

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.012.454

Валовой О.І.

Криворізький національний університет

Єрмяненко О.Ю.

Криворізький національний університет

Валовой М.О.

Криворізький національний університет

Афанасьєв В.В.

Криворізький національний університет

Герб П.І.

Криворізький національний університет

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ БАЛОК ІЗ СУМІСНИМ АРМУВАННЯМ БАЗАЛЬНОПЛАСТИКОВОЮ ТА МЕТАЛЕВОЮ АРМАТУРОЮ

Наведено програму та результати експериментальних випробувань дослідних зразків балок, армованих металевою арматурою, базальтопластиковою (BFRP) арматурою, з гібридним армуванням металевою та базальтопластиковою (BFRP) арматурою одночасно. Зразки балок виготовлялися з використанням звичайного бетону, з кварцевим піском як дрібним заповнювачем та з бетону, в якому кварцовий пісок замінено дрібними фракційованими відходами гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК). Короткочасні випробування балок монотонним статичним навантаженнями до руйнування дали змогу з'ясувати, що міцність балок, армованих базальтопластиковою (BFRP) арматурою, зросла на 37–44% порівняно з балками, армованими металевою арматурою. Зменшення вмісту BFRP арматури при гібридному армуванні не вплинуло на зниження показників міцності, і приріст міцності порівняно з балками, армованими металевою арматурою, становив 38–41%. У балках, армованих BFRP арматурою, завдяки відсутності пластичних деформацій у цієї арматури були відсутні залишкові деформації після припинення дії навантаження, незважаючи на значні ушкодження та руйнування бетону. Зразки балок, виготовлених із бетону на дрібних фракційованих відходах ГЗК, показали на 1–8% більші показники міцності порівняно з аналогічними балками, виготовленими на бетоні із кварцевим піском як дрібним заповнювачем.

Ключові слова: змішане армування, гібридне армування, базальтопластикові арматура, міцність, балка, дрібні відходи ГЗК, деформативність.

Постановка проблеми. Використання базальтопластикової арматури в будівництві зростає по всьому світі, як і притаманні цьому виду арматури висока питома міцність на розтяг, інертність до впливу агресивного середовища, немагнітність, низька теплопровідність тощо. Світовий досвід використання базальтопластикової арматури свідчить про те, що на теперішній час виготовлення конструкцій з армуванням виключно цією арматурою є не завжди виправданим із точки зору їх експлуатаційних характеристик за другою групою

граничних станів. На цьому етапі технології виготовлення як базальтопластикової арматури, так і конструкцій, нею армованих, доцільно використовувати її разом із традиційною, металевою арматурою. Такий підхід дасть змогу значно покращити показники міцності та жорсткості будівельних конструкцій, підвищити їх надійність та довговічність. Обмеженість нормативної бази і практичних рекомендацій із розрахунку та виготовлення будівельних конструкцій із гібридним армуванням металевою і базальтопластиковою арматурою

викликає потребу в дослідженні їх напружено-деформованого стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Базальтопластикова (BFRP) арматура є перспективним матеріалом для армування конструкцій із бетону. До її переваг, порівняно з металевою арматурою, належать висока міцність на розтяг, інертність до впливу агресивного середовища та висока корозійна стійкість [1; 2].

Відомо, що композитна арматура має високу міцність на розтяг, але знижений модуль пружності порівняно зі сталлю [2; 3]. Останній фактор може стати причиною розвитку надмірних деформацій конструкцій, армованих композитною арматурою. Так, науковцями було досліджено напружено-деформований стан конструкцій, що згинаються, армованих BFRP арматурою [2–8]. З'ясовано, що дослідні зразки показували значний приріст показників міцності, на 25–90% порівняно зі зразками, армованими металевою арматурою. При цьому завдяки низькому модулю пружності деформативність зразків, армованих BFRP арматурою, була вищою. Так, у роботі

науковців [8] наведені відомості, що прогини та ширина розкриття тріщин зразків, що працюють на згин, армованих композитною арматурою, були на 60% вищими, ніж у балках, армованих металевою арматурою, при рівні напружень 70% від руйнівних. Схожі результати були отримані в інших роботах [2–7; 11].

Варто зазначити, що підвищена деформативність конструкцій характерна як для використання базальтопластикової (BFRP) арматури, так і для використання склопластикової (GFRP) арматури [9; 10].

