

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.21

**ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТНИХ СТРІЧОК ДЛЯ ПОСИЛЕННЯ
БАЛОК ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ МОСТУ**

Ю. В. Борейчук, А. А. Жабчик

здобувачі вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, 3 курс,
спеціальність «Будівництво та цивільна інженерія (мости і транспортні тунелі)»,
навчально-науковий інститут будівництва та архітектури

Науковий керівник – к.т.н., доцент М. М. Хоружий

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна*

У статті досліджено ефективність посилення залізобетонної балки прогонової будови мосту довжиною за допомогою вуглецевих композитних стрічок. Чисельне моделювання виконано в програмному комплексі LIRA-FEM з урахуванням попереднього напруження арматури і нелінійних властивостей матеріалів. Проаналізовано деформований стан балки без підсилення та з одним, двома і трьома шарами стрічок.

Ключові слова: міст, балка, підсилення, композит, метод скінчених елементів (MCE).

The paper investigates the effectiveness of reinforcing a reinforced concrete girder of a bridge span structure with carbon composite tapes. Numerical modelling was performed using the LIRA-FEM software package, taking into account the prestressing of reinforcement and nonlinear properties of materials. The deformed state of the beam without reinforcement and with one, two, and three layers of tapes was analysed.

Keywords: bridge, beam, reinforcement, composite, finite element method (FEM).

Значна кількість мостових споруд в Україні експлуатується протягом кількох десятиліть, що зумовлює потребу в посиленні їхніх конструкцій для забезпечення механічної безпеки та підвищення несучої здатності за умов зміни розрахункових навантажень. Одним із сучасних рішень є використання композитних матеріалів на основі вуглецевих волокон, зокрема у вигляді ламінатів, які характеризуються високою міцністю, низькою вагою та стійкістю до корозії.

Цю статтю присвячено дослідженню ефективності посилення залізобетонних балок вуглецевими композитними стрічками шляхом чисельного моделювання в програмному комплексі LIRA-FEM. Метою є аналіз напружено-деформованого стану балки та оцінка впливу різної кількості шарів композитного підсилення на її прогин і несучу здатність.

Питання посилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами активно досліджується як в Україні, так і за кордоном. Основи проектування та технології зовнішнього армування вуглецевими та скловолокнами представлені в роботах [1; 2]. Дослідження способів посилення залізобетонних конструкцій вуглецевими матеріалами розглянуті в [3; 4], а експериментальні випробування балок, посилені композитами, описані в [5–7].

Значний внесок у вивчення міцності вуглецевих композитів та їх взаємодії з бетоном зробили іноземні дослідники [8–10]. Вони показали, що композитні матеріали забезпечують ефективне підвищення несучої здатності конструкцій за рахунок високих міцнісних і

деформативних характеристик. В Україні популярністю користуються ламінати торгової марки Sika®, які виготовляються методом пултрузії та приклеюються до конструкцій епоксидним клеєм, що забезпечує міцне з'єднання завдяки проникненню клею в пори бетону.

Постановка завдання. Метою дослідження є оцінка ефективності посилення залізобетонної I-подібної балки прогонової будови мосту довжиною 15,0 м композитними стрічками Sika® CarboDur® шляхом чисельного моделювання. Завдання включають:

1. Створення скінченно-елементної моделі балки з урахуванням попередньо напруження арматури і композитного підсилення.
2. Аналіз деформованого стану балки без підсилення та з різною кількістю шарів композитних стрічок.
3. Порівняння результатів для оцінки ефективності підсилення.

Об'єктом дослідження є залізобетонна I-подібна балка прогонової будови мосту довжиною 15,0 м (рис. 1), армована попередньо напруженими канатами типу К-7 діаметром 15,2 мм (14 у нижній зоні, 2 у верхній). Напруження канатів виконано зусиллям 189 кН, що відповідає напруженням 1350 МПа. Розрахункове значення згинного моментів по другій групі граничних станів становить 1350 кНм. Матеріал балки – бетон класу С32/40.

