

# Сучасні технології підсилення залізобетонних конструкцій композитною арматурою

Андрій Мурин, Роман Канафоцький, Петро Ковальчик

Кафедра "Мости та будівельна механіка", Національний університет "Львівська політехніка", УКРАЇНА, м. Львів, вул. С.Бандери, 12. E-mail: [muryn@i.ua](mailto:muryn@i.ua)

*Abstract – Necessity of strengthening of reinforced-concrete constructions for industrial building and road bridges are described in the paper. Advantages of application of fiber reinforced plastics comparatively with the traditional strengthening are described. The results of researches of the strengthened beams are analysed, method of calculation of durability of such constructions are offered.*

Ключові слова – підсилення конструкцій, реконструкція мостів, залізобетон, зовнішня композитна арматура.

## I. Вступ

Підсилення будівельних конструкцій як конструктивно-технологічний захід, що забезпечує відновлення або збільшення несучої здатності та надійності окремих конструкційних елементів чи будівлі загалом, є важливою проблемою, із якою все частіше стикаються в усіх країнах світу. Дуже актуальною ця проблема є і в Україні, особливо в промисловому та автодорожньому секторі будівництва. На дорогах загального користування експлуатуються понад 16,1 тис. мостів та шляхопроводів, із яких 93% – залізобетонні та кам'яні. Більшість з них за час тривалої експлуатації отримали значні дефекти й пошкодження, які суттєво знизили їх довговічність і надійність, що на окремих ділянках створює загрозу безаварійному функціонуванню дорожньої мережі. В найближчий період ці мости не можуть бути перебудовані і будуть експлуатуватися при зростаючій інтенсивності руху та збільшенні навантажень від транспортних засобів. Тому їх збереження, підсилення та продовження терміну служби є важливим завданням [1].

Із середини 60 рр. минулого століття крім традиційних способів підсилення конструкцій, на практиці розпочали використовувати інший метод – приклеювання сталевих смуг до поверхні конструкції. Проте використання приклеєних сталевих смуг в окремих випадках є неефективним, особливо при їх експлуатації в умовах вологого й агресивного середовища. Зокрема, у мостових конструкціях негативний вплив атмосферних опадів у присутності хлористих солей спричиняє інтенсивну корозію сталі, що потребує значних коштів на експлуатаційні витрати. Довготривалі дослідження балок із прикріпленими сталевими стрічками показали, що вони кородують навіть за звичайних погодних умов без впливу відлигових солей [2]. Ще більш проблемним є використання сталевих елементів на підприємствах із сильноагресивним хімічним середовищем.

У 70-80 рр. минулого століття у сфері будівельних конструкцій розпочали використовувати матеріали нового покоління, створені на базі високоякісних

композитів, які застосовували раніше в авіаційній промисловості та літакобудуванні.

Дослідження, проведені у Швейцарії, Німеччині, Японії, Голландії, Франції, СРСР, сприяли створенню нових високоєфективних матеріалів, які стали альтернативними металевій арматурі в залізобетонних конструкціях [3]. Вони використовуються зараз у багатьох країнах світу у вигляді арматурних стержнів, кабелів та вантів мостів висячої системи з вуглецевими, арамідними і скляними волокнами [4].

Необхідність пошуку і досліджень матеріалів, альтернативних металевій арматурі, пов'язана також з проблемами екології й збереження оточуючого середовища. Як зазначалося на сесії комітету ФІП у Москві в 1992 р., на армування залізобетонних конструкцій у світі щорічно витрачається біля 60 млн. т. сталі. Проте запаси руд на планеті, придатних для переробки, є обмеженими і стають все більш важкодоступними. Та й саме виробництво сталі є дуже енергоємне й екологічно небезпечне. В перспективі стан справ із сталлю буде ускладнюватися, тому необхідно буде шукати їй заміну, в т. ч. при підсиленні конструкцій.

Перший в Європі міст без єдиного болта, склеєний із сталі і полімерів, був зведений за добу в кінці липня 2008 р. над федеральною трасою номер 455 біля міста Фрідберга в землі Гессен [5].

Істотна перевага моста з синтетичного композиційного матеріалу полягає в тому, що така конструкція набагато легше залізобетонної.

Армовані волокном композиційні матеріали – залежно від їх складу і структури – можуть забезпечити найвищу серед всіх інших матеріалів несучу здатність та питому міцність. Ще одна перевага таких армованих волокном синтетичних смол – це їх вологостійкість.

У порівнянні із залізобетонним мостом витрати на такий міст приблизно на 50 відсотків вищі, проте через 40...50 років ці інвестиції себе виправдають. Адже споруда з такого композиційного матеріалу не вимагає ніякого техобслуговування і ніякого ремонту, за винятком косметичного. Тим часом, досвід експлуатації залізобетонних мостів показує, що вони після приблизно 20-ти років служби потребують капітального ремонту. Витрати на такий ремонт можуть досягати 50-ти відсотків початкової вартості нового моста.

