

УДК 624.012.454

## **ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БАЗАЛЬТОВОЇ АРМАТУРИ У СКЛАДІ КОНСТРУКЦІЙ ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ЗГИН**

## **ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ БАЗАЛЬТОВОЙ АРМАТУРЫ В СОСТАВЕ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

## **SPECIAL ASPECTS OF THE BASALT ARMATURE AS A COMPONENT OF BENDING STRUCTURES**

**Валовой О.І., к.т.н., проф., Єрьоменко О.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.О., доц., Волков С.О., вишукувач (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг)**

**Валовой А.И., к.т.н., проф., Ерёменко А.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.А., доц., Волков С.А., соискатель (Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог)**

**Valovoj A.I., professor, Eremenko A.U., associate professor, Valovoj M.A., associate professor, Volkov S.O. [external PhD student](#) (Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih)**

**Наведено і проаналізовано експериментальні дані механічних властивостей базальтової арматури та зроблено висновки про можливість її використання у складі будівельних конструкцій. Проаналізовано результати типових експериментальних випробувань згинних конструкцій армованих базальтовою арматурою. Відзначено високі показники міцності та деформативності таких конструкцій. Вказано на можливість підвищення загальної жорсткості згинних конструкцій армованих базальтовою арматурою шляхом збільшення відсотку армування перерізу, що підтверджується результатами експериментальних випробувань. Запропоновано зменшити деформативність таких конструкцій, не збільшуючи відсотку армування, шляхом використання змішаного армування, коли металева та базальтова арматура використовується сумісно в якості робочої арматури перерізу.**

**Изложены и проанализированы экспериментальные данные механических свойств базальтовой арматуры, сделаны выводы о возможности её использования в составе строительных конструкций. Проанализировано результаты типовых экспериментальных испытаний изгибаемых конструкций армированных базальтовой арматурой. Отмечены высокие показатели прочности и деформативности таких**

конструкцій. Указано на можливість підвищення загальної жорсткості вигинаючих конструкцій армірованих базальтовою арматурою шляхом збільшення частоти армування сечення, що підтверджується результатами експериментальних досліджень. Предложено зменшити деформативність таких конструкцій, не збільшуючи частоту армування сечення, шляхом використання змішаного армування, коли металічна і базальтова арматура використовується спільно в якості робочої арматури сечення.

The experimental data of the basalt armature mechanical properties are given and analyzed. The conclusions about the possibility of its application in the building structures are made. The results of the typical tests of the bending structures reinforced with the basalt armature are analyzed. The high toughness and deformability indices of such structures are marked. It is pointed at the possibility of the total rigidity increasing for the bending structures reinforced with the basalt armature by the increasing the reinforcement percentage of the cross-section which is confirmed by the experimental tests' results. It is offered to decrease the deformability of the structures without increasing the reinforcement percentage by using the mixed reinforcement when the metal and basalt armatures are used combined as working armature of the cross-section

**Ключові слова:** Композит (FRP), базальтова арматура (BFRP), згинний елемент, деформативність, міцність, змішане армування

**Ключевые слова:** Композит (FRP), базальтовая арматура (BFRP), изгибаемый элемент, деформативность, прочность, смешанное армирование

**Key words:** bending element, deformability, rigidity, mixed reinforcement

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Залізобетонні конструкції є складовою частиною більшості будівель та споруд. Переваги та недоліки даного матеріалу відомі давно. Одним з недоліків є корозія арматури внаслідок впливу агресивного оточуючого середовища, порушень умов експлуатації, тощо. Поява та розвиток даного дефекту призводить до зменшення несучої здатності конструкції, розвитку тріщин та, як наслідок, вартісних ремонтних робіт.

Використання арматури з полімерних армованих композитів (FRP) дозволяє уникнути означених недоліків залізобетонних виробів та конструкцій. Застосування композитної арматури при виготовленні нових конструкцій відбувається зростаючими темпами як за кордоном, так і в нашій країні. На теперішній час накопичено відносно значну кількість експериментальних відомостей про роботу даного типу арматури у складі різноманітних будівельних конструкцій. Частина країн випустили нормативні документи з вказівками щодо методів розрахунку, методик конструювання та сфер використання композитної арматури.

