

## ОЦІНКА КОНСТРУКТИВНОЇ НАДІЙНОСТІ БАЛОК ПРОГОНОВИХ БУДОВ ВТП-16 ДОВЖИНОЮ 16,76 М ПРИ АДАПТАЦІЇ ДО НАВАНТАЖЕНЬ КЛАСУ АК-15

*Мінюкова А.Д.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна, anyminyukov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1830-0189

*Сташук П.М.*, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна, pavlo.stashuk@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5221-7015

## ASSESSMENT OF STRUCTURAL RELIABILITY OF VTP-16 BRIDGE BEAMS (16.76 M) UNDER AK-15 LOAD ADAPTATION

*Minyukov A.D.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine, anyminyukov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1830-0189

*Stashuk P.M.*, Candidate of Sciences (Engineering), State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine, pavlo.stashuk@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5221-7015

**Постановка проблеми.** Проблема старіння та недостатньої несної здатності залізобетонних мостових конструкцій є глобальним викликом для транспортної інфраструктури. Значна частина мостового фонду в багатьох країнах, зокрема в Україні, була збудована в середині минулого століття, проектування цих споруд здійснювалось відповідно до нормативних документів того часу, які не враховували сучасні інтенсивні транспортні потоки та значно більші навантаження (клас АК-15, НК-100).

Це призводить до того, що існуючі конструкції експлуатуються в умовах, які перевищують їхню проектну міцність. Як наслідок, виникають передчасні дефекти, такі як інтенсивне тріщиноутворення, прискорена корозія арматури та прогресуюче зниження жорсткості, що ставить під загрозу безпеку дорожнього руху. Таким чином, виникає об'єктивна необхідність у розробці та впровадженні ефективних інженерних рішень для відновлення та посилення існуючих конструкцій.

Впровадження ефективних методів посилення дозволяє подовжити термін служби споруд, знизити витрати на їх обслуговування та запобігти можливим аваріям, що має значний соціально-економічний ефект. Розробка технічних рішень для підвищення експлуатаційної надійності мостових споруд нададуть практичні рекомендації для інженерів-проектувальників щодо вибору оптимального методу посилення балок типу ВТП-16, що дозволить ефективно використовувати наявні ресурси та забезпечити безпеку експлуатації мостів.

**Аналіз останніх публікацій по проблемі.** Проблема старіння та недостатньої несучої здатності залізобетонних мостових конструкцій є предметом широких наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном. Аналіз останніх публікацій свідчить, що особлива увага приділяється методам посилення, які дозволяють подовжити термін служби споруд та адаптувати їх до сучасних навантажень. У численних дослідженнях українських науковців розглядаються методи підвищення жорсткості та несної здатності прогонових будов мостів. Зокрема, Ключник та Марочка досліджували вплив поперечних діафрагм та горизонтальних шпренгельних ферм на зменшення подовжніх переміщень балок у зоні головних ферм та підвищення ефективності спільної роботи балок і верхніх поясів ферми у металевих мостових конструкціях [1]. Також українські науковці приділяють увагу методам підсилення прогонових балок із застосуванням композитних матеріалів. Іноземні фахівці також активно вивчають методи підсилення мостових балок, зокрема використання зовнішньої попередньо-напруженої арматури та композитних матеріалів. Так, у дослідженні «Experimental Study on Effects of Additional Prestressing Using Fiber Reinforced Polymers and Strands on Deterioration of PSC Bridge Structure» [2] авторського колективу Kim et al., проведено експерименти на реальних зразках мостових конструкцій із додатковим попереднім напруженням. Результати показали, що метод зовнішнього попереднього напруження є найбільш ефективним для підвищення жорсткості: у діапазоні навантажень 200–400 кН він збільшив жорсткість конструкції майже вдвічі порівняно з не посиленими зразками. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, у відкритих джерелах досі недостатньо висвітлено питання впровадження інноваційних технологій посилення прогонових будов. Зокре-

ма, існують прогалини в детальних дослідженнях ефективності методів зовнішнього попереднього напруження та оптимізації конструктивних рішень для забезпечення довговічності та економічної ефективності в умовах реальної експлуатації.

**Формулювання мети дослідження (постановка завдання).** Метою дослідження є комплексний аналіз несної здатності типових мостових балок типу ВТП-16 довжиною 16,76 м при їх адаптації до сучасних навантажень класу АК-15 та НК-100.

**Виклад основних результатів та їх обґрунтування.** Предметом дослідження є прогонові будови, виконані за типовими проєктами, зокрема «ВТП-16». Під час розроблення цих проєктів з метою економії бетону та зниження маси монтажного блоку був зменшений захисний шар бетону. Крім того, для спрощення технології попереднього натягу арматури та зменшення її витрат замість пучків високоміцного дроту, що натягувалися потужними домкратами, було запроваджено технологію натягу окремих дротів (струн) діаметром 3–5 мм. Балки з такою арматурою отримали назву струнобетонних.

