

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.012.454

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-2/29>

Валовой О.І.

Криворізький національний університет

Єрмоєнко О.Ю.

Криворізький національний університет

Валовой М.О.

Криворізький національний університет

Волков С.О.

Криворізький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ БАЛОК ЗІ ЗМІШАНИМ АРМУВАННЯМ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЮ ТА МЕТАЛЕВОЮ АРМАТУРОЮ

Одним зі шляхів подолання надмірної деформативності конструкцій армованих композитною арматурою є використання змішаного армування, коли разом з композитною робочою арматурою використовують металеву. Роботи по дослідженню напружено-деформованого стану згинних елементів зі змішаним армуванням композитною та металевою арматурою проводяться, переважно, за кордоном і носять обмежений характер.

Експериментальні випробування мали на меті встановити ефективність використання змішаного армування базальтопластиковою та металевою арматурою одночасно.

Було виготовлено та випробувано шість серій зразків дослідних балок по три балки в кожній. Зразки за серіями мали наступний поділ: балки армовані металевою арматурою (контрольна серія), балки армовані базальтопластиковою арматурою, балки зі змішаним армуванням базальтопластиковою та металевою арматурою. Інші три серії балок відрізнялися від попередніх типом дрібного заповнювача в бетоні. Річний пісок було замінено дрібними фракціонованими відходами гірничо-металургійного комплексу.

Короточасні випробування балок проводилися на універсальному гідравлічному пресі за схемою однопрольотної вільнолежачої балки, навантаженої двома зосередженими силами у третинах прольоту.

За результатами випробувань встановлено, що зразки армовані базальтопластиковою арматурою та зі змішаним армуванням показали приріст міцності, в середньому на 40% порівняно з балками, армованими металевою арматурою.

Прогини балок армованих базальтопластиковою арматурою, прогнозовано, виявилися в 4 рази більшими, ніж балок контрольної серії за експлуатаційного рівня навантажень. Сумісне армування дозволило знизити прогини, в середньому, вдвічі порівняно з балками армованими базальтопластиковою арматурою. При рівні навантажень 70% від руйнівного їх прогини зразків з сумісним армуванням перевищували гранично-допустимі за нормами на 40-60%, а при рівні навантажень 60% від руйнівного не перевищували нормативних.

Заміна річного піску фракціонованими відходами гірничо-збагачувального комплексу істотно не вплинула на характеристики зразків балок. Різниця в показниках не перевищувала 6%.

Ключові слова: базальтопластикові арматура, змішане армування, міцність, жорсткість, прогини, балка, бетон, залізобетон, фракціоновані відходи.

Постановка проблеми. Одним із розповсюджених дефектів залізобетонних конструкцій є корозія арматури. Зважаючи на специфіку залізобетонних конструкцій роботи по усуненню дефекту є дуже трудомісткими, тривалими в часі, і, досить часто, не ефективними [1].

Заміна металевої арматури на композитну (FRP) арматуру є одним з шляхів подолання передчасного виходу з ладу армованих бетонних конструкцій внаслідок корозії металевої арматури. Порівняно новим матеріалом на ринку FRP арматури є базальтопластикові арматура (BFRP).

Чисельними дослідженнями встановлено, що BFRP арматура має високу корозійну та хімічну стійкість, високу міцність на розтяг та ряд властивостей, які вигідно її вирізняють порівняно з металевою арматурою [2–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із недоліків BFRP арматури є в 3-4 рази менший модуль пружності на розтяг, ніж у металевої арматури. Існуючи експериментальні відомості роботи елементів, що згинаються, армованих BFRP арматурою вказують на те, що їх прогини перевищують прогини аналогічних зразків балок армованих металевою арматурою на 30-110% [5–8], а ширина розкриття тріщин більшою на 40-90% за експлуатаційного рівня навантажень [9, 10]. Такі показники деформативності характерні всім композитним видам арматури за виключенням вуглецевої (CFRP).

Наразі існує декілька підходів до вирішення питання надмірної деформативності бетонних конструкцій армованих BFRP арматурою. Одним з них є використання гібридного армування, коли розтягнуту зону конструкцій армують металевою та BFRP арматурою одночасно. Такий підхід потенційно дозволить використати високу міцність BFRP арматури забезпечивши прийнятний рівень деформацій за рахунок високого модуля пружності металевої арматури.

