

**ПІДСИЛЕННЯ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИТАННЯМ ПОПЕРЕДНЬО
НАПРУЖЕНИХ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ**

**STRENGTHENING OF MONOLITHIC REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES USING PRE-TENSIONED
REINFORCING ROPES**

**Сморкалов Д.В., к.т.н., доцент, Затилюк Г.А., доктор філософії,
доцент, Винокур В.С., аспірант (Київський національний університет
будівництва і архітектури)**

**Smorkalov D.V., Ph.D., Associate Professor, Zatyliuk G.A, Doctor of
Philosophy, Associate Professor, Vynokur V.S., Ph.D. student (Kyiv National
University of Civil Engineering and Architecture)**

У статті наведені варіанти підсилення конструкцій за допомогою арматурних канатів. Сьогодні підсилення може виконуватися різними методами, включаючи використання металевих елементів, композитних матеріалів або залізобетонних обойм. Однак використання попереднього напруження істотно покращує можливості підсилення, збільшуючи несучу здатність та надійність конструкцій. Попереднє напруження може бути виконане за допомогою композитних матеріалів або попередньо напруженої арматури, такої як попередньо напружені канати. Використання попередньо напружених канатів в новому будівництві стає все більш поширеним, але для підсилення такої метод не використовується, хоча для цього існують всі можливості.

In the article, options for strengthening with the help of reinforcing ropes are also developed, and options for strengthening structures are developed. The construction history has always reflected the evolution of technology and human needs. One of the key problems was the need to enhance structures, which stimulated the search for effective methods. Building structures are subject to wear and tear and need to be restored and strengthened, and can also undergo changes in load that require their strengthening. In addition, in connection with the situation in our country, it should be noted that buildings can be damaged as a result of explosions and require reinforcement. Ukraine is witnessing the growing popularity of "prestressing" technology, which can open up new opportunities for construction progress. Research in this area is constantly developing, opening up wide prospects for using prestressed ropes in construction and engineering. New technologies and materials significantly change approaches to strengthening structures, providing them with great strength and stability. Today, reinforcement can be done by various methods, including the use of metal elements, composite materials, or reinforced concrete brackets. However, the use of prestressing significantly improves the strengthening capabilities, increasing the load-bearing capacity and reliability of structures. Prestressing can be done using composite materials or prestressed reinforcement such as prestressed ropes.

The use of pre-stressed ropes in new construction is becoming more and more common, but this method is not used for reinforcement, although there are all possibilities for this. In the world, there is a trend towards the increasing use of reinforced concrete, which indicates the importance of this direction of development.

Ключові слова: підсилення залізобетонних конструкцій, попередньо напружені арматурні канати, постнапруження, post-tensioning, канат, методи підсилення, технології підсилення.

Keywords: reinforcement of reinforced concrete structures, pre-tensioned reinforcement ropes, post-tensioning, post-tensioning, rope, methods of strengthening, technologies of strengthening.

Вступ. Сьогодні, в епоху швидкого науково-технічного прогресу, проблема підсилення конструкцій залишається актуальною, але змінилася її сутність та складність. З розвитком інженерних наук, новітніх матеріалів та комп'ютерних технологій виникають все більш ефективні методи підсилення, які враховують як сучасні вимоги безпеки, так і екологічні стандарти. В Україні проблема підсилення конструкцій є нагальною, переважно через те, що більшість будівель була зведена ще в радянські часи, і за цей період вони зазнали фізичного зносу. Додатково, багато конструкцій пошкоджено внаслідок бойових дій. Особливу увагу приділяють підсиленню багатопролітних споруд, таких як шляхопроводи, мости та інші.

Арматурне підсилення та композитна арматура дозволяють інженерам зміцнювати будівлі та споруди, надаючи їм додаткову стійкість до навантажень і збільшуючи їх життєвий цикл. Арматура, використовувана в будівництві, зазвичай виготовляється зі сталі та використовується для підвищення міцності та стійкості бетонних конструкцій.

