

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗІ ЗМІШАНИМ ВИДОМ АРМУВАННЯ

Н. Юрочко, аспірант

ORCID ID: 0009-0001-4183-4744

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.057>

Юрочко Н. Огляд досліджень балкових конструкцій зі змішаним видом армування

У статті здійснено розширений аналіз сучасних досліджень, присвячених балковим конструкціям із змішаним типом армування, що поєднують різні види арматурних матеріалів: сталеву арматуру, композитні стрижні (GFRP, BFRP, CFRP), фібру та попередньо напружені елементи. Охоплено експериментальні та числові дослідження, у яких вивчено вплив зазначених поєднань на ключові характеристики балок: несучу здатність, тріщиностійкість, пластичність та загальну ефективність. Представлено низку прикладів використання змішаних систем армування у поєднанні із сучасними видами бетону – надвисокоміцним (UHPFRC), геополімерним та фібробетоном. Окрему увагу приділено роботам, у яких вивчено поєднання GFRP із сталлю та фіброю, що дозволяло досягати оптимального співвідношення між жорсткістю, корозійною стійкістю та економічністю. Визначено, що додавання фібри, зокрема сталевих, полімерних або натуральних волокон (джут, поліпропілен), позитивно впливає на поведінку балок після виникнення тріщин. Проаналізовано також конструктивні особливості анкерування арматурних стрижнів у змішаних системах. Встановлено, що застосування попередньо напружених композитних арматур у поєднанні з традиційною сталевією арматурою дозволяє знизити вагу конструкції при збереженні її міцнісних характеристик. На основі порівняння численних досліджень визначено ефективні схеми змішаного армування, які можуть бути рекомендовані для практичного застосування в інфраструктурному будівництві, зокрема у виробництві балок для мостів, перекриттів та інших відповідальних конструкцій. Вказано на необхідність подальшого розвитку нормативної бази для впровадження таких систем армування в інженерну практику, а також актуальність дослідження впливу різних геометричних, технологічних і матеріальних параметрів на роботу комбінованих армованих елементів.

Ключові слова: склопластикова арматура (GFRP), базальтопластикова арматура (BFRP), вуглепластикова арматура (CFRP), сталева арматура, фібробетон, змішане армування.

Yurochko N. Review of research on beam structures with hybrid reinforcement

This article presents an extended analysis of recent research on beam structures with hybrid reinforcement that combines different types of reinforcement materials such as steel bars, composite rods (GFRP, BFRP, CFRP), fiber, and prestressed elements. The review includes both experimental and numerical studies that investigate the effects of various reinforcement combinations on the fundamental characteristics of beams: load-bearing capacity, crack resistance, ductility, and overall performance. Several examples of hybrid reinforcement applications are provided, including combinations with advanced types of concrete such as ultra-high-performance concrete (UHPFRC), geopolymer concrete, and fiber-reinforced concrete. Particular attention is given to research where the combination of GFRP with steel and fiber provided an optimal balance of stiffness, corrosion resistance, and cost-effectiveness. It has been found that the addition of fiber – especially steel, polymer, or natural fibers (jute, polypropylene) – has a positive influence on the post-cracking behavior of beams. The article also analyzes structural features of anchorage systems used in hybrid reinforcement schemes. It is shown that the use of prestressed composite reinforcement in combination with traditional steel reinforcement allows a reduction in structural weight while maintaining strength characteristics. Based on the comparative analysis of numerous studies, the article identifies effective hybrid reinforcement schemes that may be recommended for practical implementation in infrastructure construction, including the production of beams for bridges, floors, and other critical structural elements. The need for further development of regulatory frameworks for the adoption of such reinforcement systems in engineering practice is emphasized, as well as the importance of further investigation into the influence of geometric, technological, and material parameters on the behavior of hybrid reinforced elements.

Keywords: glass fiber reinforced polymer (GFRP), basalt fiber reinforced polymer (BFRP), carbon fiber reinforced polymer (CFRP), steel reinforcement, fiber-reinforced concrete, hybrid reinforcement.

Постановка проблеми. У сучасних будівельних технологіях усе частіше застосовують комбіновані методи армування залізобетонних конструкцій для підвищення їхньої несучої здатності, деформативної стійкості та економічної

ефективності. Змішане армування, яке поєднує різні типи арматури, наприклад, попередньо напружену сталь із композитними матеріалами або звичайною сталевією арматурою з фіброю, має великий потенціал для оптимізації конструкцій.