В той же час композитна арматура, як і будь-який інший матеріал, має не тільки переваги, а і певні недоліки. Одним з таких недоліків вважають менший, порівняно з металевою арматурою, модуль пружності, що створює певні застереження при використанні даної арматури для виготовлення конструкцій, що працюють на згин [1...3]. Визначення методів подолання даного недоліку є актуальною теоретичною та практичною задачею.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Сучасна галузь виробництва будівельних матеріалів пропонує наступні різновиди композитної арматури, які відрізняються видом армуючого волокна: базальтова арматура (BFRP), склопластикова арматура (GFRP), вуглепластикова арматура (CFRP) та арамідна арматура (AFRP). В якості полімерної основи, зазвичай, використовують епоксидну смолу. З перерахованих різновидів арматури вуглепластикова та арамідна арматура, внаслідок високої вартості, має обмежене використання. Існуюча технологія виробництва даного типу арматури не дозволяє, на теперішній час, зменшити її вартість до конкурентної.

Базальтова та склопластикові арматура мають вартість співставну, а в деяких випадках і нижчу ніж традиційна металева арматура. Крім привабливої ціни дана арматура має високу міцність на розтяг (в 3...6 разів вища ніж у металевої арматури), легкість, корозійну стійкість до переважної більшості з агресивних розчинів та газів.

Базальтова арматура (BFRP) є, порівняно, новим матеріалом, який, водночас, швидко завойовує ринок будівельних матеріалів завдяки привабливій вартості та властивостям притаманним композитній арматурі. Даний вид арматури має вартісні показники та фізико-механічні властивості близькі до склопластикової арматури, але за певними механічними та експлуатаційними властивостями (модуль пружності, деформативність, стійкість до лужного середовища) базальтова арматура має певні переваги перед склопластиковою.

Сучасні технології виробництва дозволяють виготовляти арматуру з прогнозованими характеристиками міцності та жорсткості. Так в роботі [4] виконано ґрунтовні експериментальні дослідження механічних властивостей базальтопластикової арматури, яку виготовляє вітчизняний виробник ООО "Технобазальт-Инвест". В ході експериментальних випробувань було визначено модуль пружності BFRP арматури та її міцність на розтяг, зріз і зчеплення з бетоном. Всього було випробувано 260 дослідних зразків. Встановлено [4], що середні показники тимчасового опору арматури на розтяг змінюється в межах 948...1030 МПа. Даний показник вище гарантованого виробником значення 800МПа. Коефіцієнт варіації склав  $\nu=0.08$ , а забезпеченість визначена на рівні 0.9998, що більше ніж нормоване значення 0.95. Схожі значення були отримані і по інших механічних показниках. Так значення модуля пружності арматури з забезпеченістю 0.5 склало 56664 МПа, коефіцієнт варіації змінювався в межах  $\nu = 0.035...0.067$ .

Значення середніх граничних відносних деформацій встановлено на рівні 2.26. Загалом проведені дослідження [4] показали, що властивості арматури вітчизняного виробництва співставні з закордонними аналогами. Рівень забезпеченості всіх показників відповідає встановленим нормативним значенням.

Наведені характеристики базальтової арматури корелюються з аналогічними експериментальним даними проведеними іншими дослідниками в нашій країні та за кордоном [5]. Усереднені механічні показники металевої та композитної арматури наведено в таблиці 1. Таким чином, з точки зору стабільності механічних характеристик немає застережень для використання даної арматури для армування будівельних конструкцій.

Таблиця 1.

Типові показники механічних властивостей FRP та металевої арматури [5]

Назва показника	Тип арматури				
	Металева	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
Напруження текучості, МПа	276...517	-	-	-	-
Межа міцності, МПа	483...690	483...1600	600...3690	250...2540	1200
Модуль пружності, МПа	200	35...51	120...580	41...125	50
Відносне подовження при руйнуванні, %	6...12	1.2...3.1	0.5...1.7	1.9...4.4	2.5

В той же час певні механічні характеристики композитної арматури викликають певні питання, щодо можливості її використання для армування згинних елементів [1...3]. Так наведена величина модуля пружності базальтової арматури на рівні 56664 МПа є типовою. В той же час модуль пружності металевої арматури складає 210000 МПа, що, майже, в чотири рази більше. Тобто конструкції армовані композитною арматурою можуть мати більші прогини порівняно з конструкціями армованими металевою арматурою. На рис. 1 показані типові залежності  $\sigma - \epsilon$ , як для металевої арматури, так і для композитної. Аналіз наведених залежностей свідчить про те, що для композитної арматури лінійна залежність між напруженнями та деформаціями зберігається до моменту руйнування, в той час як в металевій арматурі присутня площадка текучості. Зважаючи на високі показники міцності композитної арматури та, порівняно, низький модуль пружності, можна зробити припущення, що визначальним критерієм при армуванні згинних елементів буде не міцність елементу, а відповідність граничним переміщенням та ширині розкриття тріщин.