На теперішній час існує дуже обмежена кількість експериментальних відомостей стосовно напружено-деформованого стану конструкцій армованих BFRP та металевою арматурою одночасно. Зважаючи на це, встановлення особливостей роботи конструкцій з гібридним армуванням BFRP та металевою арматурою є актуальним питанням.

Постановка завдання. Визначення особливостей напружено-деформованого стану згинних конструкцій зі змішаним армуванням є актуальним питанням сьогодення, вирішення якого дозволить розширити область використання композитної арматури в будівництві. Для розв'язання цього питання було випробувано експериментальні зразки дослідних балок зі змішаним армуванням базальтопластиковою та металевою арматурою.

Виклад основного матеріалу. Для визначення показників деформативності згинних конструкцій з гібридним армуванням BFRP і металевою арматурою одночасно було виготовлено шість серій дослідних зразків балок. Кожна серія включала три зразка балок. Зразки за серіями мали наступний поділ: балки армовані металевою арматурою ВМ (контрольна серія), балки армовані базальтопластиковою арматурою ВВ, балки зі змішаним

армування базальтопластиковою та металевою арматурою ВМВ. Інші три серії балок відрізнялися від попередніх типом дрібного заповнювача в бетоні. Річний пісок було замінено дрібними фракціонованими відходами гірничо-металургійного комплексу. Маркування балок прийнято таким же, як і для попередніх серій з додаванням в кінці букви – D.

Накопичений досвід використання відходів МВС у будівництві та чисельні дослідження [11] вказують на ефективність їх використання в якості дрібного заповнювача при виготовленні бетонної суміші для залізобетонних конструкцій, складника асфальтобетонних сумішей, в якості баластного матеріалу при влаштуванні підгрунтя під дороги. В той же час відсутні відомості про особливості роботи конструкцій, виготовлених із бетону на дрібних відходах МВС, армованих BFRP арматурою.

Армування балок виконували за допомогою металевої арматури класів А400С, А240, а також BFRP арматуру виробництва ТОВ «Технобазальт-Інвест».

Більш ґрунтовну інформацію про армування, тип арматури, склад та клас бетону наведено в [12].

Виготовлення дослідних зразків балок відбувалося на заводі з виробництва залізобетонних конструкцій та виробів. Формування балок відбувалося в металевій опалубці. Забезпечення рівномірного розподілу бетонної суміші за обсягом форми опалубки досягалося за рахунок її ущільнення на вібростолі. Після витримки зразків в опалубці протягом 28 діб проводилася їх розпалубка.

Дослідні зразки балок було випробувано в лабораторії будівельного факультету ДВНЗ «Криворізький національний університет». Випробування балок проводилося за схемою вільнолежачої балки (рис. 1). Навантаження прикладалося в третинах прольоту, ступенями по 10% від руйнівного навантаження, за допомогою гідравлічного преса П-125.

Зразки, армовані BFRP арматурою (ВВ, ВВД), показали в середньому за серіями на 44% більші показники міцності, порівняно з балками, армованими металевою арматурою. Визначальним фактором міцності цих балок була міцність бетону стиснутої зони. Його зминання було причиною вичерпання несучої здатності балок цих серій.

Вид арматури, який був використаний для армування розтягнутої зони балок, мав істотний вплив, як на показники міцності, так і на прогини дослідних зразків.

Показники міцності зразків з гібридним армуванням (ВМВ, ВМВD) були схожими з показниками балок армованих BFRP арматурою. Приріст міцності порівняно з балками контрольної серії, в середньому за серіями, склав 38% та 41%. При навантаженні 50%-60% від руйнівного напруження в металевій арматурі досягали напружень текучості. Надалі зростаюче навантаження сприймала тільки BFRP арматура. Вичерпання несучої здатності відбувалося шляхом зминання бетону стиснутої зони з одночасним повним або частковим розривом волокон BFRP арматури (рис. 2).

Детальний опис стадій роботи дослідних зразків балок під навантаженням наведено в [12].

Крім різної величини несучої здатності та характеру руйнування балок за серіями відрізнялися показники їх деформативності.

Балки армовані металевою арматурою (ВМ, ВМD) показували традиційний для залізобетонних елементів характер зміни прогинів зі зростанням навантажень. Ріст навантажень викли-

кав лінійну залежність між прогинами і діючим навантаженням (рис. 3).