Одним зі шляхів зменшення деформативності конструкцій, що згинаються, армованих BFRP арматурою, є використання змішаного (гібридного) армування, за якого в розтягнутій зоні розміщують як BFRP арматуру, так і металеву одночасно. При цьому металева арматура має забезпечити необхідний рівень прогинів та тріщиностійкості, а BFRP арматура – підвищити міцність перерізу та зменшити руйнівний вплив агресивного середовища на загальну несучу здатність конструкції.

Таблиця 1

Схема армування поперечних перерізів балок за серіями

№ серії	Маркування балок	Поперечний переріз балок	№ серії	Маркування балок	Поперечний переріз балок
1	БМ-1 БМ-2 БМ-3		4	БМД-1 БМБ-2 БМД-3	
2	ББ-1 ББ-2 ББ-3		5	ББД-1 ББД-2 ББД-3	
3	БМБ-1 БМБ-2 БМБ-3		6	БМБД-1 БМБД-2 БМБД-3	

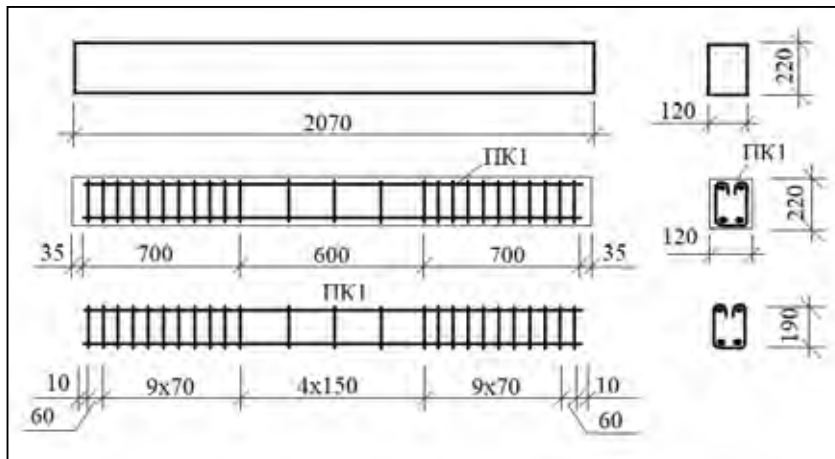


Рис. 1. Опалубочне та арматурне креслення балок серії БМ

Постановка завдання. Нині існує обмежена база експериментальних відомостей про роботу гібридноармованих конструкцій, що працюють на згин, із використанням металевої та базальтопластикової арматури. Зокрема, в наявних дослідженнях не з'ясовано питання, як впливає зменшення відсотку BFRP арматури при гібридному армуванні на міцнісні показники дослідних зразків. З огляду на сказане було запроєктовано, виготовлено та випробувано дослідні зразки балок із гібридним армуванням металевою та базальтопластиковою арматурою з метою дослідження їх напружено-деформованого стану.

Виклад основного матеріалу дослідження. Програмою експериментальних випробувань було передбачено виготовлення 6 серій дослідних зразків бетонних армованих балок, по три балки в кожній серії. Зразки за серіями відрізнялися за такими ознаками:

- серія БМ – балки армовані металевою арматурою (контрольна серія);
- серія ББ – балки армовані BFRP арматурою;
- серія БМБ – балки з гібридним армуванням металевою та BFRP арматурою;
- серія БМД – балки, армовані металевою арматурою з бетоном на дрібних відходах гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК);
- серія ББД – балки, армовані BFRP арматурою з бетоном на дрібних відходах (ГЗК);
- серія БМБ – балки з гібридним армуванням металевою та BFRP арматурою з бетоном на дрібних відходах (ГЗК).

Армування поперечних перерізів балок всіх серій наведено в таблиці 1.

Для можливості коректного порівняння результатів випробувань балок різних серій розміри перерізів балок та відсоток їх армування передбачався незмінним для зразків всіх серій.

Схему армування зразків балок наведено на рис. 1.

Виготовлення арматурних каркасів, бетонної суміші та бетонування дослідних зразків балок відбувалося в заводських умовах на потужностях ПрАТ «Криворіжіндустрбуд». Бетонування експериментальних зразків балок, кубів проводили в металевих формах (рис. 2). Перед бетонуванням поверхню форм змащували тонким шаром гідрофобної змазки. В форми встановлювалися в'язані просторові каркаси. Проектне положення каркасів із метою забезпечення утворення захисного шару бетону здійснювалося за допомогою бетонних прокладок. Приготування бетонної суміші виконувалося на бетонно-розчинному вузлі. Укладання суміші в опалубку здійснювалося за допомогою бадді з подальшим ущільненням на вібростолі. Після формування зразки поміщали в камеру для прогріву. Розпалубка відбувалася через 28 діб після бетонування.