**Постановка завдання.** Метою дослідження було узагальнення та аналіз експериментальних відомостей [4, 6...12], щодо показників міцності та жорсткості згинних елементів армованих базальтовою арматурою.

**Викладення матеріалу та результати.** Зважаючи на те, що композитна базальтова арматура є, порівняно, новим матеріалом існує обмежена експериментальних досліджень її поведінки у складі конструкцій. Однак

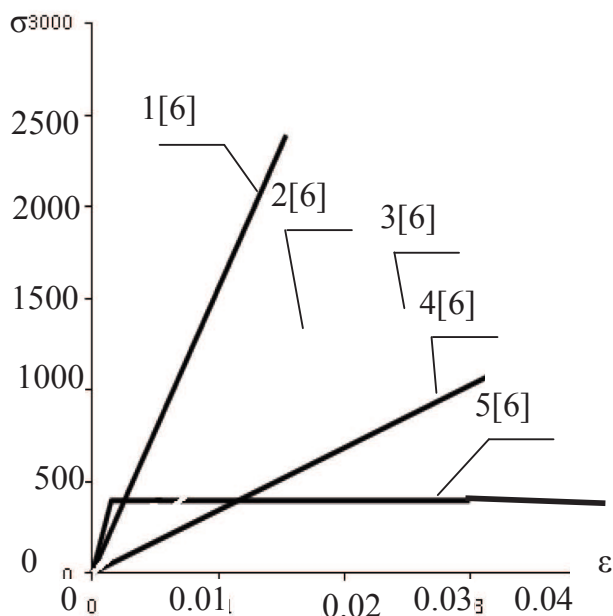


Рис. 1. Типові залежності  $\sigma$  для арматурних стержнів [6]: 1 – CFRP арматура; 2 – AFRP арматура; 3 – BFRP арматура; 4 – GFRP арматура; 5 – металева арматура.

армування. Використано бетон класу С30/35. Поперечне армування виконувалось замкнутими хомутами з арматури  $\varnothing 8$  А240, яка встановлювалась з кроком 75мм. Характеристики дослідних зразків наведено в таблиці 2.

певна кількість досліджень була проведена, як в нашій країні, так і за кордоном.

Ґрунтовне дослідження викладено в роботі [4] де експериментальним шляхом були з'ясовані не тільки характеристики базальтової арматури, а і комплекс показників балок армованих цією арматурою. Випробуванням підлягали балки прямокутного перерізу з розмірами  $b \times h = 120 \times 200$  мм та довжиною 1300 мм. Армування балок виконувалося базальтовою арматурою виробництва ООО “Технобазальт-Инвест”. Метою експерименту було визначення міцності та деформативності дослідних зразків в залежності від відсотку

Таблиця 2.

Характеристик дослідних зразків балок [4]

Серія	Коефіцієнт армування, $\mu, \%$	Повздожнє армування		Кількість зразків, шт.
		$A_s$	$A_s'$	
I	0,0059	2 $\varnothing 10$ (BFRP)	–	5
II	0,0086	2 $\varnothing 12$ (BFRP)	–	5
III	0,0146	2 $\varnothing 12$ (BFRP)	2 $\varnothing 10$ (BFRP)	5

Короткочасні випробування зразків виконувались за схемою однопрольотної вільнолежачої балки навантаженої двома зосередженими силами в третинах прольоту. Навантаження прикладалось частинами по  $\approx 0.1$  від руйнівного [4].

Під час випробувань проковзування кінців арматури не було зафіксовано, що свідчить про надійність її анкерування в тілі бетону [4]. В той же час певна частина досліджень [5, 7] вказують на те, що початок руйнуванню конструкції покладає втрата зчеплення композитної арматури з бетоном. Так в роботі [5] наведено результати експерименту в якому при рівні навантажень 0.8 від руйнівного почалося проковзування стержнів BFRP арматури, що призвело до руйнування дослідних балок внаслідок роздроблення бетону



стиснутої зони. При цьому інші дослідники стверджують про спільну роботи базальтової арматури з бетоном до руйнування. Такі відмінності можна пояснити технологією виробництва арматури, яку застосовує кожний окремих виробник і, як наслідок, розбігом властивостей.

Руйнування експериментальних зразків балок армованих базальтовою арматурою [4] відбулося внаслідок роздроблення бетону стиснутої зони, що свідчить про надмірне армування розтягнутої. Усереднені показники міцності та деформативності дослідних балок наведено в таблиці 3.