В останні десятиліття зростає популярність підсилення залізобетонних елементів за допомогою композитних елементів [1, 2], хоча використання таких матеріалів з попереднім напруженням у нашій країні відбувається дуже рідко.

Композитна арматура, у свою чергу, представляє собою нове покоління підсилюючих матеріалів, які складаються з полімерних композитів, скловолкна або вуглецевих волокон.

Але вартість підсилення даних конструкцій за допомогою композитних матеріалів достатньо висока.

В Україні, в новому будівництві, зараз спостерігається зростання використання технології "постнапруження" або "post-tensioning", яка полягає в застосуванні монолітних конструкцій з попередньо напруженими канатами. Вітчизняна будівельна практика використовує термін "попередньо напруженні залізобетонні конструкції з натягом канатної арматури на бетон". Ця технологія передбачає використання канатів як напруженої арматури. Постнапруження з арматурними канатами нерідко

застосовується при будівництві конструкцій з великими прольотами., іноді дана технологія є безальтернативною [3].

В нашій країні, в громадському будівництві, більшої популярності набула технологія без зчеплення з бетоном, що демонструє ряд переваг. Вона не лише більш зручна, але й менше залежить від погодних умов, що дозволяє виконувати будівництво у будь-яку пору року.

Основна концепція (Рисунок 1) полягає в тому, що під час арматурних робіт між верхньою та нижньою сіткою арматури розміщується арматурний канат, що знаходиться всередині оболонки і утримується у криволінійному положенні відповідно до епюру згинальних моментів.

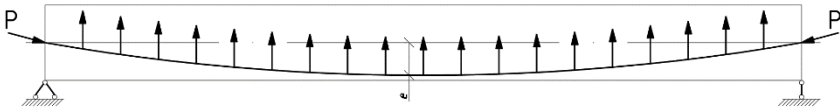


Рисунок 1 – Принципова схема постнапруження з реактивними зусиллями від натягу

Ключовим елементом є арматурний канат К7, який має кілька діаметрів, зокрема 15.2 та 15.7 мм. У процесі арматурних робіт канат фіксується на торцях конструкції за допомогою анкерів та цанг. Натяг канату здійснюється за допомогою гідравлічного обладнання, що забезпечує необхідну напругу для ефективного функціонування системи.

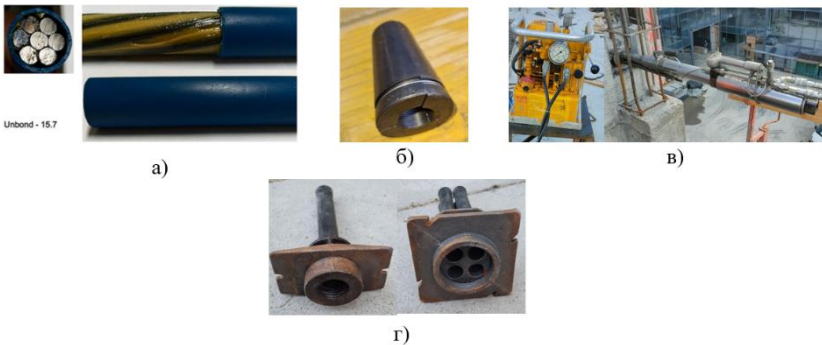


Рисунок 2 – Основні елементи постнапруження:

- а) канат діаметром 15.7 мм, б) цанга для фіксації канатів в анкерах, в) гідравлічні пристрої, г) анкерні пристрої

Дослідження в області попередньо напружених канатів постійно розвиваються. Вчені та інженери активно працюють над вдосконаленням матеріалів, методів виробництва та стратегій визначення оптимальних параметрів напруження для конкретних застосувань. Нові технології

сприяють створенню канатів із покращеною міцністю та тривалістю експлуатації, що розширює можливості їх застосування. Проектування попередньо напружених канатів на сучасному етапі вимагає комплексного підходу.

Це включає в себе не лише вибір відповідного матеріалу та конструкції каната, але й розрахунок оптимального рівня напруження, врахування впливу зовнішніх факторів, таких як температура та вологість, а також визначення необхідних методів моніторингу та обслуговування.

