

**КОМПОЗИТНА АРМАТУРА У ПРОГОНОВИХ БУДОВАХ
МОСТОВИХ СПОРУД**

COMPOSITE REINFORCEMENT IN BRIDGE SPANS

Трач В.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9500-2743, Хоружий М.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-4546-9270, Кондратиук Д.В., магістр (Національний університет водного господарства та природокористування)

Trach V.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0001-9500-2743, Khoruzhyi M.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-4546-9270, Kondratiuk D.V., master (National University of Water and Environmental Engineering)

У статті розглянуто застосування композитної арматури в прогонових балках мостових споруд. Проведено порівняльний аналіз армування прогонової балки сталевую та композитною арматурою. Дослідження проводиться методом чисельного моделювання з використанням програмного комплексу LIRA-FEM.

Bridge operating conditions are often characterized by the impact of aggressive environmental factors that lead to intense corrosion of steel reinforcement, a traditional material for reinforcing reinforced concrete structures. The search for and implementation of new, durable and corrosion-resistant materials for reinforcement is a priority for modern bridge construction. One of these promising materials is non-metallic composite reinforcement made on the basis of high-strength glass or basalt fibers and a polymer binder. It has a number of advantages over steel, which makes it attractive for use in bridge structures. The article is devoted to the study of the use of composite reinforcement in bridge construction, in particular for reinforcing girders of span structures. The aim of the work is to compare the efficiency of using steel and composite reinforcement (fiberglass and basalt) in a 12 m long girder of a span structure. The calculations were performed in the LIRA-FEM software package using finite element modeling. Static and structural calculations were performed for four reinforcement options: steel reinforcement, fiberglass reinforcement, basalt reinforcement, and non-metallic composite periodic profile reinforcement. The results of calculating the required reinforcement area for 4 design variants are presented, separately to meet the requirements of the first and second groups of limit states. Also, the required reinforcement area is compared with its total weight in the beam. The stress-strain analysis confirmed the acceptability of the

composite reinforcement in terms of strength characteristics. At the same time, the low modulus of elasticity of composite materials requires careful design for load-bearing structures due to the higher deformations. The study emphasizes the economic and technical advantages of composite reinforcement to improve the durability and efficiency of bridge structures, as well as the need for further research to optimize its use in real-world projects.

Ключові слова: міст, балка, композитна арматура, напружено-деформований стан, скінченно-елементний аналіз,
bridge, beam, composite reinforcement, stress-strain state, finite element analysis

Вступ. Умови експлуатації мостів часто характеризуються впливом агресивних факторів навколишнього середовища: волога, перепади температур, протиожеледні реагенти (солі), карбонізація бетону тощо. Ці фактори призводять до інтенсивної корозії сталевих арматур – традиційного матеріалу для армування залізобетонних конструкцій. Корозія не лише знижує несучу здатність елементів мосту, але й суттєво скорочує термін їх служби та вимагає значних витрат на ремонти та відновлення

У зв'язку з цим, пошук та впровадження нових, довговічних та корозійностійких матеріалів для армування є пріоритетним завданням сучасного мостобудування. Одним із таких перспективних матеріалів є неметалева композитна арматура [1], виготовлена на основі високоміцних волокон (скляних, базальтових, вуглецевих, арамідних) та полімерного в'язучого. Вона має низку переваг перед сталлю, що робить її привабливою для використання саме в мостових конструкціях [2]. Проте для широкого впровадження необхідно провести порівняльні дослідження, які б підтвердили її ефективність у реальних конструкціях.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останніх років з'явилося багато досліджень, присвячених вивченню властивостей композитної арматури та її застосування у залізобетонних конструкціях. Зокрема, роботи [3–7] підкреслюють її потенціал для підвищення міцності, довговічності та функціональності бетонних конструкцій, а також звертають увагу на необхідність подальших досліджень для оптимізації їх застосування. Дослідження засвідчують, що використання композитної арматури дозволяє зменшити загальну вагу бетонної конструкції. Це особливо важливо для мостових балок, де зменшення маси сприяє зниженню навантажень на опори та фундамент. Проте, як вказують автори, композитна арматура має нижчий модуль пружності ніж сталевий, що може призводити до більших деформацій під навантаженням. Це вимагає ретельного проектування та додаткових розрахунків.