Збільшення нахилу кривої $F-f$ в напрямку горизонтальної осі спостерігався в момент утворення першої тріщини та за рівня навантажень, який відповідає початку текучості металевої арматури.

Суттєвих відмінностей в деформативності балок серій ВМ та ВМD помічено не було. Різниця між прогинами для цих серій балок визначеними при рівні навантажень 70% від руйнівного складає 6% (табл. 1).

Балки серій ВВ, ВВD за рахунок низького модуля пружності BFRP арматури, мали підвищену деформативність. Лише до появи першої тріщини їх прогини були співставними з прогинами балок контрольної серії. Утворення тріщини, після першої ступені навантаження, призвело до перелому кривої $F-f$ значного її нахилу в напрямку горизонтальної осі (рис. 3). Вважається, що після утворення тріщин ефективний переріз балки зменшується, що разом з низьким модулем пружності даного виду арматури, призводить до

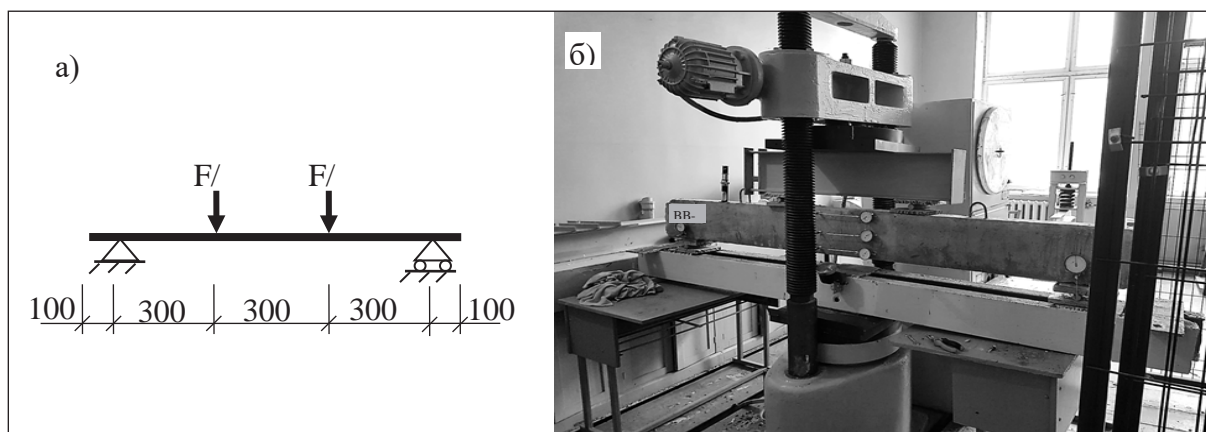


Рис. 1. а) Принципова схема випробування дослідних балок; б) Загальний вигляд стенда для випробувань з дослідною балкою

Таблиця 1

Прогини дослідних зразків балок

Серія балок	Зусилля, кН		Середні дослідні прогини f , мм	$\frac{f_i}{f_0}$	Допустимі прогини за нормами [13], $[f]$, мм	$\frac{f_i}{[f_0]}$
	Руйнівне, F_u	Визначення прогину, F_i				
ВМ	70.22*	49.2	7.8	1	14.5	0.54
ВМD	75.87*	53.1	8.3	1.06	14.5	0.57
ВВ	100.88	70.6	32.4	4.15	14.5	2.24
ВВD	101.17	70.8	33.6	4.31	14.5	2.32
ВМВ	96.1	67.3	23.8	3.05	14.5	1.64
ВМВD	99.24	69.5	20.7	2.65	14.5	1.43

Примітки: f_0 – прогин балок серії ВМ (контрольна серія); * - зусилля, яке відповідає початку текучості металевої арматури

різкого зростання прогинів. Подальше зростання навантаження викликає лінійне зростання прогинів до самого руйнування (рис. 3), що пояснюється пружною роботою BFRP арматури.

Такий характер поведінки балок є типовим для згинних конструкцій, армованих BFRP арматурою, був описаний у дослідженнях інших авторів. За експлуатаційного рівня навантажень (70% від руйнівного) прогини балок серії BB були в 4.15, а балок серії BBD в 4.31 рази більше ніж балок контрольної серії (BM) (табл. 1). Тобто приріст прогинів склав 315%-331%, що корелює з різни-

цею в модулях пружності BFRP та металевої арматури. Порівняння між собою прогинів балок серій BB та BBD вказує на те, що заміна річкового піску на дрібні відходи МВС, при виготовленні бетонної суміші, суттєво не вплинуло на їх деформативність. Різниця в показниках не перевищує 4%, що знаходиться в межах статистичної похибки.

