

UDC 624.072; 624.078; 624.15

doi:10.31650/2707-3068-2021-25-37-47

СУМІСНА РОБОТА СТАЛЕВОЇ І БАЗАЛЬТОВОЇ ПЛАСТИКОВОЇ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ У СКЛАДІ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

¹Карпюк І.А., к.т.н., доцент,
irina.carpuyuk@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3437-5882

¹Клименко Е.В., д.т.н., професор,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹Карпюк В.М., д.т.н., професор,
v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹Целикова А.С., к.т.н., асистент,
tselikovaa93@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1394-3986

¹Худобич А.О., аспірант,
khudobycha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5336-599X

¹Глібоцький Р.В., аспірант
romich.gl@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8730-5952

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
str. Didrichson, 4, Odessa, 65029, Ukraine

Анотація. Представлені експериментальні дані міцності, прогинів та утворення тріщин у бетонних балках зі сталевую і базальтопластиковою (BFRP) арматурою з розмірами 2000x200x100мм за дії статичного і малоциклового повторного навантаження. Результати досліджень основних параметрів працездатності дослідних елементів подані у вигляді відповідних експериментально-статистичних залежностей за дії експлуатаційного і руйнівного навантажень при однакових конструктивних чинниках. За допомогою стохастичного та графічного аналізу оцінений вплив виду арматури і конструктивних факторів на міцнісні та деформативні характеристики, а також на тріщиностійкість експериментальних зразків – балок.

Ключові слова: сталева і базальтопластиковою (BFRP) арматура, міцність, деформативність та тріщиностійкість балок, статичне і малоциклове навантаження.

Вступ. Генеральною Асамблеєю ООН у 2000 році були прийняті цілі розвитку тисячоліття (ЦРТ) до 2015 року. Оскільки країни, які прийняли Програму ЦРТ, визнали її безперечний успіх та необхідність прийняття нового порядку денного, на початку серпня 2015 року 193 країн – члени ООН досягли консенсусу по підсумковому документу «Перетворення нашого світу: Порядок денний в галузі сталого розвитку на період до 2030 року», який був затверджений на Саміті ООН 25 вересня 2015 року з остаточним формулюванням 17 глобальних цілей (ЦСР). Серед них, №12 – забезпечення раціональних моделей споживання та виробництва (стосовно будівельних конструкцій – розробка нових і удосконалення існуючих методів та розрахункових моделей з метою зменшення і оптимізації їхніх розмірів); №13 – прийняття термінових заходів по боротьбі зі змінами клімату і його наслідками (стосовно будівельних конструкцій – наскільки можливо, зменшити шкідливі викиди парникових газів, в т.ч. вуглекислого газу CO₂, за рахунок заміни сталеві арматури на неметалеву композитну і зменшення витрат цементу на їх виробництво).

Концепція сталого розвитку світової спільноти появилася в процесі об'єднання трьох основних точок зору: економічної, соціальної та екологічної. Вона передбачає прийняття заходів, направлених на оптимальне використання обмежених ресурсів та застосування екологічних природо-, енерго- і матеріалозберігаючих технологій на забезпечення стабільності соціальних і культурних систем, а також цілісності біологічних і фізичних природних систем.

Країни Європейського Союзу в грудні 2019 року в Брюсселі визначили 6 пріоритетів сталого розвитку (Європейську зелену угоду). В Європейському законі про клімат закріплена ціль досягнення кліматичної нейтральності території до 2050 року, а до 2030 року - зменшити шкідливі викиди, як мінімум, на 50%. При цьому, у 2016 році була прийнята Паризька угода про зниження викидів вуглекислого газу CO₂ на одиницю валового внутрішнього продукту, а також перестати виробляти вуглецеву сталь до 2030 року.

Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є збільшення використання базальтового волокна і арматури (BFRP) на його основі у будівництві, інфраструктурі, фундаментабудуванні, яке зумовлене її екологічними властивостями, високими механічними властивостями. BFRP має унікальні технічні характеристики: вона майже у 3 рази міцніша за сталеву арматуру і в 7-9 разів легша при рівномірній заміні. Вона має високу корозійну стійкість, гарні діелектричні та діаманітні властивості. Вона до 30% є дешевшою від сталеві арматури при рівномірній заміні, а її виробництво у порівнянні зі сталеві є менш шкідливим, особливо в частині видів вуглекислого газу CO₂.

Викладене вище підкреслює актуальність даної роботи.

Аналіз літературних даних. Виділення нерозв'язних раніше частин загальної проблеми.