В дослідженні [8] продемонстровано, що скінченно-елементне моделювання за використання сучасних програмних комплексів дозволяє точно оцінити напружено-деформований стан (НДС) конструкцій із

композитною арматурою, що є важливим для прогнозування їхньої поведінки під навантаженням. Це підтверджується порівнянням чисельних розрахунків із експериментальними дослідженнями.

У вітчизняній практиці питання застосування композитної арматури в бетонних конструкціях, особливо мостових споруд, ще недостатньо вивчене. У 2013 році набув чинності нормативний документ стосовно проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою [9], який містить інформацію про сферу застосування, загальні положення проектування елементів з неметалевою композитною арматурою, конструктивні вимоги до цих елементів. В роботі [10], на основі положень представлених в [9], виконаний розрахунок і конструювання фундаментної плити підземного переходу тунельного типу з використанням композитної арматури. Результати дослідження показали, що за використання у фундаментній плиті неметалевої композитної арматури економія на матеріалах склала 19,4% у порівнянні із варіантом армування класичною сталевую арматурою.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, питання порівняльного аналізу ефективності застосування сталеві та композитної арматури саме у конструкціях мостових споруд, враховуючи специфіку їх навантаження та умов роботи, потребує подальшого вивчення. Особливо важливим є аналіз не тільки міцності, але й деформативності та тріщиностійкості таких конструкцій, зважаючи на нижчий модуль пружності композитної арматури.

Постановка мети і задач досліджень. Метою дослідження є порівняльний аналіз ефективності армування прогонових балок мостових споруд ненапруженою сталевую арматурою А500С згідно [11] та композитною арматурою згідно [9] за показниками міцності, деформативності та об'ємного вмісту арматури. Дослідження проведене на прикладі І-подібної мостової балки довжиною 12 м (рис. 1). Матеріал балки – бетон класу С32/40. Розрахункове значення згинного моменту по першій групі граничних станів – $M_{гр.І}=1478$ кНм, по другій групі граничних станів – $M_{гр.ІІ}=986$ кНм. Розрахункове значення поперечної сили – $Q_{гр.І}=554$ кН.

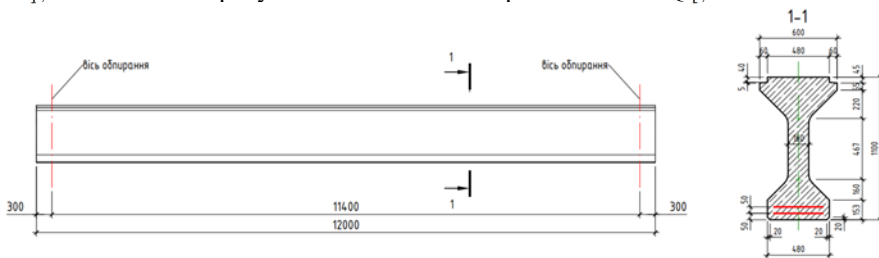


Рис. 1. Загальний вигляд мостової балки

Методика досліджень. Дослідження проводиться методом чисельного

модельовання з використанням програмного комплексу LIRA-FEM, який дозволяє виконувати розрахунки залізобетонних конструкцій методом скінченних елементів (МСЕ) [12] на основі державних будівельних норм України [13].

Для модельовання балки використані стержневі скінченні елементи (СЕ) №10 (рис. 2). В поздовжньому напрямку модель розбита на 40 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 $x=11,7$ м ($Z=0$).

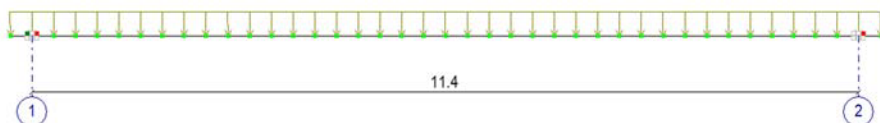


Рис. 2. СЕ модель мостової балки

Розрахунок виконувався для 4-х варіантів армування:

- **Варіант 1** – сталева арматура А500 С згідно [11];
- **Варіант 2** – арматура композитна на основі скляного ровінгу АКС 800 згідно [9];
- **Варіант 3** – арматура композитна на основі базальтового ровінгу АКБ 800 згідно [9];
- **Варіант 4** – арматура неметалева композитна періодичного профілю на основі базальтового ровінгу АНПБ 800 згідно [9].