Результати обстежень прогонових будов мостів, зведених за цими проєктами, виявили прискорену корозію арматури та руйнування захисного шару бетону. Часто у таких балках виникають обриви струн. Основними причинами цього є: відмова від арматури у пучках, що призвело до значного збільшення площі арматурної сталі у контакті з бетоном, а також зменшення товщини захисного шару бетону.

До недоліків конструктивних рішень проєкту «ВТП-16» належить також улаштування з'єднання діафрагм зварними накладками по закладним деталям у плиті проїзної частини. Внаслідок потрапляння води з проїзної частини ці з'єднання інтенсивно кородують і руйнуються. Аналогічні проблеми виникають і в прогонових будовах за проєктами «ВТП-15» та «ВТП-16», де об'єднання діафрагм у верхній частині виконані поверху полиць: через просочування води відбувається їх корозія і подальше руйнування.

Вказані недоліки зумовлюють обриви дротів у балках і руйнування з'єднань діафрагм. В Україні зафіксовано випадки обвалів балок прогонових будов за проєктами «ВТП-15» і «ВТП-16», у тому числі навіть під дією власної ваги. Найчастіше руйнуються крайні балки прогонів, які інтенсивно звожуються через відведення води з проїзної частини до країв. Недосконала система водовідведення та невдала конструкція тротуарів сприяють потраплянню води на ці балки. Додатковим чинником є застосування протиожеледних матеріалів, хлориди в яких підвищують агресивність вологи та прискорюють корозію [3].

Конструктивні особливості балки за проєктом «ВТП-16» подано на рис. 1.

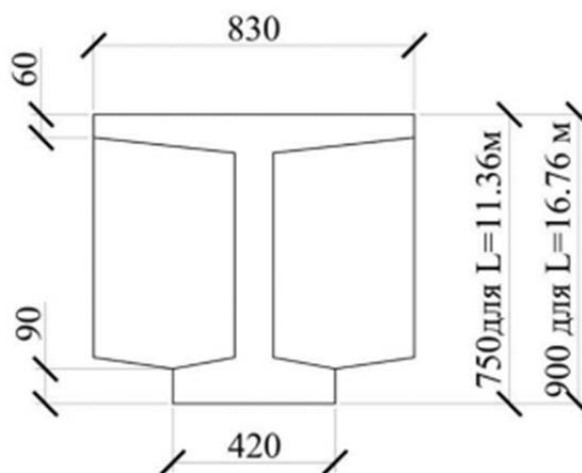


Рисунок 1 – Поперечний переріз балки прогонової будови за типовим проєктом «ВТП-16»

Figure 1 – Cross-section of a span beam according to the typical design «VTP-16»

При розрахунку зусиль в елементах прогонових будов було виконано 3D-модель залізобетонної балки (Рис 2.) в програмному комплексі ЛІРА-САПР та розроблено її розрахункову схему (Рис 3.). Це дозволило відтворити просторову роботу конструкції, врахувати реальні умови закріплення та навантаження – 3D модель в ПК Ліра Сапр).

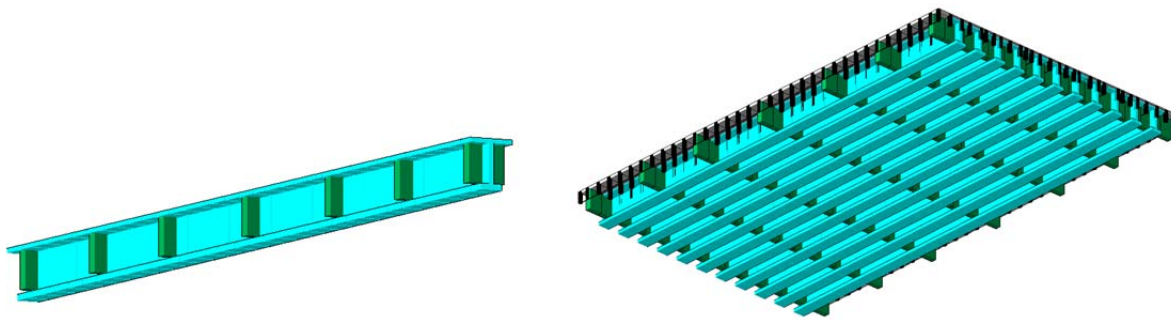


Рисунок 2 – 3D модель в ПК Ліра Сабр  
Figure 2 – 3D model in PC Lyra Sapr.