Із метою армування зразків було використано металеву та BFRP арматуру відповідно до схем армування, наведених в табл. 1. Базальтопластикову (BFRP) арматуру було надано виробником композитної арматури ТОВ «Технобазальт-Інвест». Механічні характеристики BFRP арматури такі: модуль пружності – $45 \cdot 10^3$ МПа; тимчасовий опір розриву – 800 МПа; порівняне видовження після розриву – 1.78%.

Під час бетонування використовувався бетон класу С25/30. Раніше було зазначено, що для бетонування балок серій БМ, ББ, БМБ використовувався бетон із кварцовим піском як дрібним заповнювачем, а в балках серій БМД, ББД, БМБД – бетон на дрібних відходах ГЗК. Останні представляють собою фракційовану кварцово-залізисту мінеральну суміш щільністю 1500–1600 кг/м³.

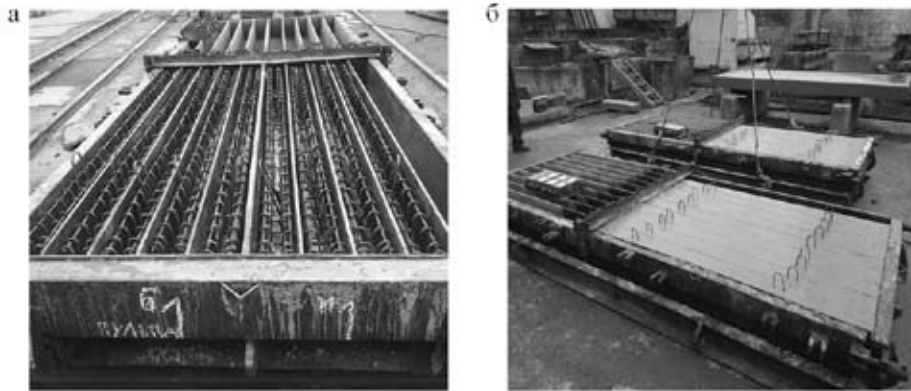


Рис. 2. Виготовлення дослідних зразків балок:
а) Інвентарна металева опалубка з арматурними каркасами;
б) Загальний вигляд забетонуваних зразків балок



Рис. 3. Стенд для випробування балок

Використання відходів ГЗК як дрібного заповнювача бетонної суміші виправдано, з огляду на економічні показники (відходи ГЗК коштують у 8–10 разів менше, ніж кварцовий пісок), і дає змогу частково вирішувати питання утилізації промислових відходів. Проведені протягом минулих десятиліть численні дослідження [12] вказують на можливість рівноцінної заміни кварцового піску фракцієваними дрібними відходами ГЗК під час виготовлення широкої номенклатури залізобетонних виробів.

Із метою визначення міцнісних та деформативних характеристик використаних видів бетону одночасно з бетонуванням балок виконували бетонування зразків кубів із ребром 100 мм кожного виду бетону. Випробування зразків бетону виконували у віці 28 днів із моменту їх виготовлення і у віці 151 днів, безпосередньо перед випробуваннями зразків балок. У віці 28 днів міцність обох видів бетону на стиск відповідала прийнятому проектному класу бетону (С25/30), а у віці 151 днів становила 46.16 МПа для бетону на квар-

цовому піску та 51.72 МПа для бетону на дрібних відходах ГЗК.

Випробування дослідних зразків балок виконувалося на гідравлічному пресі П-125 за схемою однопрогонової вільнолежачої балки навантаженої двома зосередженими силами в третиною прогону. Під час випробування балок були використані такі прилади: прогиномір Максимова; індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм для визначення деформацій бетону балки та просадки опор балок; мікроскоп МПБ-2 з 24 – кратним збільшенням і ціною поділки 0,05 мм для визначення ширини розкриття нормальних і похилих тріщин. Навантаження дослідних зразків балок здійснювали ступенями по 0,1 від руйнівного навантаження. Стенд для проведення експериментальних зразків балок на згин наведено на рис. 3.

