

10. Антонов Э.И. Схема и оценка параметров шахтной водоотливной установки с насосоструйной подкачивающей системой организации подпора / Э.И. Антонов // Горная механика: Сб. науч. тр. НИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецк, 1991. – С. 126-148.
11. Галанин А.Н. Совершенствование насосно - струйной системы создания подпора на входе насосов водоотлива / А.Н. Галанин // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок. Сб. научн. тр. НИИГМ им. М.М.Федорова. – 2007. – Вып. 101. – С. 227-236.
12. Малеев В.Б. Эффективность центробежно-струйных систем в составе шахтного водоотлива / В.Б. Малеев, Э.И. Антонов, В.А. Романов // Уголь Украины. – 1995. – №3. – С. 47-48.
13. Червинская Н.В. Моделирование процессов динамики комплекса шахтного водоотлива в базе Max-plus алгебры / Н.В. Червинская, В.И. Бессараб, В.В. Червинский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». Вип. 147 (30). – Донецьк :ДонНТУ, 2009. – 248 с. – С. 51–58.
14. Червинская Н.В. Использование аппарата Max-plus алгебры при описании объектов дискретно– непрерывного класса / Н.В. Червинская // Bulletin d'Eurotalent-Fidjip, 2009. – Volume 4. – France, Romilly sur Seine: Editions du Jipto, 2009. – ISSN 2101–5317. – 74 p. – P. 51–56.
15. Моделирование задач в среде LabVIEW - <http://automationlab.ru/index.php/2014-08-25-13-20-03/449-24----labview->
16. Пейч Л.И., Точилин Д.А., Поллак Б.П. LabVIEW для новичков и специалистов. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 268 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.17

УДК 624.012.454

О.І. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук, проф., О.Ю. ЄРЬОМЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
М.О. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ БАЛОК АРМОВАНИХ БАЗАЛЬТОВОЮ АРМАТУРОЮ

Мета. Метою даної роботи є порівняння напружено-деформованого стану балок армованих базальтовою арматурою (BFRP) з аналогічними залізобетонними балками. Базальтова арматура є, відносно, новим матеріалом і особливості її роботи, у складі тих чи інших будівельних конструкцій, досліджені не в повній мірі. Існує обмежена кількість відомостей про характер впливу специфічних, притаманних композитним матеріалам, фізико-механічних властивостей базальтової арматури на загальну несучу здатність та деформативність конструкцій.

Методи дослідження. Вивчення, аналіз та систематизації результатів новітніх експериментальних досліджень поведінки базальтової арматури у складі будівельних конструкцій. Проведення оцінки характеру руйнування, тріщиноутворення, показників міцності та жорсткості за результатами випробувань експериментальних балок.

Наукова новизна. З'ясовані відмінності в характері руйнування, тріщиноутворення, прогинах та показниках міцності балок армованих базальтовою арматурою порівняно з балками армованими металевою арматурою. Встановлено потребу в удосконаленні методів оцінки прогинів балок армованих базальтовою арматурою зважаючи на показники жорсткості цієї арматури.

Практична значимість. Розглянуті відомості про особливості роботи балок армованих базальтовою арматурою порівняно з балками армованими металевою арматурою дають підстави стверджувати про ефективність використання базальтової арматури у складі бетонних конструкцій. Розширення бази експериментальних відомостей дасть змогу підвищити надійність конструкцій армованих базальтовою арматурою, вдосконалити існуючу нормативну базу з розрахунку та проектування таких конструкцій.

Результати. Встановлено, що балки ідентичних розмірів, виготовлені з бетону одного класу, армовані базальтовою та металевою арматурою одного діаметру показали приріст міцності при випробуваннях на згин, до 210% для випадку використання базальтової арматури порівняно зі зразками армованими металевою арматурою. В той же час прогини при руйнуванні балок з базальтовою арматурою більше ніж у 2.5 рази перевищували прогини балок армованих металевою арматурою. Прогини обох зразків балок при рівні навантажень, яке відповідає руйнівному для балок армованих металевою арматурою, були однаковими.