Такі типи армування поєднують переваги різних видів армування, що дозволяє зменшити вагу конструкції та покращити її експлуатаційні властивості. Проте, незважаючи на наявність окремих досліджень комбінованого армування, відсутність систематизованого підходу до цього питання обмежує широке впровадження таких рішень у практику, хоча відповідні конструкції демонструють високу надійність та економічну доцільність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Змішане армування, у вигляді попередньо напруженої сталеві арматури з композитними стрижнями чи сітками (полотнами) – наприклад, GFRP – або фіброю, почали активно досліджувати у XX столітті, з появою нових матеріалів. Прямих даних про першого дослідника балок із комбінацією попередньо напруженої арматури, композитів і фібри немає, оскільки це був еволюційний процес. Однак упродовж 1960–1970-тих років почали з'являтися перші експерименти із змішаними системами армування. Наприклад, у США та Європі досліджували комбінацію сталеві арматури з фіброю для підвищення міцності балок. Із 1990-х років інженери, такі як Антоніо Нанні та Лусіо Бланко, активно вивчали комбінації GFRP із традиційною сталеві арматурою чи фіброю, аналізуючи їхній вплив на напружено-деформований стан балок. Сьогодні спеціалісти з багатьох країн, як-от США, Японія, Франція та Італія, дедалі більше приділяють увагу конструктивним елементам із комбінованим армуванням, що підтверджено зростанням кількості публікацій, присвячених дослідженню цієї теми.

Постановка завдання. Наше завдання – аналіз досліджень, присвячених конструкціям балок із змішаним армуванням, що поєднує різні його типи.

Виклад основного матеріалу. До конструкцій зі змішаним типом армування можна віднести такі комбінації армування: поєднання різних видів композитних стрижнів, а саме: склопластикові арматури: (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer), вуглепластикові (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer), арамідної (AFRP – Aramid Fiber Reinforced Polymer), базальтопластикові (BFRP – Basalt Fiber Reinforced Polymer) та сталеві арматури, поєднання композитних стрижнів із попередньо напруженою арматурою, поєднання фібри та арматурних стрижнів, поєднання арматурних стрижнів та просічно-витяжного листа.

У роботі [1] автори розглянули згинальну поведінку та тріщиностійкість лужного активованого бетону, армованого сумішшю волокон. Для експерименту виготовили зразки розміром 150×230 мм і проліт 1500 мм, та використано різний об'єм волокон. Результати вчених показують, що суміш сталевих та полімерних волокон показує найкращий результат, балки, армовані в такий спосіб, досягли пікового навантаження 375 кН із максимальним прогином 13,28 мм, що свідчить про покращену поведінку після тріщиноутворення та підвищену несучу здатність після появи тріщин. Для досягнення пластичного руйнування балок з ультрависокоміцного бетону, та досягнення економічної ефективності у [2] розроблено схему змішаного армування балок і порівняно три види балок:

- із попередньо напруженою арматурою та сталеві фіброю;
- із комбінацією попередньо напруженої арматури, звичайної сталеві арматури та сталеві фібри;
- із комбінацією попередньо напруженої арматури, GFRP-арматури та сталеві фібри.

Результати дослідження показали покращення несучої здатності балок при застосуванні змішаного армування, а також підтвердили економічну ефективність таких схем армування.

У праці [3] проведено експериментальне дослідження згинальної поведінки та експлуатаційних характеристик бетонних балок, армованих змішаним способом – скло/базальтопластиковою (G/BFRP) арматурою та сталевими стрижнями. Дослідження було спрямоване на зменшення ризику корозії сталі. Для цього розробили та випробували одинадцять бетонних балок: три балки, армовані лише сталлю, та вісім балок зі змішаним армуванням. Усі зразки випробували за чотириточковою схемою згинання. Результати показали, що прогини та максимальна ширина розкриття тріщин у балках зі змішаним армуванням були на 20–60 % більшими, ніж у традиційних залізобетонних балках за аналогічних рівнів навантаження в межах граничного стану експлуатаційної придатності. Це свідчить про суттєве зниження жорсткості та тріщиностійкості таких балок.

Вплив сталевих волокон (SF) та вуглецевих нанотрубок (CNT) на згинальну поведінку балок зі змішаним армуванням, армованих скловолоконним полімером (GFRP) та сталлю, досліджено у [4]. Було виготовлено дев'ять балок, розділених на три серії:

- контрольні зразки із самоущільнювального бетону (SCC);

- балки з бетону, модифікованого сталевими волокнами (SFC);

- балки із самоущільнювального бетону з вуглецевими нанотрубками (CNTSCC). Результати дослідження показали покращення механічних властивостей усіх типів балок при додаванні SF та CNT. Також зафіксували підвищення міцності на розтяг і стиск.