Робота дослідних зразків балок під навантаженням та їх руйнування перебували у прямій залежності від типу арматури, який був використаний для їх армування.

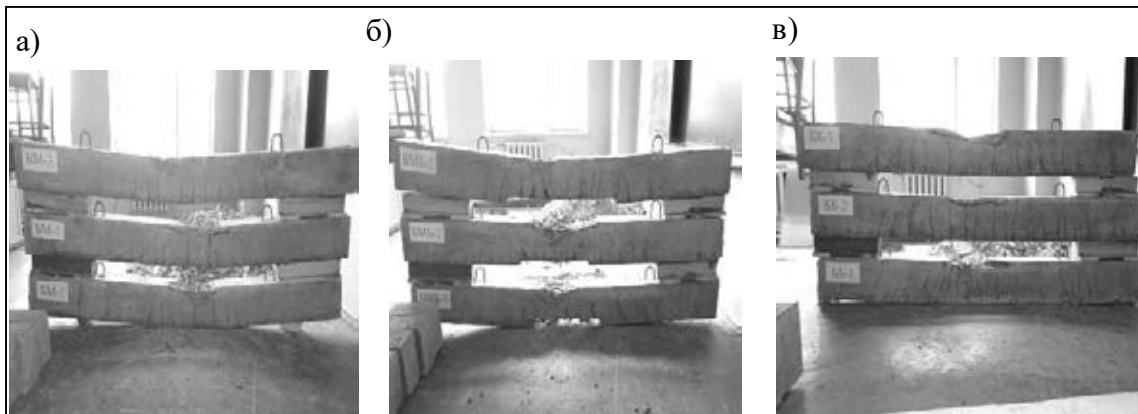


Рис. 5. Загальний вигляд зруйнованих зразків балок: а) серія БМ; б) серія БМБ; в) серія ББ.

Балки серій БМ, БМД показали типовий характер роботи та руйнування балок, армованих металевою арматурою. При навантаженні 0,3–0,4 від руйнівного починали утворюватися перші нормальні тріщини в бетоні в зоні чистого згину. Подальше збільшення навантаження призводило до утворення нових нормальних тріщин та збільшення ширини їх розкриття, наростання прогинів. При навантаженні 0,9 від руйнівного було зафіксовано початок текучості металевої арматури, що стало причиною швидкого збільшення ширини розкриття тріщин, значного збільшення прогинів і руйнування зразків зі зминанням бетону стиснутої зони. За момент руйнування балок було прийнято момент початку текучості металевої арматури.

Балки серій ББ, ББД внаслідок зниженого модуля пружності BFRP арматури виявилися більш деформативними, ніж балки серій БМ, БМД. Появу перших нормальних тріщин було зафіксовано на рівні навантаження 0,1–0,2 від руйнівного. Подальше збільшення навантаження призводило до появи нових нормальних тріщин, а у разі навантаження 0,5–0,6 від руйнівного почали з'являтися похилі тріщини. Характер розташування тріщин вирізнявся рівномірним розподілом за довжиною балки з кроком 100–150 мм. Ширина розкриття тріщин та прогини лінійно збільшувалися зі зростанням навантаження, що є типовим для конструкцій армованих композитною арматурою. Руйнування даних зразків відбувалося внаслідок роздроблення бетону стиснутої зони. Проквозування стержнів BFRP арматури зафіксовано не було.

Роботу під навантаженням балок серій БМБ, БМБД можна поділити на два етапи – до моменту початку текучості металевої арматури та після нього. Перші нормальні тріщини виникли на рівні навантаження 0,2–0,3 від руйнівного. До рівня навантажень 0,4–0,5 від руйнівного балки працю-

вали аналогічно балкам серій БМ, БМД. Останнє пояснюється домінуючим впливом металевої арматури. Подальше збільшення навантаження призводило до появи текучості арматури. На цьому етапі основний опір навантаженню чинить BFRP арматура. Характер роботи балки стає схожим на роботу балок серій ББ, ББД: збільшується кількість та ширина розкриття тріщин, зростають прогини.

Показники міцності дослідних балок за серіями наведено в таблиці 2.

Руйнування зразків відбувалося внаслідок зминання бетону стиснутої зони з одночасним повним або частковим розривом волокон BFRP арматури.

На рис. 4 наведено загальний вид зруйнованого зразка балки серії БМБ та показано частковий розрив розтягнутої BFRP арматури цього зразка.