У чинних Нормах і Рекомендаціях по проектуванню конструкцій неметалевою композитною арматурою (FRP), розроблених у США [1], Канаді [2], Японії [3], Великобританії [4], Італії [5] протягом останніх 24 років, використані основні принципи і методи розрахунку та проектування бетонних конструкцій зі сталеві арматурою. У вітчизняній Настанові [6] і додатку Л до російських СП [7], якій вважаються проектами майбутніх Норм, збережений такий же підхід з урахуванням лінійного деформування FRP.

Особливості деформування, тріщиноутворення і руйнування бетонних конструкцій з FRP в указаних нормах пропонується урахувати шляхи введення уточнюючих понижуючих коефіцієнтів умов роботи і нормуванням технічних характеристик матеріалів. Конструктивні вимоги до таких конструкцій є також дещо заниженими у порівнянні з бетонними конструкціями зі сталеві арматурою.

При цьому, більш унормованими являються питання зі скло-, органо- та вуглепластикові арматурою. Унормування застосування BFRP у будівництві тільки розпочинається.

Аналіз результатів експериментальних досліджень хімічної стійкості, фізико-механічних властивостей, використання на практиці композитної арматури доказує очевидну доцільність застосування BFRP у різних сферах будівництва за агресивної дії оточуючого середовища, а також на воєнних і медичних об'єктах спеціального призначення з особливими вимогами.

Порівняння результатів експериментальних досліджень з розрахунковими даними міцності бетонних конструкцій, армованих BFRP, обчислених згідно рекомендацій вітчизняних і зарубіжних Норм [1-7] та авторських пропозицій, показало надто велику їх розбіжність [8]. Характерною рисою абсолютної більшості наявних публікацій [10-24] по даному питанню є висвітлення напружено-деформованого стану та розрахунок за I та II групами граничних станів саме нормальних перерізів бетонних конструкцій з FRP. Вивченню та розрахунку міцності їхніх похилих перерізів присвячені тільки деякі з них [1-7, 9, 10, 18,20].

Мета статті – експериментальне вивчення основних параметрів працездатності бетонних зразків балок з базальтопластикові арматурою та створення об'єктивної бази даних для вдосконалення існуючих і розробки нових методів розрахунку несучої здатності їхніх приопорних і прольотних ділянок за обома групами граничних станів при статичному і малоцикловому вантаженнях.

Завдання досліджень:

- експериментально дослідити деформативність, тріщиностійкість та міцність бетонних балок з BFRP при статичному і малоцикловому їх навантаженні за теорією планування;
- отримати експериментально-статистичні залежності основних параметрів працездатності вказаних елементів від дослідних конструктивних чинників та фактору навантаження;
- виконати порівняльний аналіз несучої здатності бетонних балок, армованих BFRP і сталеву арматурою, та оцінити вплив на неї як виду армування, так основних конструктивних чинників та фактору навантаження.

Методика проведення експериментів

Для виконання поставлених завдань досліджень були реалізовані чотири серії натурних експериментів. У першій серії, АСД (К.Албу-Ю.Сьоміна- Д.Даниленко), випробовували залізобетонні балки на ступенево зростаюче статичне навантаження. У другій, С (Ю. Сьоміна), серії досліджували залізобетонні балки на дію мало циклового повторного навантаження і втомне руйнування. У третій, Ц (Целікова), серії проводили експерименти з бетонними балками, армованими BFRP, на дію статичного навантаження, а в четвертій, Х (А. Худобич), серії аналогічні базальтобетонні балки випробували на мало циклове повторне навантаження і втомне руйнування.

Системність комплексного підходу в проведених експериментах заключалася в тому, що всі дослідні зразки – балки мали однакові розміри, класи бетонів та подібне армування. Вони були виготовлені за одним і тим же планом Бокса В3. Дослідні фактори (конструктивні чинники) варіювались на трьох рівнях: X_1 – величина відносної віддалі від попри до зосередженої сили (прольоту зрізу), $a/h_0=1, 2, 3$ де $h_0=d=175$ мм; X_2 – класу бетону, С, МПа, С16/20, С30/35, С40/50; X_3 - коефіцієнта поперечного армування, $\rho_{fv}(AKB-800)=0,0029; 0,0065; 0,0115$ для бетонних балок з BFRP та $\rho_{sw}(BpI)=0,0016; 0,0027; 0,0044$ для залізобетонних елементів. Верхнє і нижнє поздовжнє армування є однаковим при $\rho_{lf}=\rho_{ls}=0,0176$ в балках з BFRP і сталеву арматурою. Розрахунковий проліт балок дорівнював $L_0=9h_0=1575$ мм, а їхня ширина $b=100$ мм.