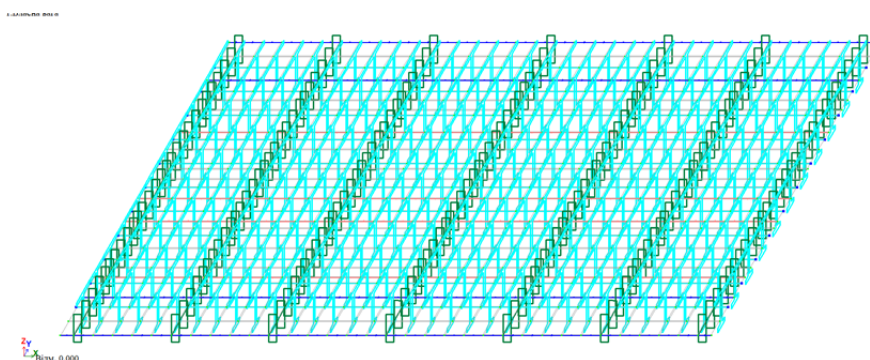


Рисунок 3 – Розрахункова схема в ПК Ліра Сабр  
Figure 3 – Calculation scheme in PC Lyra Sapr.

Згідно з типовим проектом, розрахункова несна здатність балки по згинальному моменту становить 122 тс·м. У зазначеній величині використовується одиниця вимірювання «тонна-сила метр», яка застосовувалася в українській інженерній практиці впродовж другої половини ХХ століття. Це значення визначається як граничний згинальний момент, який конструкція здатна сприймати без втрати працездатності. Параметр характеризує основну міцнісну властивість балки – її здатність чинити опір зовнішньому навантаженню, що викликає згин.

Несна здатність формується за рахунок сумісної роботи бетонної та арматурної складових. При цьому бетон забезпечує сприйняття стискуючих напружень у верхній зоні перерізу, тоді як арматура працює на розтяг у нижній зоні. Важливим є також розташування нейтральної осі, яка визначає розподіл напружень у поперечному перерізі та впливає на ефективність використання матеріалів.

За результатами чисельного моделювання в ПК «ЛІРА-САПР» встановлено, що максимальний згинальний момент від нормативних транспортних навантажень типу Н-30 та НК-80 становить 98 тс·м. Це менше за проектну несучу здатність балки (122 тс·м), визначену згідно з типовим проектом. Розрахунок показує, що балка прогонової будови сприймає саме ті навантаження, для яких вона була розрахована, і має близько 20 % резерву міцності. Це показує, що конструкція відповідала нормам, що діяли на момент її проектування.

Епюри згинальних моментів  $M_x$  балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, від поєднання навантажень НК-80 та постійних наведено на Рис. 4.

У той же час, моделювання показало, що при навантаженнях більш високого рівня: АК-15 та НК-100 — максимальний згинальний момент досягає 142 тс·м та 133 тс·м (рис.5 та Рис.6), що перевищує проектну несну здатність балки. Це демонструє, що при таких умовах конструкція не забезпечує нормативну міцність, резерву міцності немає, і виникає ризик утворення тріщин, пластичних деформацій або руйнування. Таким чином, результати показують обмеження експлуатаційної спроможності балок даного випуску при перевищенні проектних навантажень.

РСЗ розрахункові. Оцінювач максимальних значень (Таблиця ДБН\_1)  
Епюра  $M_u$  (розрахунковий переріз)  
Одиничний вантаж - 1 т

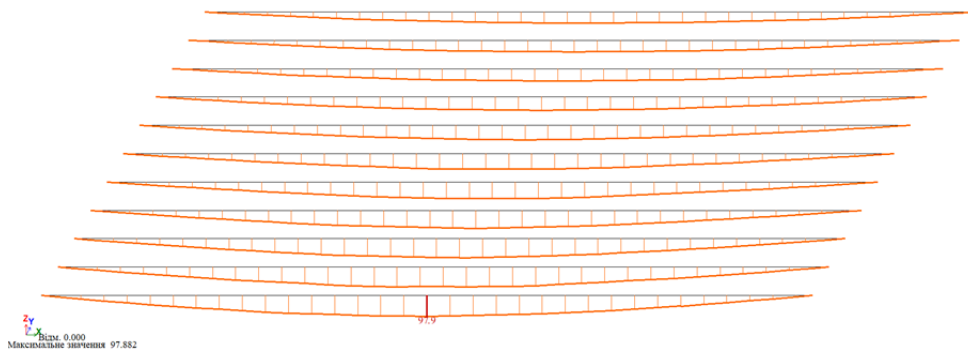


Рисунок 4 – Епюри згинальних моментів  $M_u$  балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, НК-80 + постійні (max = 97,9 тс·м)  
Figure 4 – Bending moment diagrams  $M_u$  of span beams from calculated load combinations, NK-80 + constant (max = 97.9 ts·m)