Таблиця 2

Середні значення міцності дослідних балок

№ з/п	Серія балок	Руйнівне зусилля, F_{ui} , кН	Порівняне значення міцності, F_{ui}/F_u
1	БМ	70.22*	1
2	БМД	75.87*	1.08
3	ББ	100.88	1.43
4	ББД	101.17	1.44
5	БМБ	96.1 (45.13*)	1.38
6	БМБД	99.24 (49.7*)	1.41

Примітки:

1. F_u – руйнівне зусилля балок серії БМ;

2. * зусилля, яке відповідає початку текучості металевої арматури

Аналіз даних, наведених у таблиці 2, свідчить про те, що заміна металевої арматури на BFRP арматуру призвело до збільшення несучої здатності зразків балок у середньому на 44%. У балках серій БМБ, БМБД із гібридним армуванням частину BFRP

арматури було замінено на металеву, що не мало впливу на їх несучу здатність. Приріст міцності порівняно з балками серії БМ становив 38–41%. Це свідчить про відсутність застережень у застосуванні гібридного армування конструкцій, що згинаються, з огляду на показники несучої здатності.

Використання дрібного заповнювача ГЗК у процесі виготовлення бетону балок серій БМД, ББД, БМБД неістотно вплинуло на граничні показники міцності. Балки серій БМД, БМБД, ББД показали збільшення несучої здатності на 8%, 1% та 3% відповідно. Останнє пояснюється більшою шорсткістю поверхні зерен відходів ГЗК порівняно із кварцовим піском і свідчить про можливість ефективної заміни кварцового піску дешевшими відходами промисловості.

На рис. 5 наведено загальний вигляд зруйнованих зразків балок. При ретельному огляді можна помітити, що зразки серії БМ (рис. 5а) мають значні залишкові деформації, зразки серії БМБ (рис. 5б) – менші, а в зразках серії ББ вони відсутні (рис. 5в). Текучість металеві арматури призводить до виникнення значних залишкових деформацій конструкції, що робить їх неремонтопридатними. Завдяки пружній роботі BFRP арматури зразки серії ББ не мали залишкових деформацій навіть після руйнування бетону стиснутої зони. Ця властивість BFRP арматури може забезпечити більшу надійність конструкцій при дії понаднормованих навантажень (землетруси, аварії тощо) шляхом відновлення проектного

положення після припинення силових впливів навіть за значних ушкоджень. Останнє твердження потребує додаткового вивчення шляхом проведення відповідних експериментальних випробувань.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження бетонних балок із різними видами армування дають змогу зробити висновки:

– заміна металеві арматури на BFRP арматуру дала змогу збільшити несучу здатність зразків балок у середньому на 44%;

– використання гібридного армування дало змогу порівняно з армуванням BFRP арматурою покращити деформативні характеристики балок і не викликало зниження їх несучої здатності (приріст міцності становив 38–41%);

– пружна робота BFRP арматури призводить до відсутності залишкових деформацій конструкції після зняття навантаження, незважаючи на значні ушкодження та руйнування бетону;

– дрібні фракційовані відходи ГЗК є ефективною заміною кварцового піску під час виготовлення бетонної суміші.

Наведені результати можуть бути використані у процесі розробки програми додаткових експериментальних випробувань конструкцій, що працюють на згин, із гібридним армуванням металеві та BFRP арматурою для визначення оптимальних співвідношень різних видів арматури, а також у процесі розробки рекомендацій із проектування таких конструкцій.

Список літератури:

1. Wang M., Zhang Z., Li Y., Li M., Sun Z. Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and its Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008. № 27(4). PP. 393–407.
2. Pouya B. Experimental investigation of the mechanical and creep rupture properties of basalt fiber reinforced polymer (bfrp). PhD thesis, University of Akron, USA, 2011. 216 p.
3. Солдатченко О.С. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість згинальних конструкцій зі склопластикові та базальтопластикові арматури: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Київ, 2012. 196 с.
4. Ovitigala T. and Issa M. Flexural behavior of concrete beams reinforced with basalt fiber reinforcement polymer (BFRP) bars. Paper presented at the 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures. Guimarães, Portugal, 2013.
5. Pawłowski D., & Szumigala M. (). Flexural behaviour of full-scale basalt FRPRC beams—experimental and numerical studies. *Procedia Engineering*. 2015. № 108. PP. 518–525.
6. Kudyakov K.L., Plevkov V.S. and Nevskii A.V. Strength and deformability of concrete beams reinforced by non-metallic fiber and composite rebar. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2015. 71/1/012030 ((12)).
7. Suzan A.A., Mustafa Hilal., Hassan A. Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites. *HBRC Journal, Housing and Building National Research Center*. 2017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcej.2017.01.001>
8. Akiel M., El-Maaddawy T., El Refai A. Flexural tests of continuous concrete slabs reinforced with basalt fiber-reinforced polymer bars, *CSCE 2016 Resilient Infrastructure*. London, Ontario (June 1–4, 2016). PP. 1–7.