Кожен натурний експеримент по серіях був продубльований аналогічним зразком - балкою. Експериментальні зразки-балки були армовані двома плоскими каркасами. Вони були виготовлені з важкого бетону на гранітному щебені фракції 5-10мм і кварцовому піску з модулем крупності 1,5. В'яжуче – портландцемент марки 500 без добавок. За допомогою комплексної добавки Релаксол-Супер М (1% від ваги цементу) полегшували легкоукладність бетонної суміші та прискорювали терміни набору міцності бетону.

Видалення основного матеріалу і результати

Характер деформацій, утворення тріщин та руйнування експериментальних бетонних балок з BFRP і сталеву арматурою відповідав правилам будівельної механіки і його можна було передбачити. Спочатку утворювалися нормальні тріщини в зоні чистого згину. Далі вони розвивалися по висоті балок і розширювалися, появлялися нові тріщини у цій зоні, а також похилі – на приопорних ділянках. З ростом навантаження нормальні і похилі тріщини розвивалися. При цьому, похилі, тріщини досягали більшої ширини і руйнування балок відбувалося саме на приопорних ділянках по цих тріщинах.

Отримані експериментальні дані були відповідним чином опрацьовані за комп'ютерною програмою COMPEX, вилучені незначимі та перераховані ті коефіцієнти, що залишилися і, як наслідок, виведені адекватні експериментально-статистичні залежності міцності, тріщиностійкості та деформативності дослідних елементів по серіях.

Міцність (несуча здатність) дослідних елементів.

Може бути охарактеризована наступними залежностями та рис. 1:

$$\hat{Y}(V_{us}) = 98 - 41x_1 + 12x_2 + 6x_3 + 16x_1^2 - 7x_2^2 - 5x_3^2 - 7x_1x_2, \text{ кН}, U = 5,1\%; \quad (1)$$

$$\hat{Y}(V_{us}^{cyc}) = 90 - 36x_1 + 10x_2 + 7x_3 + 18x_1^2 - 6x_2^2 - 6x_3^2 - 8x_1x_2, \text{ кН}, U = 5,1\%; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(V_{uf1}) = 51,8 - 30,1x_1 + 11,8x_2 + 5,5x_3 + 15,9x_1^2 - 5,5x_2^2 - 2,3x_3^2 - 10,6x_1x_2 - 4,8x_1x_3, \text{ кН}, \bar{U} = 5,0\%; \quad (3)$$

$$\hat{Y}(V_{uf2}^{cyc}) = 44,3 - 27,0x_1 + 10,4x_2 + 4,5x_3 + 17,3x_1^2 - 4,0x_2^2 - 2,4x_3^2 - 10,2x_1x_2 - 2,9x_1x_3, \text{ кН}, \bar{U} = 5,5\%; \quad (4)$$

де V_{us} , V_{us}^{cyc} – руйнуюча поперечна сила, відповідно, при статичному і малоцикловому повторному навантаженні залізобетонних балок за [22];

V_{uf1} , V_{uf2}^{cyc} – руйнуюча поперечна сила, відповідно, при статичному і малоцикловому повторному навантаженні бетонних балок, армованих BFRP, при тих же значеннях конструктивних чинників.