РСЗ розрахункові. Оцінювач максимальних значень (Таблиця ДБН\_1)  
Епюра  $M_u$  (розрахунковий переріз)  
Одиничний вантаж - 1 т

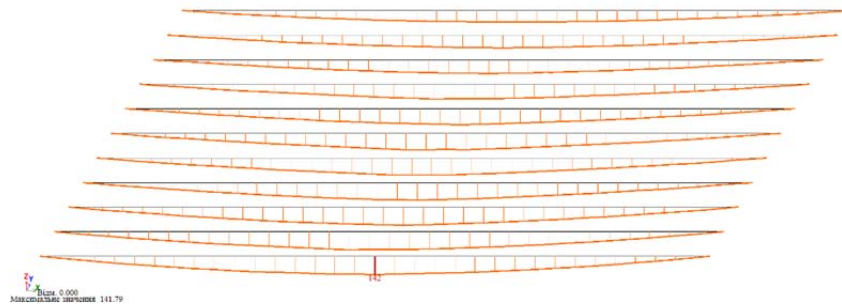


Рисунок 5 – Епюри згинальних моментів  $M_u$  балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, АК-15 + постійні (max = 142 тс·м)  
Figure 5 – Diagrams of bending moments  $M_u$  of span beams from calculated load combinations, АК-15 + constant (max = 142 ts·m)

РСЗ розрахункові. Оцінювач максимальних значень (Таблиця ДБН\_1)  
Епюра  $M_u$  (розрахунковий переріз)  
Одиничний вантаж - 1 т

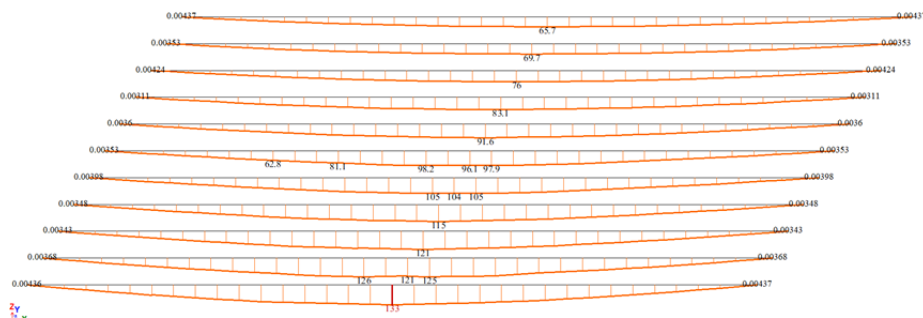


Рисунок 6 – Епюри згинальних моментів  $M_u$  балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, НК-100 + постійні (max = 133 тс·м)  
Figure 6 – Bending moment diagrams  $M_u$  of span beams from calculated load combinations, НК-100 + constant (max = 133 ts·m)

Для забезпечення несної здатності даної типової балки, яка використовується на існуючих мостах на автошляхах України, відносно сучасних транспортних навантажень з метою її підсилення було визначено необхідну додаткову площу арматури за формулою:

Для забезпечення необхідної несучої здатності, яка відповідає сучасним нормативним вимогам, був проведений розрахунок. Результати показали, що для посилення конструкції звичайною арматурою необхідно встановити два стержні діаметром 32 мм. Це рішення дозволяє компенсувати дефіцит міцності, який було виявлено у типових балок.

На рисунку 7 представлено розрахункову модель поперечного перерізу балки прогонової будови за типовим проектом «ВТП-16» із посиленням двома стержнями звичайної арматури.

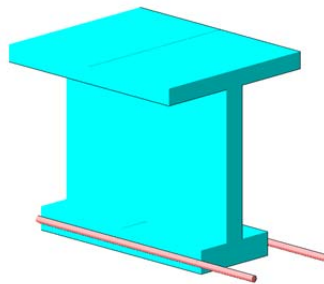


Рисунок 7 – Розрахункова модель поперечного перерізу балки прогонової будови за типовим проектом «ВТП-16» з посиленням двома стержнями звичайної арматури  
Figure 7 – Calculation model of the cross-section of a span beam according to the typical design «VTP-16» with reinforcement with two rods of conventional reinforcement

Після данного посилення несна здатність балки відносно навантажень АК-15 забезпечена ( $184 \text{ тс} \cdot \text{м} < 193 \text{ тс} \cdot \text{м}$ ). Несна спроможність перерізу визначається за формулою:

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

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, яка 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:

$$M_{\text{гр}} = 45,5 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

Таким чином, Найбільший розрахунковий згинальний момент від постійних та тимчасових навантажень, що виникає в середині прогону ( $M_{\text{гр.пос}}$ ) був визначений як:

$$M_{\text{гр.пос}} = 122 \text{ тс} \cdot \text{м} + 45 \text{ тс} \cdot \text{м} = 167 \text{ тс} \cdot \text{м} > 142 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

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.