Ключові слова: композит, базальтова арматура, балка, бетон, міцність, прогин, тріщиностійкість.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Фіброармовані полімерні матеріали (FRP) все більше використовуються в будівництві, як для підсилення існуючих конструкцій, так і при виготовленні нових, в якості альтернативи металевої арматури. Вони характеризуються низькою питомою вагою, підвищеними показниками міцності на розтяг, втомної міцності. Однією з причин використання FRP матеріалів є те, що вони стійкі до впливу більшості агресивних середовищ і не зазнають корозії на відміну від металевої арматури [1]. Таким чином використання композитної арматури дозволить забезпечити нові функціональні переваги, підвищити надійність та довговічність конструкцій.

Застосування нових матеріалів потребує всебічного дослідження їх властивостей, а також властивостей конструкцій виготовлених з їх використанням.

Аналіз досліджень і публікацій. Промисловість випускає, порівняно, велику кількість FRP матеріалів для будівництва. До них відносять композитну арматуру, яку за вмістом армуючої фібри поділяють на вуглепластикову (CFRP), арамідну (AFRP), базальтову (BFRP) та склопластикову арматуру (GFRP). Базальтова арматура є, порівняно, новим видом композитної арматури.

Базальтова арматура складається з безперервних базальтових волокон та полімерного композиту. Технологія пултрузії дозволяє виготовляти арматурні стержні шляхом поєднання цих двох компонентів. Дана технологія представляє собою процес протягування безперервного волокна через систему нагрітих фільтрів з одночасним просочуванням полімерним в'язким. За рахунок поступового зменшення перерізу фільтрів відбувається формування арматурного стержня [2].

Базальтові волокна отримують шляхом розплавлення подрібненої вулканічної базальтової породи при температурі 1400-1700 °С. Потім розплавлену породу екструдують через спеціальні платинові втулки для виробництва безперервного базальтового волокна. Останнє має властивості та характеристики подібні до скляних волокон, але вони більш стійкі до впливу агресивного середовища. Їх міцність та жорсткість поступається волокнам з арамідну чи вуглецю, але вартість базальтових волокон і матеріалів на їх основі набагато нижча [2].

В якості полімерної матриці, зазвичай, використовують такі термореактивні смоли, як вінілестер або епоксидна смола. Вони мають добрі показники міцності, хімічної стійкості, низьку повзучість порівняно з іншими термореактивними смолами [3]. Полімерна матриця потрібна для забезпечення сумісної роботи окремих волокон композиту між собою, рівномірного розподілу зусиль між ними, а також захисту волокон від механічних ушкоджень.

Волокна (фібра), що використовується для виготовлення композитів є високоміцними та відзначаються пружною роботою до руйнування в той час, як полімер представляє собою пластичний матеріал з низькою міцністю та жорсткістю.

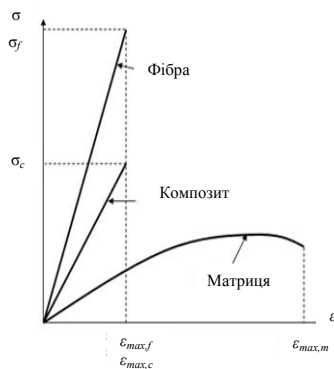


Рис. 1. Напружено-деформований стан композиту та його компонентів [4]

Оскільки композитна арматура є двокомпонентним матеріалом, то поєднання фібри і матриці дасть усереднені показники фібро пластиків порівняно з компонентами, які їх утворюють. Типова залежність напруження-деформація для композиту та його складових наведено на рис. 1.

На теперішній час існує досить велика кількість виробників композитної арматури, при цьому практично відсутні нормативні документи, які б регламентували характеристики продукції, що вони випускають.

Вважаючи на це гарантовані показники міцності того чи іншого виду композитної арматури можна отримати безпосередньо від виробника або експериментальним шляхом.

Нижче наведено табл. 1 типових механічних властивостей арматурних стержнів композитної арматури залежно від армуючого волокна та металевої арматури.