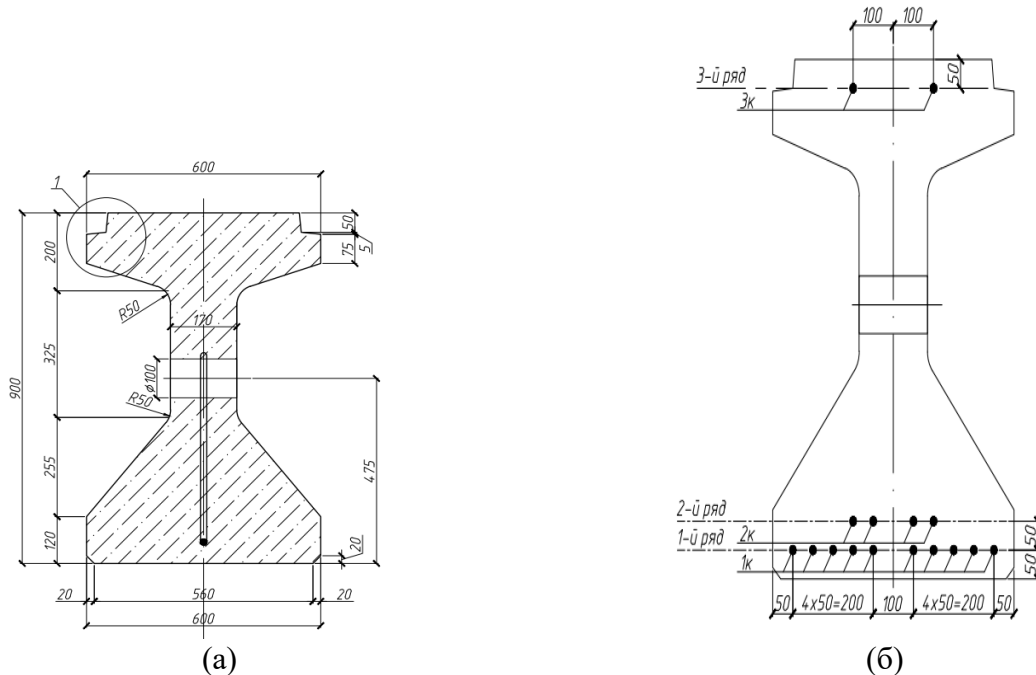


Рис. 1. Поперечний переріз балки: а – габаритні розміри, б – армування

Для підсилення балки використано вуглецеві композитні стрічки Sika® CarboDur® S товщиною 1,4 мм з такими характеристиками: міцність на розтяг 2900 МПа, модуль пружності: 165000 МПа, видовження при руйнуванні: 1,8%. Стрічки наклеювались на нижню грань балки шириною 560 мм. Розглядалися три варіанти підсилення: 1, 2 та 3 шари стрічок (товщина 1,4 мм, 2,8 мм, 4,2 мм відповідно).

Розрахунок виконано в програмному комплексі LIRA-FEM [11]. Скінченно-елементна модель балки показана на рис. 2. Для її моделювання використані такі скінченні елементи (СЕ):

- тіло балки: фізично-нелінійні ізопараметричні СЕ № 234 (6-вузлові) та № 236 (8-вузлові);
- канати: фізично-нелінійні стержневі СЕ №210;

- композитні стрічки: фізично-нелінійні прямокутні СЕ оболонки № 241.

В поздовжньому напрямку модель розбита на 50 скінченних елементів довжиною по 0,3 м кожен. Граничні умови відповідали шарнірно-нерухомому обпиранню при $x=0,3$ м ($X=Z=0$) та шарнірно-рухомому при $x=14,7$ м ($Z=0$). Розрахунковий прогін балки становить 14,4 м.

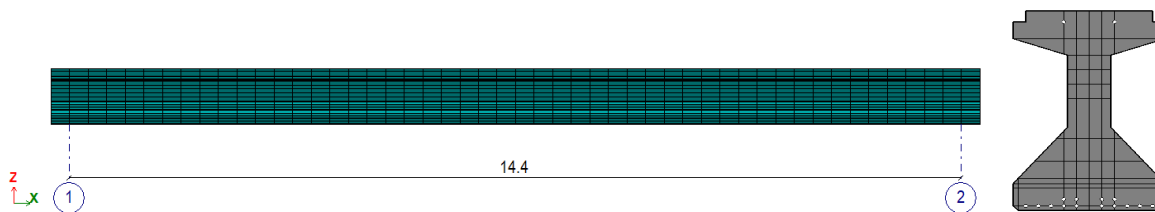


Рис. 2. СЕ модель балки

Результати досліджень. Результати розрахунку прогинів балки представлені в таблиці та на графіку рис. 3.