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).

Для оцінки ефективності запропонованого підсилення балки звичайною арматурою було проведено розрахунок переміщень прогонової будови під дією власної ваги. Розрахункова модель дозволяє визначити деформації балки у вертикальній площині (по осі Z) та оцінити, наскільки введення додаткових стержнів впливає на загальну жорсткість конструкції. На Рис. 8 наведено епюру переміщень для підсиленої балки, де максимальне значення прогину становить 16,7 мм.

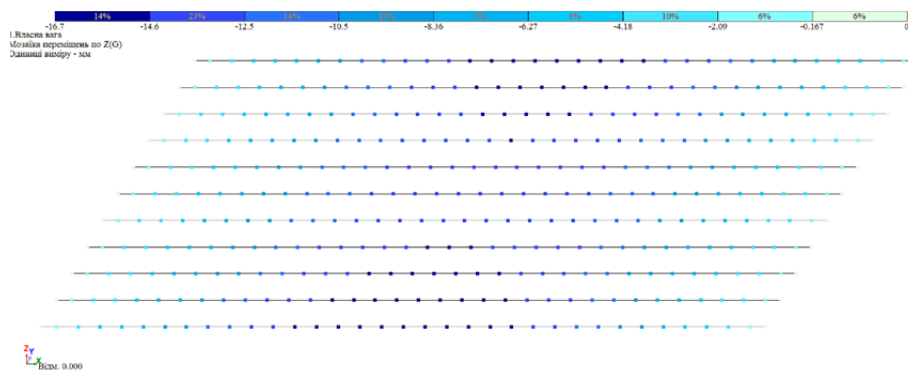


Рисунок 8 – Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги (max = 16,7 мм) при підсиленні звичайною арматурою  
 Figure 8 – Movement of beams of the span structure along the Z axis due to their own weight (max = 16.7 mm) when reinforced with conventional reinforcement

Після підтвердження ефективності посилення балки звичайною арматурою наступним етапом дослідження був розрахунок з використанням попередньо-напруженої арматури, що дозволяє оцінити вплив попереднього натягу на несучу здатність, прогини та тріщиностійкість балки, а також порівняти ефективність обох методів посилення для забезпечення безпечної експлуатації під сучасні підвищені навантаження.

Моделювання такого посилення здійснено шляхом введення в розрахункову схему додаткового зусилля попереднього натягу, яке створює в нижній, розтягнутій зоні бетону постійні стискальні напруження і тим самим зменшує розтягувальні напруження від зовнішніх навантажень.

Для розрахунку використано чотири канати діаметром 15,2 мм, площа поперечного перерізу кожного — 140 мм<sup>2</sup>. Розрахунок передбачає визначення необхідної сили натягу та оцінку впливу попередньо-напруженої арматури на несучу здатність, прогини та тріщиностійкість балки під сучасні навантаження.

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

$$M_{гр} = 60,9 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

Таким чином, сумарний граничний момент опору підсиленої балки ( $M_{гр.пос}$ ) попередньо-напруженої арматури був визначений як:

$$M_{гр.пос} = 122 \text{ тс} \cdot \text{м} + 61 \text{ тс} \cdot \text{м} = 183 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

При підсиленні балки прогонової будови чотирма попередньо напруженими канатами діаметром 15,2 мм, несуча здатність балки прогонової будови відносно навантажень АК-15 та НК-100 буде забезпечено,  $183 \text{ тс} \cdot \text{м} > 142 \text{ тс} \cdot \text{м}$ .

Для оцінки тріщиностійкості було виконано відповідний розрахунок, який відповідає вимогам другої групи граничних станів. Цей розрахунок дозволяє визначити, чи виникають тріщини під дією експлуатаційних навантажень та оцінити величину розкриття можливих тріщин, що важливо для забезпечення довговічності та надійності конструкції.

Аналіз показав, що попередньо-напружені канати створюють у нижній, розтягнутій зоні бетону постійні стискальні напруження, які компенсують розтягувальні напруження від зовнішніх навантажень. Завдяки цьому тріщини на стадії посилення та експлуатації не виникають, що підтверджує ефективність застосування попередньо-напруженої арматури для підвищення несучої здатності, обмеження прогинів і забезпечення тріщиностійкості балки під сучасні транспортні навантаження.

Для оцінки впливу підсилення попередньо-напруженою арматурою на деформативність балок прогонової будови було проведено розрахунок переміщень по осі Z під дією власної ваги. На Рис. 9 наведено результати цього розрахунку, де максимальне вертикальне переміщення становить 16,7 мм.