На прогини балок із гібридним армуванням (BMB, BMBD) суттєвий вплив мали фізико-механічні властивості обох видів арматури. За рахунок високого модуля пружності металева арматура на перших етапах навантаження мала переважаючий

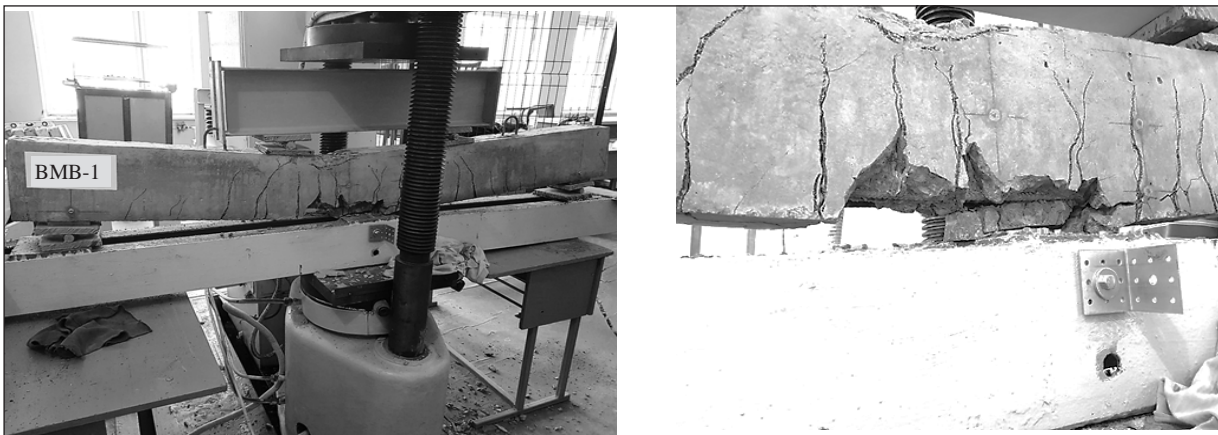


Рис. 2. Зруйнований зразок балки BMB-1

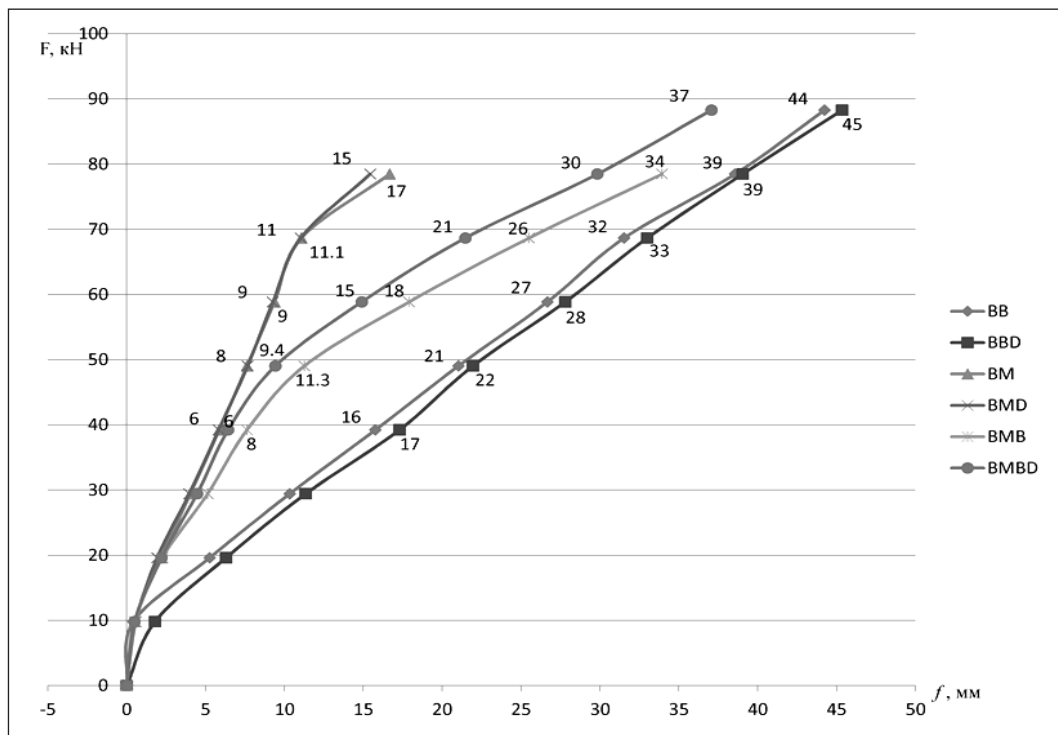


Рис. 3. Залежність усереднених величин прогинів балок за серіями від зміни величини навантаження

вплив на показники деформативності балок під навантаженням. На рис. 3 цей етап роботи виражається лінійною залежністю між прогинами та навантаженням, а величини прогинів близькі до показників балок армованих металевою арматурою (ВМ). Такий етап роботи продовжується до рівня навантажень $\approx 50\%$ від руйнівного, коли напруження в металевій арматурі досягають межі текучості. Цей момент відмічено на графіку кривої $F-f$ точкою перелому і зміною лінійної залежності на криволінійну (рис. 3). Подальший опір зростаючому навантаженню чинить, переважно, BFRP арматура.

На графіку кривої $F-f$ кут її нахилу стає таким же, як і в балках серій ВВ, ВВД (рис. 3), але за абсолютними величинами прогини залишаються меншими. Такий характер роботи спостерігається до руйнування зразків. Прогини, які відповідають експлуатаційному рівню навантажень, були в 3.05 (ВВ) та 2.65 (ВВД) рази більшим, ніж для балок контрольної серії, що склало 205% та 165% відповідно (табл. 1). Тобто, використання змішаного армування дозволило на 65%-100% зменшити прогини зразків балок порівняно з балками серій ВВ, ВВД.

Було виконано порівняння отриманих величин прогинів дослідних зразків балок при рівні навантажень 70% від руйнівного з гранично допустимими за нормами [13]. Було з'ясовано, що тільки прогини балок серій ВМ, ВМД не перевищують гранично допустимих (табл. 1). Балки серій ВВ, ВВД мають прогини на 124% та 132% більші, ніж гранично допустимі. Зразки з гібридним армуванням мали менші перевищення величин прогинів