Зважаючи на це, можна відзначити, що використання попередньо напружених канатів широко поширене як у будівництві за межами країни, так і в Україні. Ця технологія може застосовуватися не лише для нових будівель, а й для підсилення існуючих конструкцій, що може істотно поліпшити їхню міцність та тривалість експлуатації.

Аналіз існуючих методів підсилення з використанням попередньо напружених канатів. Проаналізувавши матеріали [3, 4], можна зробити висновок, що використання технології постнапруження за межами країни ширше застосовується, оскільки воно базується на довгостроковому досвіді та постійних інноваціях. Це охоплює використання спеціалізованого обладнання, високоякісних матеріалів та передових методів контролю якості. Не менш важливою є наявність висококваліфікованих фахівців, які постійно підвищують свій рівень кваліфікації та активно обмінюються досвідом з колегами з різних країн.

Підсилення залізобетонних елементів за допомогою попередньо напружених канатів також має свою градацію і поділяється на 2 методи:

- Підсилення конструкцій за допомогою встановлення зовнішніх канатів. У вітчизняній практиці найбільш використовуваний спосіб підсилення за допомогою шпренгельних затяжок, у закордонних джерелах відомий як «Reinforcing external post-tensioning».
- Підсилення конструкцій за допомогою встановлення попередньо напружених арматурних канатів, з подальшим обетонуванням. В закордонних джерелах відомий як «Reinforcing internal post-tensioning».

Метод підсилення конструкцій за допомогою встановлення зовнішніх канатів («Reinforcing external post-tensioning») використовується для підвищення несучої здатності (рисунок 3). Цей підхід передбачає застосування зовнішніх натягувальних елементів, таких як сталеві канати або стрічки, які накладаються на поверхню конструкції та застосовуються під натягом. Це дозволяє підсилити конструкцію без необхідності внесення змін у її основну структуру, що робить цей метод ефективним та економічним для ремонту та посилення існуючих споруд.



Рисунок 3 – Підсилення плити перекриття паркінгу за допомогою встановлення зовнішніх напружених канатів («Reinforcing external post-tensioning»)

Основні переваги даного методу:

1. *ефективність у підсиленні конструкцій*: цей метод дозволяє значно підвищити навантажувальну здатність та стійкість конструкції без значних змін у її внутрішній структурі;
2. *економія часу та витрат*: у порівнянні з альтернативними методами підсилення, зовнішнє підсилення може бути виконане швидше та за менші кошти, оскільки воно не вимагає великого обсягу будівельних робіт із застосуванням важкого обладнання;
3. *мінімальні втрати простору*: використання зовнішніх натягувальних елементів не впливає на внутрішній простір конструкції, що може бути важливим для будівель або споруд, де обмежений простір є важливим фактором.

Основні недоліки даного методу:

1. *вигляд*: зовнішні елементи можуть змінити зовнішній вигляд конструкції, що може бути неприйнятним для деяких архітектурних проектів;
2. *вплив на естетику*: можуть знадобитися додаткові заходи оздоблення для інтеграції зовнішніх елементів у дизайн споруди;

3. *регулярне обслуговування*: зовнішні елементи піддаються впливу атмосферних умов, що може потребувати регулярного обслуговування та обслуговування для забезпечення тривалого терміну експлуатації.
4. *підвищені вимоги до термостійкості*: натягнуті елементи, зокрема сталеві канати чи стрічки, можуть піддаватися деформації або пошкодженню внаслідок високих температур, що може призвести до зниження їхньої ефективності та/або руйнування з подальшою втратою міцності всієї конструкції.

Даний метод ефективно застосовувати в конструкціях з меншими вимогами до вогнестійкості, зокрема, в мостах та шляхопроводах, де важливо забезпечити оптимальне співвідношення міцності та ваги, щоб забезпечити економічну ефективність проекту. Хоча їх все ж можливо використовувати в комерційних будівлях, таких як паркінги, де основною метою є забезпечення безпеки та зручності користувачів, а також ефективне використання простору і ресурсів.