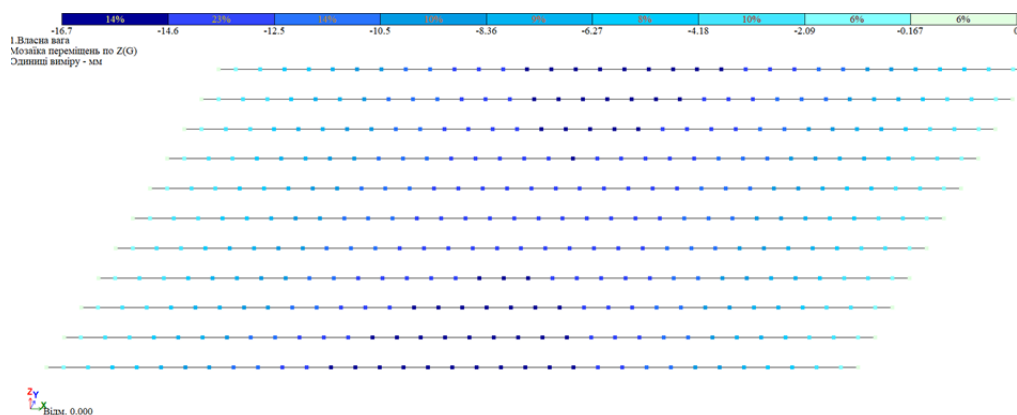


Рисунок 9 – Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги (макс = 16,7 мм) при підсиленні поперечно-напруженою арматурою  
Figure 9 – Movement of beams of the span structure along the Z axis due to their own weight (max = 16.7 mm) when reinforced with transversely tensioned reinforcement

Проведені чисельні дослідження та розрахунковий аналіз напружено-деформованого стану мостових балок типу ВТП-16 під впливом сучасних транспортних навантажень класу АК-15 дозволяють зробити низку важливих висновків щодо ефективності різних методів посилення. Як показав початковий розрахунок, існуюча конструкція балки ВТП-16, спроектована на нормативні навантаження Н-30 та НК-80, демонструє значний дефіцит несучої здатності при сприйнятті сучасних навантажень АК-15 та НК-100. Цей дефіцит становить 43 тс·м, що підкреслює критичну актуальність проблеми модернізації таких споруд. Детальний порівняльний аналіз технічних показників балки до та після застосування різних методів посилення представлено в Таблиці 1. Розрахунок переміщень балок прогонової будови показав, що максимальні прогини під дією власної ваги значно зменшуються після застосування підсилення. У вихідному стані балки прогин складав 21,3 мм. Після підсилення звичайною арматурою він зменшився до 18,8 мм, а при застосуванні попередньо-напруженої арматури — до 14,1 мм. Зменшення прогину свідчить про підвищення жорсткості конструкції та ефективність обраного методу підсилення.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз технічних показників балки ВТП-16 до та після підсилення

Table 1 – Comparative analysis of technical parameters of the VTP-16 beam before and after reinforcement

| Показник                       | Балка без посилення (існуюча) | Балка, посилена звичайною арматурою | Балка, посилена попередньо-напруженою арматурою |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Несна здатність перерізу, тс·м | 141                           | 193                                 | 215                                             |
| Відповідність вимогам міцності | Не відповідає                 | Відповідає                          | Відповідає (з запасом)                          |
| Прогин, мм                     | 21,3                          | 18,8                                | 14,1                                            |
| Тріщиностійкість               | Тріщини можливі /наявні       | Тріщини можливі                     | Практично виключена                             |
| Збільшення жорсткості          | —                             | Часткове                            | Значне                                          |

**Висновок:** За результатами проведеного дослідження та чисельного моделювання напружено-деформованого стану мостових балок типу ВТП-16 під впливом сучасних транспортних навантажень класу АК-15, було встановлено, що існуюча типова балка ВТП-16, маючи проектну несну здатність 141 тс·м, не відповідає сучасним вимогам, оскільки розрахунковий згинальний момент від навантажень АК-15 становить 184 тс·м. Це підтверджує значний дефіцит міцності у 43 тс·м, що вимагає компенсації для забезпечення експлуатаційної надійності.

Посилення балки звичайною арматурою (два стержні діаметром 32 мм) підвищує її несну здатність до 193 тс·м, що відповідає вимогам міцності. Однак, цей метод має обмеження: прогин знижується лише до 18,8 мм, а ризик тріщиноутворення залишається, що вказує на потенційні проблеми з довготривалою експлуатацією в агресивних середовищах.