Таблиця 1

Механічні характеристики арматурних стержнів [5]

Назва характеристики	Сталь	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP*
Межа текучості, МПа	276-517	-	-	-	-
Межа міцності, МПа	483-690	483-1600	600-3690	250-2540	1200
Модуль пружності, ГПа	200	35-51	120-580	41-125	50
Пружна деформація, %	0,14-0,25	-	-	-	-
Деформація при руйнування, %	6,0-12,0	1,2-3,1	0,5-1,7	1,9-4,4	2,5

* - для випадку об'ємної долі волокна 0,8.

На теперішній час є дуже обмежена кількість відомостей про специфіку роботи BFRP арматури у складі бетонних конструкцій. В той же час накопичено значну кількість експериментальних відомостей стосовно поведінки конструкцій армованих GFRP арматурою. З огляду на певну спорідненість властивостей цих матеріалів можна виділити спільні, для конструкцій армованих композитною арматурою, особливості роботи під навантаженням.

Дослідження FRP арматури вказують на її пружний характер поведінки аж до руйнування. В той же час залізобетонні балки відзначаються пружнопластичною поведінкою за рахунок металевих арматурних стержнів у їх складі. Зважаючи на це дослідники [6] відмічають крихкий характер руйнування властивий для елементів армованих композитами, внаслідок розриву розтягнутої арматури або руйнування бетону стиснутої зони. Оскільки композитна арматура має менший модуль пружності, порівняно з металевою, дослідні зразки показують більші прогини [7]. Порівняння результатів випробувань балок армованих склоарматурою та металевою арматурою показало, що за однієї величини навантаження прогини балок з GFRP арматурою були в 1.5 рази більшими [8, 9]. Підвищена деформативність композитної арматури також впливає і на збільшену ширину розкриття тріщин. Однак зважаючи на корозійну стійкість такої арматури, даний критерій можна віднести до другорядних [10]. В роботах [9, 10] міститься детальний аналіз прогинів дослідних конструкцій армованих GFRP арматурою, наведені апроксимуючі криві теоретичних (побудованих за різними методиками) та експериментальних величин прогинів, зроблено намагання систематизувати наявні експериментальні дані з намаганням встановити залежність між відсотком армування конструкцій і їх прогином.

Наведені вище відомості, переважно, стосуються конструкцій армованих склопластиковою арматурою і, зважаючи на характеристики наведені в табл. 1, вони можуть відрізнятися для балок армованих базальтовою арматурою.

Постановка завдання. Визначення фактичних показників міцності та жорсткості конструкцій армованих базальтовою арматурою дозволить з'ясувати можливість використання BFRP арматури для армування конструкцій що працюють на згин. Результати експериментальних випробувань можуть слугувати за базис для розробки окремої нормативної бази по розрахунку та проектуванню таких елементів. З огляду на сказане, було проаналізовано результати новітніх експериментальних досліджень [11-15] поведінки базальтової арматури у складі будівельних конструкцій.

Викладення матеріалу та результати. Аналіз доступних експериментальних відомостей [11-15] вказує на те, що показники міцності та деформативності дослідних зразків мають багато спільного, тому нижче розглянуто результати описувані в роботі [15], як більш репрезентативні.

Програмою експериментальних випробувань [15] передбачалося дослідження балок двох серій. Балки першої серії (BC) армувалися базальтовою арматурою (BFRP), а другої (SC) – металевою арматурою. Кожна серія налічувала по два зразки. Зразки обох серій були довжиною 2000мм та мали розміри поперечного перерізу $b \times h = 150 \times 200$ мм.

Армування зразків балок першої серії в розтягнутій зоні виконувалося двома стержнями BFRP $\varnothing 8$ мм з руйнівним навантаженням на розтяг 1350 МПа та модулем пружності 46,98 ГПа. В розтягнутій зоні балок серії SC передбачалося два стержня металевої арматури $\varnothing 8$ мм з руйнівним навантаженням на розтяг – 650 МПа. Поперечна арматура та конструктивна арматура в стиснутій зоні балок обох серій була металевою $\varnothing 6$ мм [15].

Для визначення характеристик міцності бетону виконували бетонування зразків кубів розміром $100 \times 100 \times 100$ мм. Усереднена кубкова міцність бетону, на момент проведення випробувань балок, склала 38 МПа [15].

Випробування дослідних зразків балок на згин виконували статичним навантаженням прикладеним в третинах прольоту. Навантаження прикладалися ступенями по 0,5 кН до руйнування.