Підсилення конструкцій за допомогою встановлення попередньо напружених арматурних канатів з подальшим обетонуванням («Reinforcing internal post-tensioning») (Рисунок 4) дозволяє підвищувати міцність структур, зокрема бетонних, шляхом використання напруження внутрішніх елементів. Сталева арматура або канати вкладаються всередину бетонних елементів, таких як колони, балки або плити, і потім натягуються, щоб створити реактивні сили, які збільшують міцність структури.



Рисунок 4 – Підсилення монолітних балок шляхопроводу за допомогою напружених канатів із подальшим обетонуванням («Reinforcing internal post-tensioning»)

Ця технологія вирішує різні інженерні завдання, такі як зменшення прогину конструкцій, підвищення міцності під час землетрусів або зменшення розміру перерізу бетонних елементів. Її можна використовувати як при будівництві нових споруд, так і при реконструкції вже існуючих.

Основні переваги даного методу:

1. *мінімальний вплив на зовнішній вигляд*: оскільки натягнуті елементи розташовані всередині конструкції, цей метод підсилення майже не впливає на зовнішній вигляд споруди;
2. *ефективне розподілення навантаження*: внутрішнє підсилення дозволяє рівномірно розподілити навантаження по всій конструкції, що допомагає збільшити її стійкість та несучу здатність;
3. *зменшення потреби в обслуговуванні*: натягнуті елементи, розташовані всередині конструкції, менше піддаються впливу атмосферних чинників, що може зменшити необхідність у регулярному обслуговуванні;
4. *збільшена вогнестійкість*: внаслідок використання додаткового шару бетонування можна значно збільшити вогнестійкість конструкції, що робить її більш надійною та безпечною в умовах можливого виникнення пожежі.

Основні недоліки даного методу:

1. *складність монтажу*: розташування та натягнення елементів всередині конструкції може бути складним процесом, що вимагає спеціалізованого обладнання та кваліфікованої робочої сили;
2. *обмеження доступу для обслуговування та ремонту*: після монтажу внутрішніх натягнутих елементів доступ до них для потенційних обслуговування та ремонту може бути обмеженим, що може вимагати додаткових заходів планування при будівництві.

Постановка мети і задач. Основною метою дослідження є огляд та вибір оптимального методу підсилення залізобетонних конструкцій за допомогою попередньо напружених канатів з метою забезпечення безпеки та стабільності будівельних споруд залежно від умов експлуатації та потенційних ризиків. Вирішення цієї проблеми важливе для інженерної галузі.

До основних задач входить:

- огляд існуючих та розробка нових методів підсилення на основі попередньо напружених канатів;
- результати дослідження спрямуються на вибір оптимального методу підсилення, який забезпечить максимальну безпеку та стабільність будівельних споруд у будь-яких умовах експлуатації.

Результати досліджень. Після отримання цієї інформації можна зазначити, що технологія постнапруження може бути використана для підсилення різноманітних конструкцій. Однак, хотілося б приділити більше уваги саме балочним конструкціям.

Підсилення однопролітних конструкцій за допомогою встановлення зовнішніх напружених канатів («Reinforcing external post-tensioning»):