над нормативними, а саме: 64% для балок серії ВМВ; 43% для балок серії ВМВД (табл. 1). При цьому порівняння прогинів на більш ранніх етапах навантаження вказує на те, що при рівні навантажень 60% від руйнівного прогини балок серій ВМВ, ВМВД не перевищують гранично допустимих за нормами. Зважаючи на те, що від-

соток вмісту металевої та BFRP арматури в балках цих серій є однаковим, незначне підвищення відсотку вмісту металевої арматури дозволить зменшити величини прогини до нормативних вимог. Останнє припущення потребує додаткового експериментального обґрунтування.

Висновки. Наведені раніше відомості дозволяють зробити наступні висновки:

– заміна металевої арматури на BFRP арматуру дозволило, в середньому, на 40% підвищити несучу здатність балок неармованих;

– прогини зразків балок серій ВВ, ВВД на 315%, 331% більші ніж балок контрольної серії (ВМ) та на 205%, 165% більші ніж гранично допустимі за нормами;

– прогини зразків балок з гібридним армуванням (ВМВ, ВМВД) на 65%, 100% більші ніж прогини балок серії ВМ (контрольна серія) та на 64%, 43% більші ніж допустимі за нормами (за рівня навантажень 70% від руйнівного);

– використання змішаного армування дозволяє вдвічі зменшити прогини зразків балок порівняно з балками, армованими тільки BFRP арматурою (ВВ, ВВД);

– за рівня навантажень $\approx 60\%$ від руйнівного прогини балок з гібридним армуванням (ВМВ, ВМВД) не перевищують гранично допустимих за нормами;

– використання дрібних відходів МВС в якості заміни річного піску при виготовленні бетонної суміші не впливає на міцність та деформативність балок; різниця величин за певними показниками знаходиться в межах статистичної похибки.

Перспективним напрямом подальших експериментальних досліджень може бути визначення оптимального співвідношення металевої та базальтової арматури з метою задоволення нормативних вимог за граничною величиною прогинів конструкцій із гібридним армуванням металевою та BFRP арматурою, одночасно.