9. G. Naveen Kumar, Karthik Sundaravadivelu. Experimental Study On Flexural Behaviour Of Beams Reinforced With GFRP Rebars. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. #80. PP. 1–11.
10. Vivekanand S., Sumathi A. Static Behaviour of Concrete Beams Reinforced in Shear with GFRP Bars. International Journal of ChemTech Research. 2015. Vol. 8. No. 2. Pp. 635–642.
11. Mohamed E. Behaviour of continuous concrete slabs reinforced with frp bars. PhD thesis, University of Bradford, UK, 2013. 177 p.
12. Железобетонные конструкции из бетона на отходах горнорудной и металлургической промышленности / Стороженко Л.И., Шевченко Б.Н., Ильенко В.М. и др. Киев: Будівельник, 1982. 72 с.

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БАЛОК С СОВМЕСТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ БАЗАЛТОПЛАСТИКОВОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРОЙ

Приведены программа и результаты экспериментальных испытаний опытных образцов балок, армированных металлической арматурой, базальтопластиковой (BFRP) арматурой и с гибридным армированием – металлической и базальтопластиковой (BFRP) арматурой одновременно. Образцы балок изготавливались с использованием обычного бетона, с кварцевым песком в качестве мелкого заполнителя, и бетона, в котором кварцевый песок заменен мелкими фракционированными отходами горно-обогатительного комплекса (ГОК). Кратковременные испытания балок монотонным статическим нагрузками до разрушения позволили выяснить, что прочность балок, армированных базальтопластиковой (BFRP) арматурой, выросла на 37–44% по сравнению с балками, армированными металлической арматурой. Уменьшение содержания BFRP арматуры при гибридном армировании не повлияло на снижение показателей прочности и прирост прочности по сравнению с балками, армированными металлической арматурой, составил 38–41%. В балках, армированных BFRP арматурой, за счет отсутствия пластических деформаций в данной арматуре отсутствовали остаточные деформации после прекращения действия нагрузки, несмотря на значительные повреждения и разрушения бетона. Образцы балок, изготовленных из бетона на мелких фракционированных отходах ГОК, показали на 1–8% больше показателей прочности по сравнению с аналогичными балками, изготовленными на бетоне с кварцевым песком в качестве мелкого заполнителя.

Ключевые слова: смешанное армирование, гибридное армирование, базальтопластиковая арматура, прочность, балка, мелкие отходы ГОК, деформативность.

BEARING ABILITY OF BEAMS WITH COMBINED REINFORCEMENT USING BASALT FIBER REINFORCED POLYMER AND METAL ARMATURE

The article presents the program and the results of experimental tests of beam samples with metal, basalt fiber reinforced polymer (BFRP) and hybrid (metal and BFRP) reinforcement. The samples were made of standard concrete with quartz sand as the fine aggregate and concrete with fine fraction wastes of a mining and beneficiation complex (MBC) used instead of the sand. Short-run tests of the beams under monotonous static loading until destruction enabled the conclusion that durability of the BFRP reinforced beams increased by 37–44% as compared to the metal reinforced beams. When hybrid reinforcing, reduction of the (BFRP) content did not produce an effect on decrease of durability indices; durability gains compared to the beams reinforced by metal made 38–41%. In the BFRP reinforced beams, due to the absence of plastic deformations in this reinforcement, there were no residual deformations after cessation of loading despite significant damage and deterioration of the concrete. Samples of beams made of concrete on fine fraction wastes of MBC, showed 1–8% higher strengths in comparison with similar beams made of concrete with quartz sand as the fine aggregate.

Key words: combined reinforcement, hybrid reinforcement, basalt fiber reinforced polymer, strength, beam, fine fraction wastes of a mining and beneficiation complex (MBC), deformation.