Метод посилення попередньо-напруженою арматурою демонструє вищу ефективність. Несна здатність балки зростає до 215 тс·м, забезпечуючи значний запас міцності. Крім того, прогин суттєво зменшується до 14,1 мм, що свідчить про значне підвищення жорсткості. Найважливішим є те, що цей метод практично усуває утворення тріщин, істотно підвищуючи довговічність балки.

Таким чином, проведений аналіз чітко ілюструє, що метод зовнішнього попереднього напруження є найбільш ефективним рішенням для комплексної адаптації мостових балок ВТП-16 до сучасних експлуатаційних вимог. Він забезпечує не тільки необхідну міцність, але й високу жорсткість та довговічність, що є критично важливим для забезпечення безпечної та тривалої експлуатації мостових споруд.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ключник, С. В., & Марочка, В. В. (2014). Огляд варіантів підсилення та ремонту балок проїзної частини поверхового типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, (5), 35–40.
2. Kim, T.-K., Jung, W.-T., Park, J.-S., & Park, H.-B. (pik). Experimental Study on Effects of Additional Prestressing Using Fiber Reinforced Polymers and Strands on Deterioration of PSC Bridge Structure (Англійською)
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.
4. Стоянович С. В., Полюга Р. І. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної монолітної попередньо напруженої прогонової будови шляхопроводу. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 221–233.
5. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).
6. Лантух-Лященко А.І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Вип. 62. – К.:2001.
7. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Вип. 57. – 1999. – С.183-188.
8. ДБН В.2.3-22:2009 «Мости та труби. Основні вимоги проектування».
9. Борщов В.І., Закора О.Л. Мости і труби. Підручник. Том 2. Залізобетонні мости. Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2012. 393 с.
10. М. М. Попович, О. С. Миронюк, В. І. Борщов. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів.
11. Р В.3.2-03450778-832:2013 Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи).
12. Thuraichamy Gugesan Suntharavadivel, Thiru Aravinthan Overview of external post-tensioning in bridges.

### REFERENCES

1. Klyuchnik, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of Strengthening and Repair Options for Superstructure Deck Beams. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, (5), 35–40.
2. Kim, T.-K., Jung, W.-T., Park, J.-S., & Park, H.-B. (pik). Experimental Study on Effects of Additional Prestressing Using Fiber Reinforced Polymers and Strands on Deterioration of PSC Bridge Structure.
3. Larysa Bodnar, Serhii Zavorodniy, 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].
4. Serhii Stoianovych, Roman Poliuga. Research of the stressed and deformed state of a reinforced concrete monolithic pre-stressed runway structure. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2023. Iss. 28. P. 221–233 [in Ukrainian].
5. DSTU 9181:2022 Guidelines for assessing and forecasting the technical condition of road bridges. Kyiv, 2022. – 32 p. (Information and documentation).



6. Lantukh-Liashchenko A. I. Model for determining the reliability of a span structure under conditions of incomplete information // Collection «Highways and Road Construction». – Issue 62. – Kyiv, 2001.
7. Lantukh-Liashchenko A. I. Assessment of structural reliability using a Markov stochastic process model with discrete states // Collection «Highways and Road Construction». – Issue 57. – 1999. – P. 183-188.
8. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and culverts. Basic design requirements.
9. Borshchov V. I., Zakora O. L. Bridges and culverts. Textbook. Vol. 2. Reinforced concrete bridges. Dnipro: Publishing House of DNUZT, 2012. – 393 p.
10. M. M. Popovych, O. S. Myroniuk, V. I. Borshchov. Strengthening of reinforced concrete girder spans using struts and prestressed rods.
11. R V.3.2-03450778-832:2013 Recommendations for the design of monolithic prestressed bridges with stress applied to concrete (post-tensioning systems).
12. Thuraichamy G, Ganesan S, Suntharavadivel, Thiru Aravinthan Overview of external post-tensioning in bridges.

### РЕФЕРАТ

Мінюкова А.Д. Оцінка конструктивної надійності балок прогонових будов ВТП-16 довжиною 16,76 м при адаптації до навантажень класу АК-15 / А.Д. Мінюкова, П. М. Сташук / Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Стаття присвячена дослідженню конструктивної надійності мостових балок ВТП-16 довжиною 16,76 м при адаптації до сучасних навантажень класу АК-15. У роботі проведено аналіз несучої здатності балок у вихідному стані, визначено їх відповідність проєктним нормативам минулих періодів та обґрунтовано необхідність підсилення для забезпечення експлуатаційної надійності в умовах сучасних підвищених навантажень. Додатково виконано математичне моделювання різних варіантів підсилення з використанням як звичайної, так і попередньо-напруженої арматури.

Мета роботи – оцінка несної здатності та конструктивної надійності мостових балок ВТП-16 при дії навантажень класу АК-15, а також визначення ефективних методів підсилення з використанням звичайної та попередньо-напруженої арматури.