В Україні проведені дослідження й спроби використання базальтопластикової арматури [6...8], а також натурних залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною вуглеволоконною арматурою [9, 10]. Проведені дослідження показали складний напружено-деформований стан таких

конструкцій і потребу у більш детальному їх дослідженні.

Основними результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень є технічний звіт фіб №14 (2001 р.) [11] та інструкція з підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами [12].

Метою даної роботи є проведення експериментальних випробувань залізобетонних балок при різних процентах армування зовнішньою композитною арматурою, перевірка існуючих методик розрахунку та адаптація розрахункових залежностей до чинних норм України.

## II. Програма та матеріали експериментальних досліджень

Для дослідження показників міцності та деформативності конструкцій, підсилених зовнішньою композитною арматурою, були виготовлені залізобетонні балки двох серій довжиною 2100 мм, шириною 120 мм і висотою 220 мм. Зразки серій 1 та 2 відрізнялись міцністю бетону. Балки були запроєктовані таким чином, щоб вони руйнувалися за нормальним перерізом від дії згинального моменту. Характеристики підсилення експериментальних зразків подано у табл. 1. та у [13].

ТАБЛИЦЯ 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДСИЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ

№ з/п	Марка	Зовнішнє армування, мм (см <sup>2</sup> )
1	1Б-1	–
2	1БП-2-1	50×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,6 см <sup>2</sup> )
3	1БП-3-1	50×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,6 см <sup>2</sup> )
4	1БП-4-1	50×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,6 см <sup>2</sup> )
5	1БП-5-2	25×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,3 см <sup>2</sup> )
6	1БП-6-2	25×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,3 см <sup>2</sup> )
7	1БП-7-3	16,7×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,2 см <sup>2</sup> )
8	1БП-8-4	12,5×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,15 см <sup>2</sup> )
9	2Б-1	–
10	2БП-2-2	25×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,3 см <sup>2</sup> )
11	2БП-3-3	16,7×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,2 см <sup>2</sup> )
12	2БП-4-4	12,5×1,2 мм (A <sub>L</sub> =0,15 см <sup>2</sup> )

Всі матеріали були попередньо випробувані для отримання фактичних фізико-механічних показників.

В усіх балках поздовжньою робочою внутрішньою арматурою була стержнева арматура класу А-II з границею текучості 370 МПа, а конструктивна і поперечна – класу А500С (Ø8мм).

Для експериментальних зразків серії 1 був використаний важкий бетон з такими показниками: середня призмova міцність  $R_b = 28,3$  МПа, середня міцність на розтяг  $R_{bt} = 2,07$  МПа, середній початковий модуль пружності  $E_b = 34,2 \times 10^3$  МПа.

При виготовленні експериментальних зразків серії 2 був використаний важкий бетон з такими показниками: середня призмova міцність  $R_b = 34,0$  МПа, середня міцність на розтяг

$R_{bt} = 2,25$  МПа, середній початковий модуль пружності  $E_b = 38,0 \times 10^3$  МПа.

Для підсилення використана композитна стрічка CFRP S512 фірми Sika. Ширина стрічки – 50 мм, товщина – 1,2 мм. Для дослідження оптимального відсотка армування використовувались частини стрічки (розділені по довжині) для отримання потрібної площі поперечного перерізу (табл. 1). Границя міцності на розтяг становить  $R_L = 3246$  МПа, модуль пружності  $E_L = 1,82 \cdot 10^5$  МПа.

З кожної серії один зразок (1Б-1 та 2Б-1) був випробуваний без підсилення (як контрольний). У інших зразках змінним параметром був відсоток армування зовнішньою композитною арматурою – стрічкою CarboDur різної ширини.

## III. Аналіз результатів досліджень

При випробуваннях на кожному етапі навантаження за допомогою мікроіндикаторів годинникового типу вимірювалися деформації верхніх стиснутих фібр бетону, деформації поблизу нейтральної осі, деформації внутрішньої сталеві арматури та зовнішньої композитної арматури, а також прогини балки по довжині.

Дослідження підсилених конструкцій показали два стани роботи – експлуатаційний та граничний. При експлуатаційному стані деформації зовнішньої композитної арматури  $\varepsilon_L \leq 0,005$ , максимальний відносний прогин  $f \leq f_{lim}$ , ширина розкриття тріщин  $a_{crc} \leq a_{crc, lim}$ , композитна стрічка не відшаровується від поверхні бетону балки. При граничному стані деформації зовнішньої композитної арматури  $\varepsilon_L > 0,005$ , при цьому відбувається перевищення граничних станів II групи згідно чинних норм проектування.

Результати проведених експериментальних досліджень були порівняні з рекомендаціями [11] та [12]. Різниця між експериментальними та теоретичними значеннями показників міцності та деформативності знаходилась в межах  $\pm 10\%$ , що дозволяє проводити розрахунки зі задовільною точністю, при цьому забезпечується необхідний запас несучої здатності.

Розрахунок несучої здатності підсилених балок можна проводити з використанням розрахункових залежностей чинних норм, зокрема СНиП 2.03.01-84\* "Бетонные и железобетонные конструкции". Особливістю запропонованої теорії є приведення кількості зовнішньої композитної арматури за показниками міцності, деформативності та площі поперечного перерізу до відповідної кількості внутрішньої сталеві арматури.