Таблиця

Результати розрахунку прогинів балки

Завантаження балки	М, кНм	Без підсилення	3 підсиленням					
			1 шар		2 шари		3 шари	
		Прогин z, мм	Прогин z, мм	Δ , %	Прогин z, мм	Δ , %	Прогин z, мм	Δ , %
0 %	0	24,4	22,9	6,1	21,5	11,9	20,4	16,4
10 %	135	16,1	15,6	3,1	15	6,8	14,4	10,6
20 %	270	10,1	10,3	2,0	10,1	0,0	9,8	3,0
30 %	405	5	5,5	10,0	5,7	14,0	5,6	12,0
40 %	540	1,3	1,6	23,1	1,7	30,8	1,7	30,8
50 %	675	-4,4	-3,5	20,5	-3,2	27,3	-3	31,8
60 %	810	-9,1	-8,2	9,9	-7,7	15,4	-7,4	18,7
70 %	945	-14	-12,9	7,9	-12,3	12,1	-12	14,3
80 %	1080	-19	-17,8	6,3	-17,2	9,5	-16,7	12,1
90 %	1215	-24,2	-23	5,0	-22,2	8,3	-21,7	10,3
100 %	1350	-30,3	-28,8	5,0	-27,9	7,9	-27,2	10,2

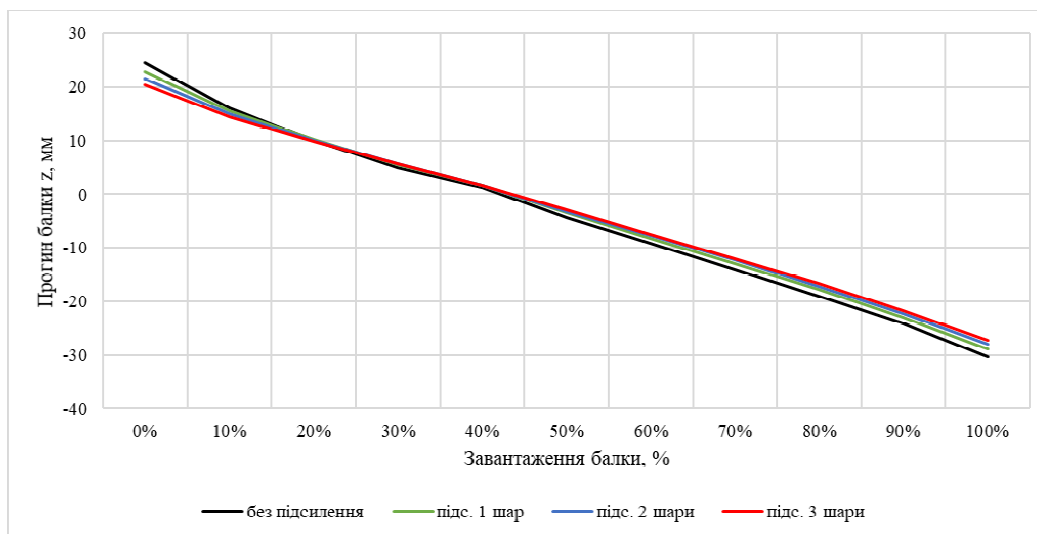


Рис. 3. Результати розрахунку прогинів балки

Вплив кількості шарів підсилення на максимальні деформації балки показаний на рис. 4.