Характер роботи під навантаженням балок армованих металевою арматурою (серія SC) був типовим з утворенням нормальних тріщин, їх поступовим розвитком і руйнуванням зразків внаслідок розриву розтягнутої арматури.

Балки армовані базальтовою арматурою (серія BC) зруйнувалися від руйнування бетону стиснутої зони (рис. 2).

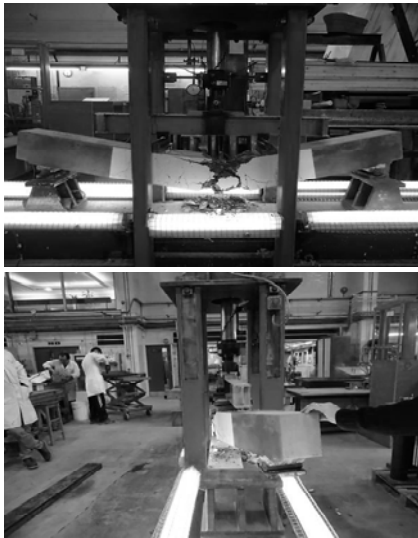


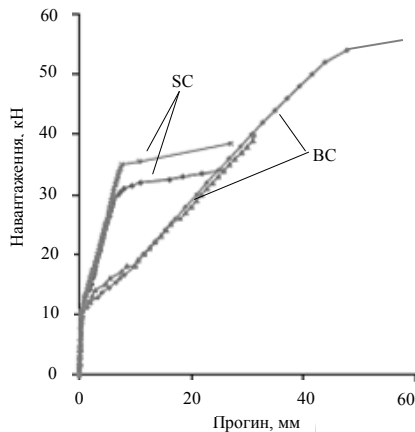
Рис. 2. Загальний вид зруйнованих зразків балок серії ВС [15]

При рівні навантажень $\approx 80\%$ від руйнівного дослідні зразки балок втрачали стійкість з площини дії моменту. На думку дослідників [15] це відбувалося внаслідок проковзування одного з двох стержнів через втрату зчеплення з бетоном.

Зважаючи на те, що модуль пружності базальтової арматури майже в 4 рази менший за модуль пружності металевої арматури з'ясування величин прогинів дослідних зразків становить певний інтерес. До рівня навантажень $\approx 15\%$ від руйнівного балки серії ВС не виявляли ознак надмірних прогинів. Після утворення тріщин в розтягнутій зоні ефективний момент інерції зменшився, що призвело до зменшення жорсткості перерізу. Останнє призвело до збільшення прогинів (рис. 3).

Подальше монотонне збільшення навантаження характеризувалося лінійною залежністю між прогинами і величиною навантаження. Відхилення від лінійності спостерігаються при рівнях навантажень близьких до руйнівних.

Рис. 3. Прогини дослідних зразків балок серії ВС [15]



Останнє можна пояснити виникненням пластичних деформацій при зминанні бетону стиснутої зони балок. На рис. 3 залежність прогин-навантаження для однієї балки серії ВС побудована не повністю оскільки завчасно були зняті прогиноміри [15].

В табл. 2 наведено експериментальні значення міцності, жорсткості та тріщиностійкості дослідних балок обох серій.

Дані наведені в табл. 2 свідчать про те, що армування балок базальтовою арматурою збільшило їх несучу здатність на $\approx 210\%$ порівняно з балками армованими металевою арматурою.

Зріс також момент тріщиноутворення, в середньому, на 10%. В той же час прогини балок з BFRP арматурою також збільшилися.

Таблиця 2

Характеристики міцності та жорсткості дослідних зразків [15]

Зразок	Експериментальний згинальний момент при руйнуванні, кНм	Експериментальний момент тріщиноутворення, кНм	Експериментальне руйнівне навантаження, кН	Експериментальний прогин, мм
SC-1	10,2	10	34	25,6
SC-2	10,65	10,5	28	25,4
BC-1	17,4	11,2	57	73,5
BC-2	18,3	12,0	61	-

Так порівняння прогинів, які відповідають руйнівному навантаженню балок вказує на те, що для балок серії ВС вони зросли, в середньому, у 2,5 рази порівняно з балками серії SC.

