та документація).
5. Р В.3.2-218-03450778-741:2008 Рекомендації з підсилення конструкцій мостів під навантаженням, в т. ч. з регулюванням зусиль. Київ, 2013. 57 с. (Інформація та документація).
6. Попович М. М., Миронюк О. С., Борщов В. І. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів. Електронний ресурс.
7. 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.
8. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2009. 53 с.
9. ДБН В.2.3-14:2006. Мости та труби. Правила проектування. Київ, 2006. 48 с. (Інформація та документація).
10. Дехтяр А. С. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*, № 78, том 2, Київ, 2013. С. 225–235.
11. Дехтяр А. С. Планування експлуатації залізобетонних мостів. *Наук. праці семінару «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій»*. Луцьк, 16–19 вересня 2002 р.

References

1. Volodymyr Kaskiv, Liudmyla Panibratets, Serhii Stepanov, Vladyslava Hriniv, Leonida Chaikovska. State of bridge facilities of Ukraine on public roads of national importance in the controlled territories in 2023. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2024. Issue 29. P. 280–292 [in Ukrainian].
2. DBN V.2.3-22:2009. Bridges and Culverts. Basic Design Requirements. Kyiv, 2009. 112 p.
3. DSTU-N B V.2.3-23:2012. Guideline for the Assessment and Forecasting of the Technical Condition of Road Bridges. Kyiv, 2012.
4. RV.3.2-03450778-832:2013. Recommendations for the Design of Monolithic Prestressed Concrete

- Bridges with Post-Tensioning (Post-Tensioned Systems). Kyiv, 2013. 53 p. (Information and Documentation).
5. RV.3.2-218-03450778-741:2008. Recommendations for the Strengthening of Bridge Structures under Load, including Effort Regulation. Kyiv, 2008. Kyiv, 2013. 57 p. (Information and Documentation).
 6. Popovych, M. M., Myroniuk, O. S., Borshchov, V. I. Strengthening of Reinforced Concrete Beam Span Structures using Tie Rods and Prestressed Bars. Electronic resource.
 7. Larysa Bodnar, Serhii Zavorodnyi, Vitalii Yastrubynetskyi Analysis of typical designs of the most common reinforced concrete bridge span on the motor roads of Ukraine. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2020. Iss. 22. P. 176–186 [in Ukrainian].
 8. DBN V.2.6-98:2009. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions. Kyiv, 2009. 53 p.
 9. DBN V.2.3-14:2006. Bridges and Culverts. Design Rules. Kyiv, 2006. 48 p. (Information and Documentation)
 10. Dekhtyar, A. S. Analysis of the Durability of Road Bridges in Ukraine. Interdepartmental Scientific and Technical Collection "Scientific and Technical Problems of Modern Reinforced Concrete", No. 78, Vol. 2, Kyiv, 2013. P. 225–235.
 11. Dekhtyar, A. S. Planning the Operation of Reinforced Concrete Bridges. Scientific works of the seminar "Mechanics and Physics of Destruction of Building Materials and Structures". Lutsk, September 16–19, 2002.

Мінюкова Анна Дмитрівна, аспірантка кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд,
e-mail: anyminyukov@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>.
Національний транспортний університет,
вул. М. Омелянвича-Павленка, 1, м. Київ, 01010,
Україна

Increasing the Bearing Capacity of Reinforced Concrete Bridge Beams to Meet Modern Transport Loads

Abstract. The article justifies the methodology for increasing the load-bearing capacity of typical reinforced concrete bridge beams, designed under outdated regulations (N-30), to adapt them to the requirements of modern transport loads (AK-15). The critical strength deficit of existing structures, resulting from physical and moral obsolescence, is identified (up to 20-25%). To solve this problem, a computational analysis of the stress-strain state of a typical beam was performed, quantifying the strength deficit, and the strengthening process was modeled using external prestressed reinforcement. The developed methodology provides a sequential engineering algorithm, including the determination of optimal rein-

forcement parameters and the required prestressing force to fully compensate for the strength deficit. This approach ensures the restoration of the bearing capacity and a significant improvement in the crack resistance and stiffness of the structure. **Goal.** The goal of this study is to develop and quantitatively justify the effectiveness of a methodology for strengthening typical reinforced concrete bridge beams using External Prestressed Reinforcement, ensuring their load-bearing capacity and durability align with the requirements of modern transport loads (AK-15). **Methodology.** The Methodology applied to achieve the goal is based on analytical and computational analysis. It involves conducting a comprehensive stress-strain state analysis of the existing beam under both obsolete design loads (N-30, NK-80) and current transport loads (AK-15, NK-100) to precisely quantify the deficit in load-bearing capacity. Following the initial analysis, a dedicated calculation model is developed for strengthening the beam with External Prestressed Reinforcement. This model is crucial for determining the necessary prestressing force required to compensate for the established strength deficit. The final stage is a detailed comparative verification of the beam's performance across the first (strength) and second (stiffness and crack resistance) groups of limit states, comparing the results both before and after strengthening. **Results** The study confirmed that typical reinforced concrete beams, designed under obsolete loads, exhibit a load-bearing capacity deficit against modern AK-15/NK-100 standards. A methodology using External Prestressed Reinforcement was substantiated to eliminate this deficit. Modeling verified that the calculated system fully restores the required load-bearing capacity and ensures compliance with modern strength standards, making it the scientifically justified and most appropriate technical solution for modernizing these structures. **Originality** The study develops and numerically verifies an adaptive EPR strengthening methodology for the Vol. 122-62 beam, quantifying its effectiveness against the modern AK-15 load standard. **Practical value.** The study provides a scientifically verified engineering algorithm for the mass modernization of typical bridge beams, ensuring a cost-effective path to restoring safety, durability, and compliance with the AK-15 load standard.

Key words: load-bearing capacity, external prestressed reinforcement, bridge beams, finite element method, crack resistance, transport loads, durability, strengthening, reconstruction, stress-strain state.

Minyukova Anna Dmytrivna, PhD student,
Department of Bridges, Tunnels, and Hydraulic Structures,
E-mail: anyminyukov@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>.
National Transport University, Omelianovycha-Pavlenka St., 1 M. Kyiv, 01010, Ukraine