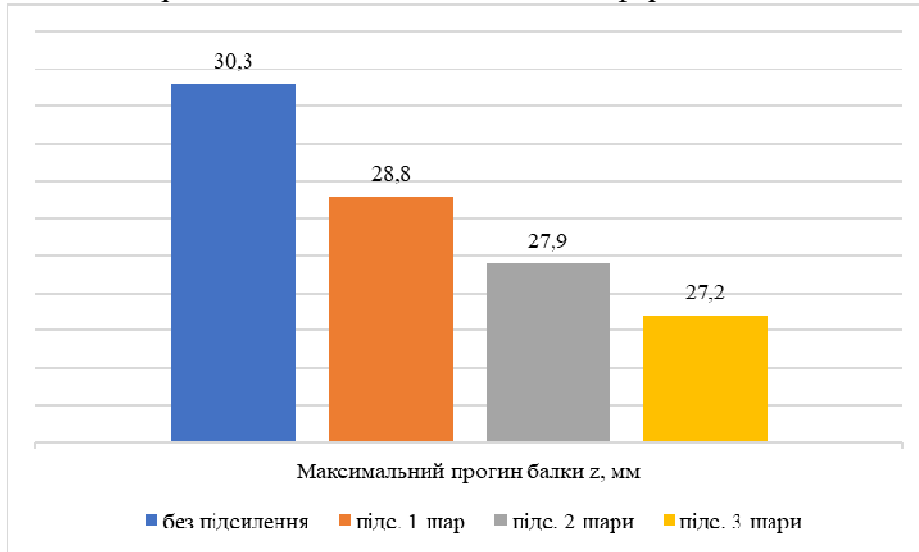


Рис. 4. Вплив кількості шарів підсилення на максимальні деформації балки

Висновки. Посилення залізобетонної балки вуглецевими композитними стрічками призвело до зменшення максимальних прогинів у ній. Один шар стрічок (1,4 мм) зменшив прогин на 5,0%, два шари (2,8 мм) – на 7,9%, три шари (4,2 мм) – на 10,2%. Аналіз результатів розрахунку показав, що композитні стрічки включилися в роботу при навантаженні понад 45% від розрахункового. Це пояснюється стисненням нижнього поясу балки при менших навантаженнях внаслідок попереднього напруження. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування вуглецевих композитів для посилення мостових конструкцій, що може бути використано для продовження терміну їхньої експлуатації. Чисельне моделювання в LIRA-FEM дозволяє точно оцінити напружено-деформовий стан конструкції та оптимізувати схему підсилення.

1. Meier U., Kaiser K. Strengthening of Structures with CFRP Laminates, Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures. *Proceedings of the Specialty Conference (ASCE)*. Las Vegas, Nevada, 1991. P. 224–232.
2. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report fib, bulletin 14, 2001. 130 p.
3. Кваша В., Мельник І., Собко Ю., Мурин А., Добрянський Р. Застосування композитів CFRP для підсилення залізобетонних мостів в Україні. *Current issues of civil and environmental engineering* : 9th International Scientific Conference. Rzeszow, 3–4 September, 2004. С. 221–227.
4. Мурин А. Я. Міцність нормальних перерізів залізобетонних балок, підсиленних зовнішньою композитною арматурою. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів, 2008. № 627. С. 155–158.
5. 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*. К., 2001. Вип. 62. С. 267–271.
6. Деформативність залізобетонних балок при різних процентах підсилення зовнішньою композитною арматурою / Мурин А. Я., Добрянський Р. З., Сорохтей В. М., Цепков С. В., Приставський Т. В. *Дороги і мости*. Київ, 2009. Вип. 11. С. 239–245.
7. Молодід О. С., Руднева І. М., Богдан С. М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP). *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 84–96.
8. Dewi Sri, Susanti L, Triyuliani N, Saputra A. Repair of reinforced concrete beam by adding external reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 669:012010. DOI:10.1088/1757-899X/669/1/012010.
9. Sabzi J., Asadi Shamsabadi E., Esfahani M. Reza, Ozbakkaloglu T. A study on reinforced concrete beams strengthened with FRP and FRCM. *Engineering Structures*. 2025. 329:119687. DOI:10.1016/j.engstruct.2025.119687.
10. Trustgod J., Ogboin A., Arube G. Effect of FRP-to-Concrete Interface Thickness on the Load Carrying Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2020. Vol. 3, Issue 5. P. 12–18.
11. Програмний комплекс ЛІРА-САПР. Приклади розрахунку і проєктування. К. : LIRALAND, 2023. 635 с.