Приведена площа поперечного перерізу арматури визначається за формулою:

$$A_{SL} = A_S + A_L \frac{R_{Ly}}{R_S} \quad (1)$$

де:  $A_S$  - площа поперечного перерізу внутрішньої сталеві арматури;

$R_S$  - розрахунковий опір на розтяг внутрішньої сталеві арматури;

$A_L$  - площа поперечного перерізу зовнішньої композитної арматури;

$R_{Ly}$  - розрахунковий опір на розтяг зовнішньої композитної арматури.

Розрахунковий опір на розтяг  $R_{Ly}$  зовнішньої композитної арматури визначається з умови граничних деформацій і залежить від модуля пружності матеріалу:

$$R_{Ly} = \varepsilon_{Ly} \cdot E_L \quad (2)$$

де:  $\varepsilon_{Ly}$  - розрахункове відносне видовження зовнішньої композитної арматури, приймається рівним  $\varepsilon_{Ly} = 0,005$ ;

$E_L$  - модуль пружності зовнішньої композитної арматури.

Всі подальші розрахунки проводяться за чинними нормами. Приймаються прямокутна епюра розподілу зусиль в стиснутій зоні бетону, гіпотеза плоских перерізів.

Гранична несуча здатність за бетоном стиснутої зони (з урахуванням підсилення) :

$$M_u = R_b b x (h_0 - 0.5x) \quad (3)$$

Висота стиснутої зони бетону  $x$  визначається з квадратного рівняння:

$$0.5R_b b x^2 - R_b b h_0 x + M_u = 0 \quad (4)$$

Необхідна приведена площа арматури (з умов рівноваги внутрішніх зусиль) становить :

$$A_{SL} = \frac{R_b b x}{R_S} \quad (5)$$

Необхідна площа зовнішньої композитної арматури підсилення згідно (1):

$$A_L = (A_{SL} - A_S) \frac{R_S}{R_{Ly}} \quad (6)$$

## Висновки

Проведені експериментальні дослідження залізобетонних балок при різних процентах підсилення зовнішньою композитною арматурою показали ефективність такого способу підсилення.

Для розрахунку міцності та деформативності підсилених залізобетонних згинаних конструкцій можна використовувати рекомендації [11] та [12], які дозволяють проводити розрахунки зі задовільною точністю, при цьому забезпечується необхідний запас несучої здатності.

Для наближеного розрахунку несучої здатності залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою, можна використовувати залежності (1)...(6).

## References

- [1] Климпуш М.Д. Проблеми ремонту й реконструкції мостів на дорогах загального користування України. Міжвідомчий наук.-тем. збірник "Будівельні конструкції". Вип.54. Реконструкція будівель і споруд. Досвід і проблеми. К., 2001р., с.39-43.
- [2] Ledner, M., Pralong, J. and Weder, CH., Geklebte Bewehrung: Bemessung und Erfahrung, EMPA Bericht Nr. 116/5, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA, April 1990.
- [3] Международные симпозиумы федерации по предварительно-напряжённому железобетону / Бетон и железобетон – 1995, №1.
- [4] Загора А.П. Композитные материалы в мостостроении // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво; №65; К.2002 р., с. 31-42.
- [5] <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,3577606,00.html>
- [6] Оньський Б.Н., Канюк В.И. Прочность и деформативность базальтопластиковой арматуры. Вестник Львовского политехн. ин-та "Резервы прогресса в архитектуре и строительстве".- №193.-Львов.-1985.-С.71-74.
- [7] Ониськів Б.М., Сорока Я.В. Ефективні способи зміцнення залізобетонних конструкцій існуючих мостів малих і середніх прогонів. // Збірник доповідей другого Українського міжгалузевого науково-практичного семінару "Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення". - К. – 1998.-С.157-158.
- [8] Катруца Ю.А., Кривошеев П.П., Бамбура А.Н. Состояние и перспективы развития базальтофибробетона и конструкций на его основе. // Сб. Строительные конструкции.-Вып. 47-48.-К., НИИСК.-1995.-С.3-10.
- [9] Климпуш М. Д., Кваша В. Г., Мельник І. В. Випробування залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, статичним і багаторазовим навантаженням. // Зб. Автомобільні дороги та дорожнє будівництво; Вип.64; К.2002 р., с. 101-105.
- [10] Кваша В. Г., Мельник І. В., Климпуш М. Д. Експериментальне дослідження залізобетонної мостової балки за ТП вип. 56, підсиленої композитною стрічкою з вуглецевих волокон CFRP. // Зб. Автомобільні дороги та дорожнє будівництво; Вип.62; К.2001 р., с. 267-271.
- [11] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report fib, bulletin 14, 2001, 130p.
- [12] Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. ГУП «НИИЖБ», ООО «Интераква». М. 2006, 48 с.
- [13] Мурын А.Я. Міцність нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2008. - №627. – С. 155-158.