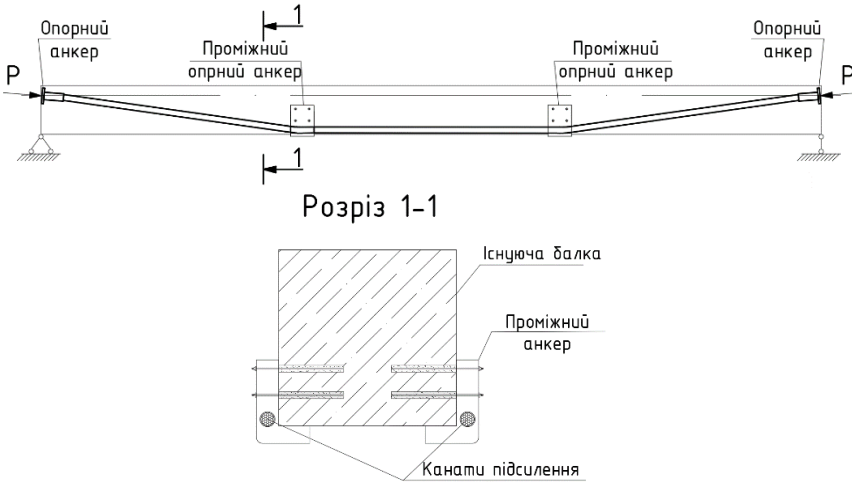


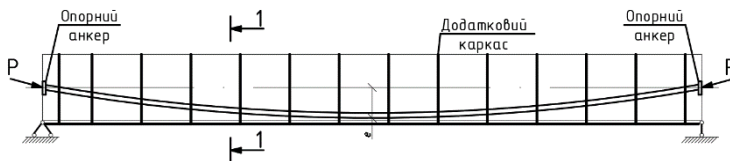
Рисунок 5 – Однопролітна балка, підсилена за аналогією шпренгельної системи з використанням постнапружених канатів («Reinforcing external post-tensioning»)

Підсилення нерозрізних конструкцій за допомогою встановлення зовнішніх напружених канатів («Reinforcing external post-tensioning»):



Рисунок 6 – Нерозрізна балка, підсилена зовнішніми постнапруженими канатами («Reinforcing external post-tensioning»)

Підсилення однопролітних конструкцій за допомогою напружених канатів з подальшим обетонуванням («Reinforcing internal post-tensioning»):



Розріз 1-1

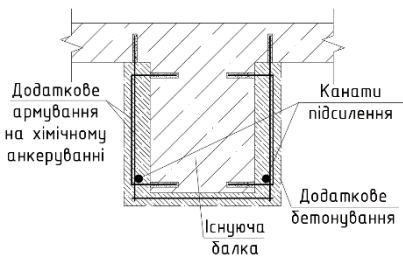
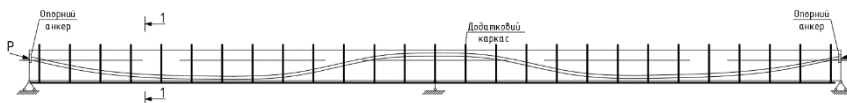


Рисунок 7 – Однопролітна балка, підсилена поснапруженими канатами з додатковим обетонуванням («Reinforcing internal post-tensioning»)

Підсилення нерозрізних конструкцій за допомогою напружених канатів з подальшим обетонуванням («Reinforcing internal post-tensioning»):



Розріз 1-1

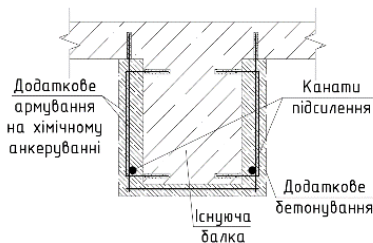


Рисунок 8 – Нерозрізна балка, підсилена за допомогою напружених канатів з подальшим обетонуванням («Reinforcing internal post-tensioning»)

Висновки. Підсумовуючи, можна сказати, що використання попередньо напружених арматурних канатів у монолітних залізобетонних

конструкціях є ефективним методом підсилення. Застосування попередньо напружених канатів дозволяє ефективно компенсувати деформації та забезпечити однорідніший розподіл навантаження на всю конструкцію.

В Україні, на даному етапі досліджень, конструкції з використанням даної технології не використовуються, але її застосування в будівництві для підсилення є досить перспективним, що підтверджує закордонна практика. Технологія підсилення з використанням зовнішніх попередньо напружених канатів є досить ефективною, але вона має свої недоліки, зокрема:

- підвищені вимоги до вогнестійкості;
- потребує виготовлення індивідуальних анкерів.