Механічні характеристики сталевोї та композитної арматури прийняті згідно норм [11] та [9] відповідно та представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Механічні характеристики сталевої та композитної арматури

Характеристика арматури	А500 С	АКС 800	АКБ 800	АНПБ 800
Модуль пружності, МПа	210000	50000	45000	43000
Характеристичне значення опору на розтяг, МПа	500	800	800	800
Розрахункове значення опору на розтяг, МПа	420	530	530	530
Гранична відносна деформація видовження, %	2,0	1,6	1,78	1,86

Результати досліджень. На рис. 3-6 представлені результати розрахунку

необхідної площі арматури для 4-х варіантів конструювання, окремо для забезпечення вимог першої (1 ГГС) та другої (2 ГГС) групи граничних станів.

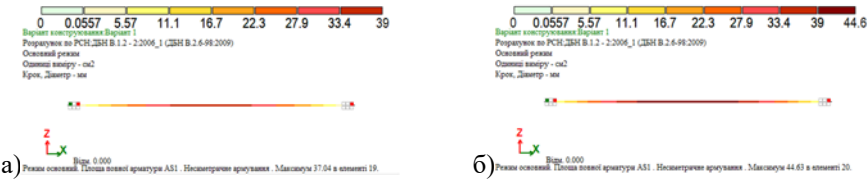


Рис. 3. Результати розрахунку арматури за Варіантом 1: а – 1 ГГС; б – 2 ГГС



Рис. 4. Результати розрахунку арматури за Варіантом 2: а – 1 ГГС; б – 2 ГГС

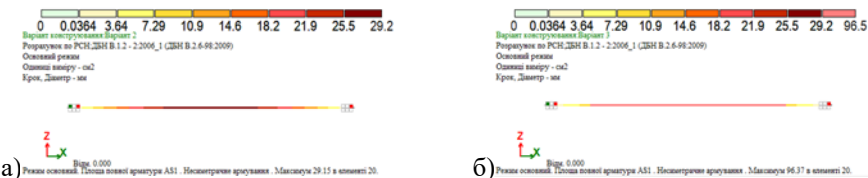


Рис. 5. Результати розрахунку арматури за Варіантом 3: а – 1 ГГС; б – 2 ГГС

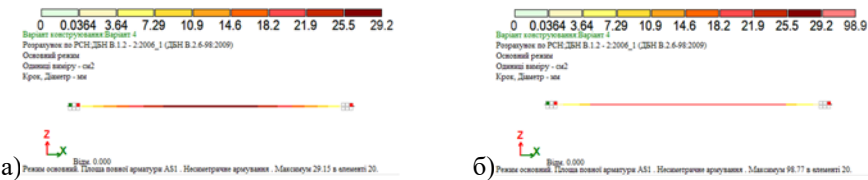


Рис. 6. Результати розрахунку арматури за Варіантом 4: а – 1 ГГС; б – 2 ГГС

В таблиці 2 та на рис.7 і 8 приведені зведені результати розрахунку для 4-х варіантів армування, а також виконане співставлення необхідної площі арматури із загальною її вагою в балці.

Таблиця 2

Зведені результати розрахунку армування мостової балки

Варіант армування	1 ГГС		2 ГГС	
	Розрахункова площа, см ²	Розрахункова вага, кг	Розрахункова площа, см ²	Розрахункова вага, кг
Варіант 1	39,0	367,4	44,6	420,1
Варіант 2	29,5	67,3	91,0	207,5
Варіант 3	29,2	66,6	96,5	220,0
Варіант 4	29,2	66,6	98,9	225,5

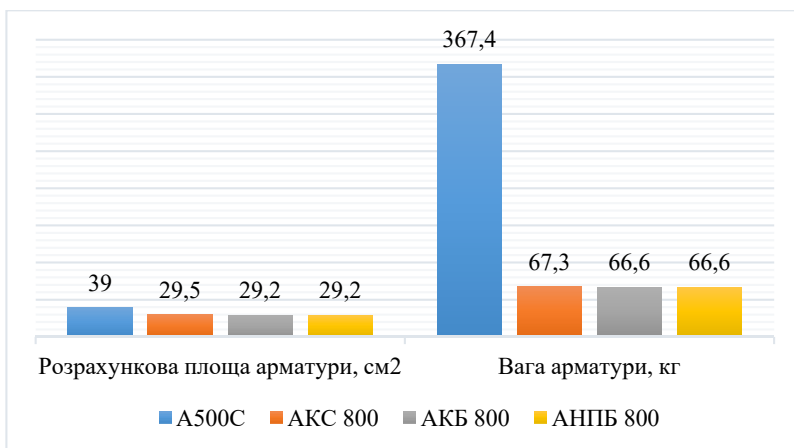


Рис. 7. Зведені результати розрахунку армування мостової балки для забезпечення вимог першої (1 ГГС) групи граничних станів