Список літератури:

1. Huang RY, Mao I, Lee HK. Exploring the deterioration factors of RC bridge decks: a rough set approach. *Comput Aid Civ Infrastruct Eng* 2010;25(7):517–29.
2. El Refai A. Durability and fatigue of basalt fiber-reinforced polymer bars gripped with steel wedge anchors. *J Compos Constr* 2013;17(6):04013006.
3. Sim J Park C. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Compos B Eng* 2005; 36(6): 504–12.
4. Fiore V., Scalici, T., Di Bella, G. Valenza, A. (2015) 'A Review on BFRP Fibre and its Composites', *Composites Part B*, 74, pp. 74–94.
5. Pawłowski D., & Szumigala, M. (2015). Flexural behaviour of full-scale basalt FRPRC beams—experimental and numerical studies. *Procedia Engineering*, 108, 518–525.
6. Gohnert M., Van Gool, R. & Benjamin, M. (2014) 'BFRP reinforced in concrete beams in flexure', *The Structural Engineer*, pp. 38–43.

7. Shafiq N., Ayub, T., & Khan, S.U. (2016) Investigating the Performance of PVA and BFRP Fibre Reinforced Beams Subjected to Flexural Action. *Composite Structures*, 153, pp. 30–41.
8. G.N. Yang, B.R. Huo, M.X. Zheng, “Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with BFRP Bars”, International Conference on Power Electronics and Energy Engineering (PEEE 2015), Hong Kong, China, April 19-20, 2015.
9. Mohamed E., “Behaviour of continuous concrete slabs reinforced with frp bars”, PhD thesis, University of Bradford, UK, 2013, 177 pp.
10. Pouya B., “Experimental investigation of the mechanical and creep rupture properties of basalt fiber reinforced polymer (bfrp)”, PhD thesis, University of Akron, the USA, 2011, 216 pp.
11. 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.
12. Valovoi A., Koval P., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S., “Durability of beams with hybrid reinforcement from metal and basalt fiber reinforced polymer (BFRP) armature”, MATEC Web of Conferences **230**, 02035 (2018) (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002035>).
13. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги до проектування. Київ, 2006. 14 с.

Valovoi O.I., Eremenko O.Yu., Valovoi M.O., Volkov S.O.

DETERMINATION OF DEFORMATIONS OF BEAMS WITH COMBINED REINFORCEMENT USING BASALT FIBRE PLASTIC AND METAL ARMATURE

One of the basic ways to overcome the excessive deformability of constructions reinforced with combined armature is using the combined reinforcement when along with work armature metal one is used. Research in stress-strained mode of bending elements with combined reinforcement using composite and metal armature take place mostly abroad and they are limited.

Experimental studies in the field of efficiency when basalt fibre plastic (BFP) and metal armature is used at the same time.

6 series of testing beams were made. There were 3 beams in each series. Beams series were: beams with metal armature (control series), beams with BFP, beams with combined armature: BFP and metal armature. The three series of beams differed from the previous type in fine concrete aggregate. River sand was replaced by fine fractionated wastes of mining and metallurgical complex.

Short term tests were carried out with a hydraulic press according to the scheme of the free single-span beam loaded with two concentrated forces on the thirds of the span. According to the test results, it was estimated that the samples reinforced with BFP and the samples reinforced with combined armature showed about 40 % durability increase in comparison with the beams reinforced with the metal armature.

Combined reinforcement allowed decreasing the bendings twice in comparison with the beams reinforced with BFP. When loaded 70% from the destruction load, the bendings with the combined reinforcement exceed 40...60% the critical loading. When loaded 60% from the destruction load, the bendings didn't exceed the standards.

Bendings of beams reinforced with BFP were 4 times larger in comparison with the beams of the control series according exploitation load level. Combined reinforcement allowed decreasing the bendings twice in comparison with beams reinforced with BFP. When loaded 70% from the destruction load, the bendings of samples with the combined reinforcement exceed 40-60% the critical load. When loaded 60 % from the destruction load, the bendings didn't exceed the standards.

Substitution of river sand with fractionated wastes of mineral beneficiary complexes didn't react upon characteristics of beam samples. The difference in parameters didn't exceed 6%.

Key words: BFP, combined reinforcement, durability, rigidity, bendings, beam, concrete, ferro-concrete, fractionated wastes.