Таблиця 3.

Усереднені результати випробувань балок на міцність та жорсткість [4]

Серія	Руйнівне навантаження $M_u^{exp}$ , кНм	Відносні деформації при $M_u^{exp}$		Прогин $f$ при $M_u^{exp}$ , мм	Характер руйнування
		$\varepsilon_b$	$\varepsilon_f$		
I	18.15	0.0016	0.015	15.2	Роздроблення бетону стиснутої зони
II	21.97	0.0019	0.011	13.2	
III	21.2	0.0023	0.012	14.8	

Аналіз результатів таблиці 3 вказує на те, що відсоток армування балок композитною арматурою створює вплив, як на показники міцності, так і деформативності. Збільшення відсотку армування в балок серії II по відношенню до балок I серії призвело до збільшення несучої здатності, в середньому, на 20%, а прогини зменшилися, в середньому, на 15%. Але покращення даних показників відбувалося при збільшенні відсотку армування розтягнутої зони. Порівняння показників балок II та III серій вказує на те, що введення композитної арматури в стиснуту зону і, як наслідок, збільшення відсотку армування, виявилось неефективним, оскільки різниця між показниками лежить в межах похибки.

Оцінка абсолютних величин прогинів вказує на те, що існуюча нормативна база [8] висуває більш суворі вимоги, щодо деформативності елементів конструкцій, які працюють на згин. Так за конструктивними вимогами прогин не повинен перевищувати  $l / 150$  [8], тобто повинен обмежуватися  $\approx 5$ мм. При цьому середня величина прогину дослідних зразків при рівні напружень  $0.7 M_u^{exp}$  знаходилась в межах 8...10мм. Тобто для згиних елементів армованих композитною арматурою вирішальним є розрахунок за другою групою граничних станів.

Багато в чому подібні результати були отримані іншими дослідниками [9...12]. Всі вони вказують на те, що згинні елементи армовані будь-якою композитною арматурою мають несучу здатність у 1.5...2.5 вищу ніж аналогічні конструкції з металевою арматурою. В той же час прогини конструкцій з композитною арматурою більші ніж за умови використання металевої, приблизно, на ті ж відсотки. Також спостерігалось зменшення прогинів зі збільшенням армування розтягнутої зони.

Так в роботі [12] показано, що збільшення відсотку армування за рахунок розтягнутої зони призводить до зменшення прогинів дослідних зразків. На рис. 2 наведено експериментальні прогини зразків плит армованих BFRP арматурою з різним відсотком армування та металевою арматурою, визначених для величини навантаження, яке складало 70% від руйнівного. Як видно з рис. 2 найменшу величин прогинів показали плити армовані металевою арматурою, яка склала  $\approx 8$ мм. Показовим є істотна різниця між

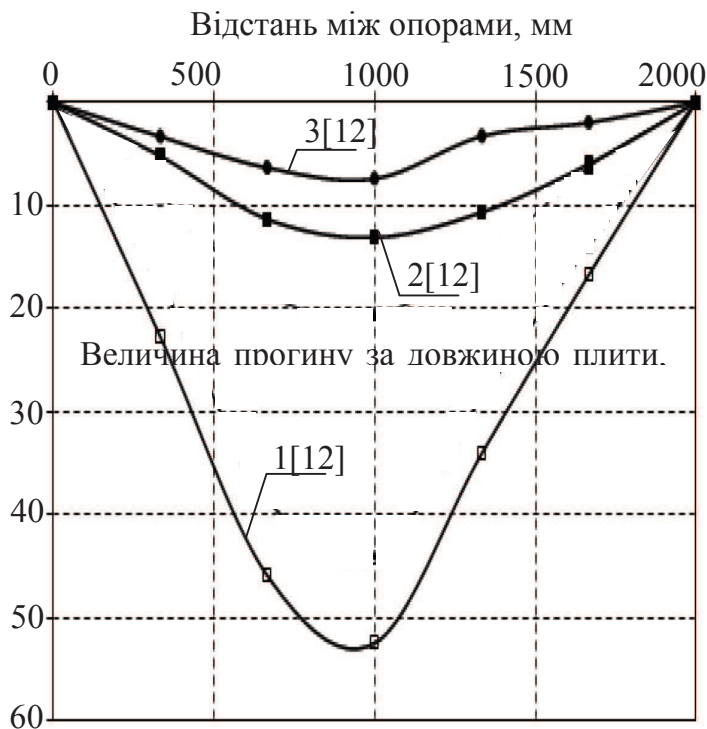


Рис. 2. Величина прогинів плит за довжиною в залежності від відсотку армування та типу арматури [12]:

- 1 – BFRP арматура розтягнутої зони,  $\mu = 0.24\%$ ;
- 2 – BFRP арматура розтягнутої,  $\mu = 0.63\%$ ;
- 3 – металева арматура розтягнутої зони,  $\mu = 0.5\%$ .