У праці [5] досліджено вплив поліетиленових (PE) та сталевих волокон, а також їхніх комбінацій, на міцність і деформативність високоміцного бетону. Результати показали, що за частковою заміною поліетиленових волокон сталевими (до 0,7 % за об'ємом), міцність на розтяг та деформаційна здатність композитів типу ECC (Engineered Cementitious Composites) залишалися порівнянними з еталонною сумішшю. Однак за збільшення вмісту сталевих волокон до 1 % спостерігали істотне зменшення деформативності – з 5,44 % до 2,78 %. Модуль пружності при розтязі, навпаки, зростає зі збільшенням частки сталевих волокон. При комплексній оцінці механічних та економічних властивостей, суміш ECC із змішаним вмістом 1,3 % PE фібр та 0,7 % сталевих фібр (P1.3S0.7) продемонструвала найкращі загальні характеристики. Порівняно з еталонною сумішшю P2.0S0, суміш P1.3S0.7 мала вищу міцність на стиск, вищий модуль пружності, нижчу вартість, при цьому незначно поступаючись у міцності та пластичності на розтяг (зниження лише на 3,8 % та 5,5 % відповідно).

У праці [6] проведено числове моделювання за допомогою нелінійного аналізу методом скінченних елементів (NLFEA) та аналітичне дослідження згинальної поведінки балок з геополімерного бетону, балки було поділено на три групи: армовані сталевую арматурою, склопластиковою (GFRP) арматурою, а також змішана модель армування із склопластиковою арматурою з додаванням дисперсних волокон (сталевих та поліпропіленових) до суміші. Моделювання виконували за допомогою програмного забезпечення ANSYS на десяти тривимірних моделях скінченних елементів, що представляли балки із змішаним армуванням, які раніше експериментально протестували автори. Балки піддавалися чотириточковому згинальному навантаженню до руйнування.

Учені показали, що додавання сталевих та поліпропіленових волокон до суміші геополімерного бетону, армованих GFRP, лише незначно

покращує його згинальну поведінку. Зокрема додавання сталевих волокон призвело до збільшення граничного навантаження на 9 % та максимального прогину на 7 %, тоді як поліпропіленові волокна забезпечили підвищення цих показників на 10,6 % і 4 % відповідно.

У праці [7] експериментально досліджені згинані залізобетонні балки, армовані комбінованими стрижнями зі сталі та склопластикової арматури (GFRP), а також проаналізовано вплив застосування надвисокоміцного фібробетону (UHPFRC) у вигляді верхніх шарів балок. Результати показали, що найбільше граничне значення згинального моменту спостерігали у балок, армованих лише арматурою GFRP, дещо менше – у балок зі змішаним армуванням, і найменше – у зразків, армованих виключно сталевую арматурою. Наявність шару UHPFRC суттєво впливала на граничний стан несучої здатності та жорсткості балок.

Дослідження [8] показало, що змішане армування дозволяє контролювати початок тріщиноутворення та зменшувати максимальну ширину тріщин більш ніж на 50 % за однакового рівня навантаження порівняно з армуванням лише GFRP. Згинальна поведінка балок зі змішаним армуванням може бути точно прогнозована за допомогою теоретичних методів та методу скінченних елементів.

Додавання відходів сільськогосподарського виробництва (джутових волокон) як фібри та їхнє поєднання з композитною і сталевую арматурою досліджували Шехріар Ахмед та Маджид Алі у праці [9]. Результати показали покращення характеристик бетону щодо поглинання енергії від ударів та вибухів. Комбінація арматури GFRP із бетоном, армованим джутовими волокнами, виявилася більш ефективною порівняно з іншими варіантами (зі сталевую арматурою та звичайним бетоном). Автори дійшли висновку, що така комбінація може бути практично реалізована для зменшення розкидання бетонних уламків під час вибуху, що сприятиме підвищенню безпеки та збереженню людських життів.