Отже, у майбутньому використання цього методу підсилення може виявитися менш доцільним порівняно з використанням "внутрішніх" арматурних канатів з подальшим обетонуванням. Дане підсилення, у свою чергу, сприяє підвищенню вогнестійкості конструкції за рахунок додаткового шару обетонування і не потребує встановлення додаткових специфічних анкерів. І хоча цей метод має свої недоліки у формі складнощів з обетонуванням, проблему можна вирішити за допомогою використання торкретування бетону. Ця технологія дозволяє зменшити витрати на опалубку.

Після розгляду всіх запропонованих варіантів підсилення можна зазначити, що використання "внутрішнього" арматурного канату, який об'єднує поперечний переріз за допомогою додаткового обетонування ("Reinforcing internal post-tensioning"), має більший потенціал і перспективи. Цей підхід виявляється більш привабливим через його простоту влаштування, оскільки можна використати загальнодоступні матеріали та забезпечити конструкцію додатковим захистом від вогню.

Використання "внутрішнього" арматурного канату, який об'єднує поперечний переріз за допомогою додаткового обетонування ("Reinforcing internal post-tensioning") дозволяє значно підвищити міцність та довговічність таких конструкцій, зменшити ризик руйнування внаслідок різкого навантаження або впливу небезпечних факторів, особливо для конструкцій з великими прольотами (шляхопроводи, мости, балки).

З метою подальшого розвитку цього підходу планується проведення експериментальних досліджень, які дозволять розробити ефективну методику підсилення.

Отже, цей підхід може бути широко використаним у майбутньому для підсилення існуючих або проектування нових залізобетонних конструкцій, що забезпечить необхідну міцність, надійність та довговічність конструкцій.

References

1. O. V. Panchenko, Ya. L. Ivanytskyi, P. S. Kun, O. D. Zhuravskyi. Vyznachennia dovhovichnosti zalizobetonnykh mostovykh balok, pidsylenykh kompozytnymy

strichkamy // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. - 2017. - Т. 53, № 5. - С. 73-77. -
Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2017_53_5_12

2. О.Панченко, В.Чырва, Т.Чырва, А.Савченко, К.Романенко. Chyselne modeliuвання protsesu ruinuвання zalizobetonnykh balok monolitnoho ohorodzhennia ta yoho posylnennia vuhletsevymy materialamy. Zbirnyk nauk.prats «Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka.» KNUBA.-vyp.6,2020r – s.34-41

3. Smorkalov, D., & Vynokur, V. . (2022). Metodyky rozrakhunku monolitnykh zalizobetonnykh konstruktsii z poperednim napruzheniam armaturnykh kanativ. Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka, (12), 73–83. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.73-83>

4. Smorkalov D.V. Monolitni zalizobetonni konstruktsii z poperedno napruzhenymy kanatamy // Zbirnyk nauk.prats «Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka». KNUBA.- vyp.10, 2022r. S. 136-142 <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.136-142>.

Література

1. О. В. Панченко, Я. Л. Іваницький, П. С. Кунь, О. Д. Журавський. Визначення довговічності залізобетонних мостових балок, підсилені композитними стрічками // Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 2017. - Т. 53, № 5. - С. 73-77. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2017_53_5_12

2. О.Панченко, В.Чирва, Т.Чирва, А.Савченко, К.Романенко. Чисельне моделювання процесу руйнування залізобетонних балок монолітного огороження та його посилення вуглецевими матеріалами. Збірник наук.праць «Будівельні конструкції. Теорія і практика.» КНУБА.-вип.6,2020р – с.34-41.

3. Сморкалов Д.В. Винокур В.С. Методики розрахунку монолітних залізобетонних конструкцій з попереднім напруженням арматурних канатів// Збірник наук.праць «Будівельні конструкції. Теорія і практика». КНУБА.- вип.12, 2023р. С. 73-83 <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.73-83>.

4. Сморкалов Д.В. Монолітні залізобетонні конструкції з попередньо напруженими канатами // Збірник наук.праць «Будівельні конструкції. Теорія і практика». КНУБА.- вип.10, 2022р. С. 136-142 <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.136-142>.