Даний показник співвідноситься зі зростанням несучої здатності балок серії ВС у 2,1 рази.

Порівнювати прогини, які відповідають руйнівному рівню навантажень не зовсім коректно, оскільки безпосередньо перед руйнуванням відбулося проковзування базальтової арматури в тілі бетону, що не могло не вплинути на даний показник.

Аналіз рис. 3 показує, що для рівня навантажень, яке відповідали руйнівному для балок серії SC величина прогинів була однаковою в балках обох серій.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати експериментальних випробувань балок армованих базальтовою та металевою арматурою свідчать про те, що базальтова арматура може використовуватися в якості заміни металевої при армуванні конструкцій, які працюють на згин. Заміна металевої арматури стержнями базальтової арматури того ж діаметру створює двократний запас міцності та підвищує момент тріщиноутворення.

Надмірні прогини, яких зазнали зразки армовані базальтовою арматурою потребують додаткового аналізу та порівняння з результатами аналогічних експериментів.

Зважаючи на те, що при заміні металевої арматури на базальтову того ж діаметру міцність перерізу буде забезпечено, то розрахунок можна вести лише за другою групою граничних станів.

Самі вимоги, які містяться при розрахунку за придатністю до нормальної експлуатації можуть бути скореговані зважаючи, що утворення тріщин та їх розкриття для конструкцій армованих базальтовою арматурою є не таким критичним як при використанні металевої, оскільки базальтова арматура не зазнає корозії.

Зрозуміло, що наведені вище припущення потребують додаткових експериментальних випробувань.

Список літератури

1. **Іванов А. И.** Совершенствование конструкции и методики расчёта пролётных строений мостов с несущими элементами из композиционных материалов: дис... канд. техн. наук: 05.23.01/**Іванов Артём Сергеевич.** – Новосибирск: СГУПС, 2015.–183 с.
2. **Subramanian, D.N.**, Sustainability of RRC Structures Using Basalt Composite Rebars. The Masterbuilder, 9/2010: p. 156-164.
3. ISIS Design Manual No.3. “Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers (FRPs)”, ISIS Canada, 2007.-151p.
4. **Tuakta C.**: Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
5. ACI 440.1R-03, Guide for the Design and Construction of Concrete with FRP Bars, American Concrete Institute, Detroit, MI., 2003.-41p.
6. Structural design with FRP materials, Composite for Construction, **L.C.Bank, Jhon Willey** and son, 2006.
7. Load deflection analysis of FRP reinforced concrete flexural members, **M.A.Aiello**, Journal of Composite for Construction, vol.4, no.4, 2000.
8. Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete, S.S.Faza and GangaRao, Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications. **A.Nanni** (editor) @ 1993, Elsevier publication.
9. Experimental Testing of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP Bars, **M.M.Rafi, A.Nadjai and F.Ali**, Journal of Composite Materials, vol.41, no.22, 2007.
10. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars, **Toutanji and Safi**, ACI Structural Journal, vol.97, no.5, 2000.
11. **Adhikari, S.** “Mechanical Properties and Flexural Applications of Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Bars” Thesis, 2009.-385p.
12. **Eythor Jhorhallsson and Bjorgvin Smari Jonsson**, 2011 “Test of prestressed concrete beams with basalt fiber reinforcement polymer (BFRP) tendons”, Thesis in Civil Engineering with specialization in structural design submitted to School of Science and Engineering at Reykjavik University, Iceland, June 2011
13. **Jónsson, Björgvin Smári** “Prestressed BFRP tendons in concrete beams”. M.S thesis. Reykjavik University, Iceland 2011.
14. **Gan Yil, Jiang, Fei Weil, Sun, & Li Bing.** “Nonlinear Finite Element Analysis on Prestressed and Non-prestressed Concrete Beams with BFRP Tendons”. Journal of Logistical Engineering University.
15. **Luna Salh**, “Analysis and Behaviour of Structural Concrete Reinforced with Sustainable Materials”, M.SC thesis, Liverpool Universite, Liverpool, United Kingdom, 2014.-108p.

Рукопис подано до редакції 17.03.17