Експериментальні дослідження структурної поведінки бетонних балок двотаврового перерізу зі змішаним армуванням (попередньо напружені GFRP та сталеві стрижні) із застосуванням сталевіфібробетону (SFRC) та порівнянням із армуванням лише сталевими стрижнями та хомутами наведені у праці [10]. Автори розробили та випробували десять балок під чотириточковим згинанням із метою вивчення впливу співвід-

ношення арматури, рівня попереднього напруження та типу бетону. Було проведено оцінку несучої здатності (SLS та ULS), деформативності, пластичності та видів руйнування, а також порівняння експериментальних результатів із прогнозованими моделями (MC2010). Дослідження показали ефективність попереднього напруження та потенціал SFRC для елементів без хомутив, а також підкреслили важливість балансу між композитною та сталеву арматурою та властивостями SFRC для досягнення бажаної несучої здатності й пластичності.

У праці [11] експериментально досліджено внесок анкерної дії поздовжнього армування балок зі змішаним армуванням із сталевих і GFRP-стрижнів. У залізобетонних балках із різними схемами армування використано самоущільнюваний бетон без фібри та з додаванням сталевих волокон (0,9 % та 1,2 % за об'ємом). Випробували шістьнадцять балок розміром 140×300×1500 мм, які спиралися на дві опори та навантажувалися у двох точках. Розроблено модель для прогнозування роботи балок на зсув без вертикального армування, що враховує внесок анкерної дії поздовжнього армування зі сталі та GFRP. Результати показали значний внесок анкерної дії як сталевих, так і GFRP-стрижнів у роботу балок на зсув. Водночас застосування змішаної системи зі сталевих і GFRP-стрижнів призводило до зменшення анкерної дії сталевих стрижнів через їх взаємодію.

У праці [12] за допомогою методу скінчених елементів досліджено згинальну поведінку балок із реактивного порошкового бетону (RPC), армованих арматурою зі скловолоконних полімерів (GFRP) та сталевих стрижнів. За результатами аналізу методом скінчених елементів було запропоновано формули для прогнозування згинальної несучої здатності балок із таким видом армування.

У дослідженні [13] згинальної поведінки нерозрізних двопробіжних балок, армованих GFRP та сталеву арматурою, встановлено, що такі балки демонструють пластичну поведінку, особливо за використання різних процентних співвідношень армування у прогонах та над опорами. Крім того, показано, що збільшення кількості сталевої або GFRP-армування покращує згинальну жорсткість балок після утворення перших тріщин.

У праці [14] досліджено поведінку бетонних балок, армованих фіброармованими полімерними (HFRP) стрижнями, та вплив анкерування вздовж FRP-арматури. Виявлено, що застосування системи анкерування з використанням сталевих трубок

забезпечує ефективну передачу напружень між бетоном і FRP-арматурою. Експериментально встановлено, що збільшення кількості точок анкерування вздовж довжини FRP-стрижня значно підвищує граничне навантаження балок.

У праці [15] проведено експериментальні дослідження залізобетонних плит, армованих FRP, під вибуховим навантаженням, а також їх порівняння зі сталезалізобетонними плитами та залізобетонними плитами, армованими лише GFRP (GRC). Встановлено, що під час близького вибуху, завдяки лінійній пружності та високій міцності на розтягнення арматури GFRP, залишкова деформація плит із змішаним армуванням була меншою, а здатність до вибухового відновлення – більшою, ніж у сталезалізобетонних плит. Крім того, автори запропонували Індекс Вибухового Відновлення (BRI) для оцінки здатності бетонних плит відновлюватися після вибухового навантаження.

У праці [16] досліджено вплив сталевих волокон (фібри) на характеристики згинаних балок, армованих комбінацією сталеві та GFRP-арматури. Експериментально підтверджено, що додавання сталевих волокон підвищує несучу здатність, пластичність та жорсткість балок. Автори розробили та застосували модифікований підхід для прогнозування номінальної згинальної несучої здатності балок із SFRC, армованих за змішаною схемою. Цей підхід враховує внесок як сталеві та GFRP-арматури, так і сталевих волокон. Методика розрахунку була експериментально обґрунтована шляхом порівняння результатів для 48 балок.

У праці [17] досліджено граничні навантаження, прогини у середині прольоту та деформації арматурних стрижнів із H-GFRP, а також порівняно із GFRP та сталеву арматурою. Крім того, виконано аналітичне дослідження у середовищі ANSYS. Результати показали, що H-GFRP арматура має механізм руйнування, подібний до сталеві арматури, що забезпечує пластичний режим руйнування при досягненні максимальної несучої здатності.