показниками прогинів плит армованих базальтовою арматурою в залежності від відсотку армування. Так при відсотку армування  $\mu = 0.24\%$  прогин склав  $\approx 52$ мм, а збільшення відсотку армування до  $\mu = 0.63\%$  збільшило жорсткість плити, після чого середнє значення прогину склало  $\approx 12$ мм. Таким чином були отримані співставні величини прогинів при відсотку армування плит базальтовою арматурою та відсотку металевою арматурою.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проведений аналіз експериментальних даних властивостей базальтової арматури та особливостей її поведінки у складі конструкцій що працюють на згин дозволяє дійти наступних висновків:

- базальтова арматура має достатню стабільність показників механічних властивостей, що дозволяє застосовувати її для армування будівельних конструкцій;
- показники міцності згинних конструкцій армованих базальтовою арматурою перевищують аналогічні для випадку армування металевою арматурою, за умови однакового відсотку армування перерізу;
- збільшення величин прогинів згинних елементів армованих базальтовою арматурою можна уникнути підвищивши відсоток армування розтягнутої зони цих конструкцій.

Збільшення відсотку армування тільки для забезпечення вимог за другою групою граничних станів не завжди є прийнятним виходячи з економічних показників. Покращення показників деформативності можна досягти застосувавши змішане армування, використовуючи в розтягнутій зоні, як базальтову арматуру, так і металеву, одночасно. При цьому металева арматура повинна бути забезпечити прийнятний рівень прогинів та тріщиностійкості, а базальтова підвищити міцність перерізу та зменшити руйнівний вплив агресивного середовища на загальну несучу здатність конструкції. На теперішній час практично не існує відомостей про особливості напружено-деформованого стану таких конструкцій. В зв'язку з цим напрямок подальших досліджень полягає в виготовленні експериментальних зразків балок зі змішаним армуванням і визначенні їх міцності, деформативності та тріщиностійкості.

1. Alsayed SH, Al-Salloum YA, Almusallam TH (2000). "Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures", *Composites Part B: Engineering*, (31), 555-567.
2. Vijay, P. V. and GangaRao, H. V. 2001 . "Bending Behaviour and Deformability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members." *ACI structural journal*, 98(6), 834-842.
3. Ilker Fatih Kara and Ashraf F. Ashour. 2012 "Flexural performance of FRP reinforced concrete beams". *Composite Structures*, 94(5), 1616-1625.
4. Солдатченко, О. С. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість згинальних конструкцій зі склопластиковою і базальтопластиковою арматурою : дис.... канд. техн. наук : 05.23.11 / Солдатченко Олександр Сергійович. – Київ, 2012. – 196 с.
5. Luna Salh, "Analysis and Behaviour of Structural Concrete Reinforced with Sustainable Materials" M.SC thesis, Liverpool Universite, Liverpool, UK, 2014, 108pp.
6. Fico, R., Limit states design of concrete structures reinforced with FRP bars, 2008, Università degli Studi di Napoli Federico II.
7. Teixeira, A. M. A. J., Carneiro, L. A. V., and Menezes, R. A. (2013). Strength of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. Paper presented at the 11<sup>th</sup> International symposium on fiber reinforced polymers for reinforced concrete structures, Guimarães, Portugal.
8. ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Прогини та переміщення. – К.: Мінбуд України, 2006. – 14с.
9. Masmoudi, R., Béland, S., and Benmokrane, B. 1999 . "Experimental evaluation of Kb factor for glass and carbon isorod FRP rebars". Technical Report No. 02-1999, submitted to Pultrall Inc., Thetford Mines, Qué.
10. Habeeb, M. N., and Ashour, A. F. 2008 . "Flexural behavior of continuous GFRP reinforced concrete beams." *J. Compos. Constr.*, 12(2), 115–124.
11. El-Mogy, M., El-Ragaby, A. and El-Salakawy, E. 2010 . "Flexural Behaviour of FRP-Reinforced Continuous Concrete Beams." *ASCE Journal of Composites for Construction*, 14(6), 486-497.
12. Mohamed, E., "Behaviour of continuous concrete slabs reinforced with frp bars", PhD thesis, University of Bradford, UK, 2013, 177pp.