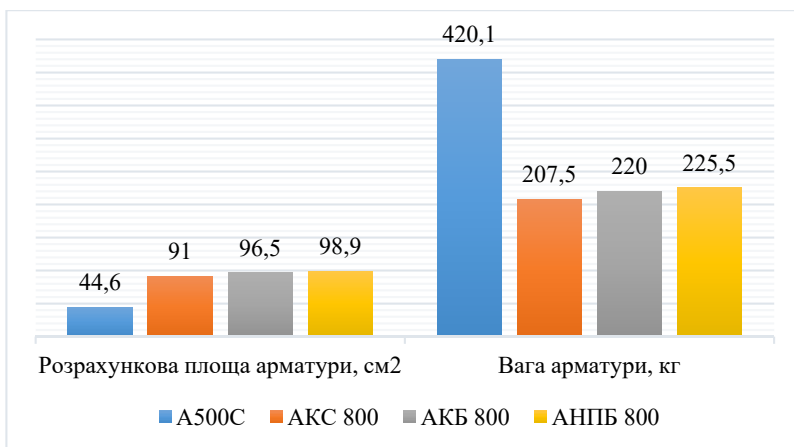


Рис. 7. Зведені результати розрахунку армування мостової балки для забезпечення вимог другої (2 ГГС) групи граничних станів

Висновки та рекомендації. Аналіз конструктивного розрахунку мостової балки показав, що із умов розрахунку за першою групою граничних станів застосування композитної арматури дозволяє зменшити її об'ємний вміст на 25% у порівнянні із традиційною металевою. Проте, розрахунок за другою групою граничних станів показав, що у порівнянні із сталевією арматурою композитної арматури потрібно вдвічі більше, що пояснюється нижчим модулем пружності. В той же час, у ваговому співвідношенні вага всієї

композитної арматури в 5,5 рази менша ніж сталевій при розрахунку за 1 ГГС і, приблизно, в 2 рази при розрахунку за 2 ГГС, що ще раз підтверджує той факт, що в тих сферах, де застосування такого армування є допустимим, воно значно здешевлює будівництво.

Незважаючи на отримані результати, застосування попередньо напруженої арматури наразі залишається найнефективнішим рішенням для прогонових балок мостових споруд. Тому, в подальшому планується продовжити дослідження застосування композитної арматури в інших типах мостових конструкцій, для визначення оптимальних сфер її використання.

10. Клімов Ю. А. Використання неметалевої композитної арматури для армування бетонних конструкцій. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка: науково-технічний збірник. Київ, 2011. Вип. 42. С. 13-17.

11. Терещенко Т.А. Характеристики композиційних матеріалів і арматури на їх основі, яка використовується для будівництва мостів і шляхопроводів за кордоном. Дороги і мости. Київ, 2011. Вип. 13. С. 130-138.

12. Abdalla H.A. Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. Composite Structures, Volume 56, Issue 1, 2002. P. 63-71.

13. Ashour A.F. Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. Construction and Building Materials, Volume 20, Issue 10, 2006. P. 1005-1015.

14. Gravina R.J., Smith S.T. Flexural behaviour of indeterminate concrete beams reinforced with FRP bars. Engineering Structures, Volume 30, Issue 9, 2008. P. 2370-2380.

15. Lau D., Pam H. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. Engineering Structures, Volume 32, Issue 12, 2010. P. 3857-3865.

16. Qin R., Zhou A., Lau D. Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. Composites Part B: Engineering, Volume 108, 2017. P. 200-209.

17. Shawki Ali N.K., Mahfouz S.Y., Amer N.H. Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymers. Buildings, Volume 13, Issue 2, 2023. P. 374.

18. ДСТУ Б В.2.6-185:2012. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу. К.: Мінрегіонбуд України, 2012. 28 с.

19. В.М. Трач, М.М. Хоружий, В.І. Літницький. Застосування неметалевої композитної арматури у фундаментних плитах підземних переходів тунельного типу. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. 2024. 45, С.294-299.

20. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 166 с.

21. Програмний комплекс ЛІРА-САПР. Приклади розрахунку і проектування. К.: LIRALAND, 2023. 635 с.

22. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.