Висновки. Сьогодні є чимало експериментальних та теоретичних досліджень балок зі змішаним армуванням, зокрема поєднання сталеві та композитної арматури (GFRP, BFRP, CFRP), фібри та попередньо напружених стрижнів. Таке комбіноване армування дозволяє підвищити несучу здатність, покращити тріщиностійкість, забезпечити довговічність і адаптивність конструкцій до складних експлуатаційних умов. Особливо перспективні комбінації композитної арматури з

фіброю та попереднім напруженням, що дозволяють досягати високої несучої здатності при зменшенні маси конструкцій та забезпеченні корозійної стійкості. Водночас потребує подальшого вивчення вплив співвідношення типів арматури, їхнього розташування та роботи конструкцій у складному напруженому стані. Напрямок досліджень змішаного армування балок має високу практичну значущість і потребує розвитку нормативної бази для подальшого впровадження у проєктування та будівництво.

Бібліографічний список

1. Maganti T. R., Gopireddy H. K. R., Boddepalli K. R. Enhanced flexural performance and crack control in hybrid fiber ECC-ACC beams. *Ain Shams Engineering Journal*. 2025. Vol. 16. Cairo. P.103451. doi: 10.1016/j.asej.2025.103452.
2. Zhan J., Shao Y. Low-cost and ductile prestressed UHPC beams with hybrid reinforcement: Experiments and design methods. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 339. London. P. 120667. doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120667.
3. Experimental study of flexural behavior and serviceability of hybrid concrete beams reinforced by steel and G/BFRP bars. *8th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE2019)*. 2019. November 12–15. Xi'an, China. P. 012007. doi: 10.1088/1757-899X/770/1/012007.
4. Salman A., Hassan A., Ahmed H. I. Effects of steel fibers and carbon nanotubes on the flexural behavior of hybrid GFRP/steel reinforced concrete beams. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 2024. Vol. 13. Beni-Suef. P. 127. doi: 10.1186/s43088-024-00584-9.
5. Liu D., Yu J., Qin F., Zhang K., Zhang Z. Mechanical performance of high-strength engineering cementitious composites (ECC) with hybridizing PE and steel fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. Amsterdam. P.e01961. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01961.
6. Flexural Behavior of Steel and FRP-Reinforced Geopolymer Concrete Beams: Numerical Modeling and Analytical Study. *Engineering Research Journal*. 2023. Vol. 52. Cairo. P. 38–47.
7. El-Shafey A. M., El Refai A., Ashour A. F. Flexural behaviour of RC beams with a UHPFRC top layer and hybrid reinforcement of steel and glass fiber reinforced polymer bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 21. Amsterdam. P.e04017. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04017.
8. Xingyu G., Yiqing D., Jiwang J. Flexural behavior investigation of steel-GFRP hybrid-reinforced concrete beams based on experimental and numerical methods. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. London. P. 110117. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110117.
9. Ahmed S., Ali M. Use of agriculture waste as short discrete fibers and glass-fiber-reinforced-polymer rebars in concrete walls for enhancing impact resistance. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 276. Amsterdam. P. 122211. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122211.
10. Experimental study on the structural performance of concrete beams reinforced with prestressed GFRP and steel bars. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 438. Amsterdam. P. 137031. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137031.
11. Shear behavior of self-consolidating concrete deep beams reinforced with hybrid of steel and GFRP bars. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, No 10. Cairo. P. 102136. doi: 10.1016/j.asej.2023.102136.
12. Nonlinear analysis of flexural performance of reactive powder concrete beams reinforced with hybrid GFRP and steel bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. Amsterdam. P.e01450. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01450.
13. Experimental tests of two span continuous concrete beams reinforced with hybrid GFRP-Steel bars. *Structures*. 2023. Vol. 47. Amsterdam. P. 12055. doi: 10.1016/j.istruc.2022.12.055.
14. Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Hybrid Fiber Reinforced Bars. *Advanced Composite Materials*. 2010. Vol. 19, No 3–4. Leiden. P. 283–298. doi: 10.1163/092430410X547074.
15. Research on Hybrid FRP–Steel-Reinforced Concrete Slabs under Blast Load. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No 4. Basel. P. 1058. doi: 10.3390/buildings13041058.
16. Experimental investigation on the flexural behavior of SFRC beams reinforced with hybrid reinforcement schemes. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 298. Amsterdam. P. 118054. doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118054.
17. Flexural behavior of HSC beams reinforced by hybrid GFRP bars with steel wires. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. Amsterdam. P.e01054. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01054.

Стаття надійшла 14.02.2025