Методика – побудова 3D-моделі балки у програмному комплексі ЛІРА-САПР, виконання розрахунків несучої здатності за першою групою граничних станів та розрахунків на тріщиностійкість за другою групою. Досліджено ефективність посилення шляхом введення додаткової звичайної арматури та зовнішньої попередньо-напруженої арматури.

Результати – встановлено, що в початковому стані балки ВТП-16 відповідають проєктним нормативам минулих років (Н-30, НК-80), проте не забезпечують необхідної несної здатності при діях сучасних навантажень (АК-15, НК-100). Розрахунки показали, що посилення балки звичайною арматурою діаметром 32 мм дозволяє забезпечити нормативну міцність, тоді як використання попередньо-напруженої арматури чотири канати діаметром 15,2 мм забезпечує підвищену несучу здатність, зменшення прогинів та відсутність тріщин на стадії експлуатації.

Висновки – результати дослідження підтверджують доцільність підсилення мостових балок ВТП-16 для їх адаптації до сучасних транспортних навантажень. Застосування попередньо-напруженої арматури є найбільш ефективним методом, що дозволяє забезпечити необхідний рівень міцності, жорсткості та тріщиностійкості, підвищуючи надійність та довговічність мостових конструкцій.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЗАЛІЗОБЕТОННІ ПРОГОНОВІ БУДОВИ, ДОВГОВІЧНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ, ВТОМНІ ПОШКОДЖЕННЯ, ДОДАТКОВЕ ПОПЕРЕДНЄ НАПРУЖЕННЯ, МЕТОД ЗМІЦНЕННЯ, ЗОВНІШНЄ ПОПЕРЕДНЄ НАПРУЖЕННЯ.

### ABSTRACT

Minyukova A.D., Stashuk P.M., Assessment of Structural Reliability of VTP-16 Bridge Beams (16.76 m) under AK-15 Load Adaptation. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article is devoted to the assessment of the structural reliability of VTP-16 bridge beams with a span length of 16.76 m under adaptation to modern traffic loads of class AK-15. The study includes an analysis of the bearing capacity of the beams in their original condition, identification of compliance with the design standards of the period when they were constructed, and justification of the need for strengthening to

ensure operational reliability under current increased loads. Numerical modeling was carried out to evaluate different strengthening approaches, including reinforcement with conventional steel bars and external prestressed tendons. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed strengthening methods and confirm their applicability for extending the service life and safety of existing bridge structures.

**Objective** – to assess the load-bearing capacity and structural reliability of VTP-16 bridge beams under AK-15 class loads, and to determine effective strengthening methods using conventional and prestressed reinforcement.

**Methodology** – a 3D model of the beam was developed in the LIRA-SAPR software package, with calculations performed for load-bearing capacity according to the first group of limit states and for crack resistance according to the second group. The effectiveness of strengthening was evaluated by introducing additional conventional reinforcement and external prestressed reinforcement.

**Results** – it was established that in their initial state, VTP-16 beams comply with the design norms of past years (H-30, NK-80), but do not provide sufficient load-bearing capacity under modern loads (AK-15, NK-100). Calculations showed that strengthening the beams with 32 mm diameter conventional reinforcement ensures normative strength, while the use of four 15.2 mm diameter prestressed strands provides increased load-bearing capacity, reduced deflections, and prevents cracking during operation.

**Conclusions** – the study confirms the feasibility of strengthening VTP-16 bridge beams to adapt them to modern traffic loads. The use of prestressed reinforcement is the most effective method, ensuring the required levels of strength, stiffness, and crack resistance, thereby enhancing the reliability and durability of bridge structures.

**KEYWORDS:** REINFORCED CONCRETE BRIDGE STRUCTURES, DURABILITY OF STRUCTURES, FATIGUE DAMAGE, ADDITIONAL PRESTRESSING, STRENGTHENING METHOD, EXTERNAL PRESTRESSING.

#### **АВТОРИ:**

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

Сташук Павло Михайлович, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна, e-mail: [pavlo.stashuk@gmail.com](mailto:pavlo.stashuk@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

#### **AUTHOR:**

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

Stashuk Pavlo Mykhailovych, Candidate of Sciences (Engineering), State Enterprise “National Institute for Development Infrastructure” (SE “NIDI”), Kyiv, Ukraine, E-mail: [pavlo.stashuk@gmail.com](mailto:pavlo.stashuk@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

#### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Онищенко А.М., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Мостів, тунелів та гідротехнічних споруд», Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Касків В. І., кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна.

#### **REVIEWER:**

Onyschenko A.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels, and Hydraulic Structures, National Transport University, , Kyiv, Ukraine.

Kaskiv V. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research, State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development», Kyiv, Ukraine.