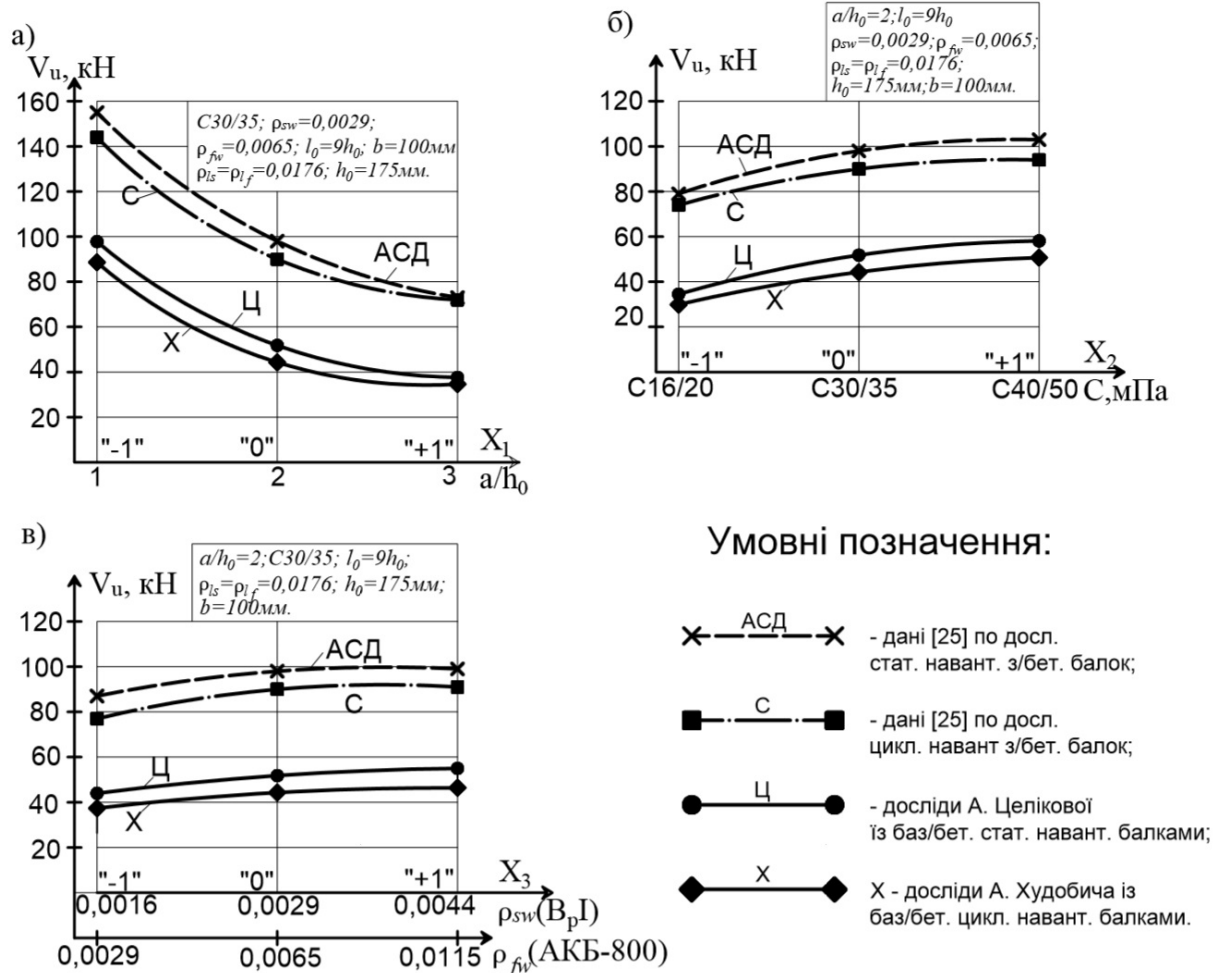


Рис. 1. Вплив відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в) на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів.

Прогини експериментальних зразків при експлуатаційному ($\eta = 0.65F_u$) рівні навантаження.

Можуть бути представлені наступними експериментально-статистичними залежностями

$$\hat{Y}(f_{s,\eta F_u}) = 4,5 + 0,8x_1 + 0,35x_2 + 0,25x_3 - 0,35x_1^2 - 0,15x_2^2 + 0,30x_1x_3, \text{ мм}, \bar{U} = 6,0\%, \quad (5)$$

$$\hat{Y}(f_{s,\eta F_u}^{cyc}) = 5,00 + 0,85x_1 + 0,40x_2 + 0,25x_3 - 0,40x_1^2 - 0,15x_2^2 + 0,30x_1x_2, \text{ мм}, \bar{U} = 6,4\%, \quad (6)$$

$$\hat{Y}(f_{f1,2,\eta F_u}^{cyc}) = 10,20 + 0,91x_1 + 1,04x_2 + 0,73x_3 - 0,74x_1^2, \text{ мм}, \bar{U} = 5,3\%, \quad (7)$$

із яких видно, що прогини бетонних балок, армованих BFRP, більше, ніж у 2 рази перевищують прогини аналогічних залізобетонних елементів з такими ж конструктивними чинниками і досягають, в середньому, 1/154 від розрахункової довжини прольоту.

Оскільки руйнівне поперечне навантаження при малоцикловому повторному навантаженні зменшується порівняно зі статичним, приблизно, на 14%, а деформативність стиснутого бетону збільшується на таку ж величину, то, як виявилось, вплив малоциклового навантаження на цьому рівні не відобразився на прогинах.

Графічне відображення прогинів базальтобетонних і залізобетонних балок при експлуатаційному навантаженні представлена на рис. 2.

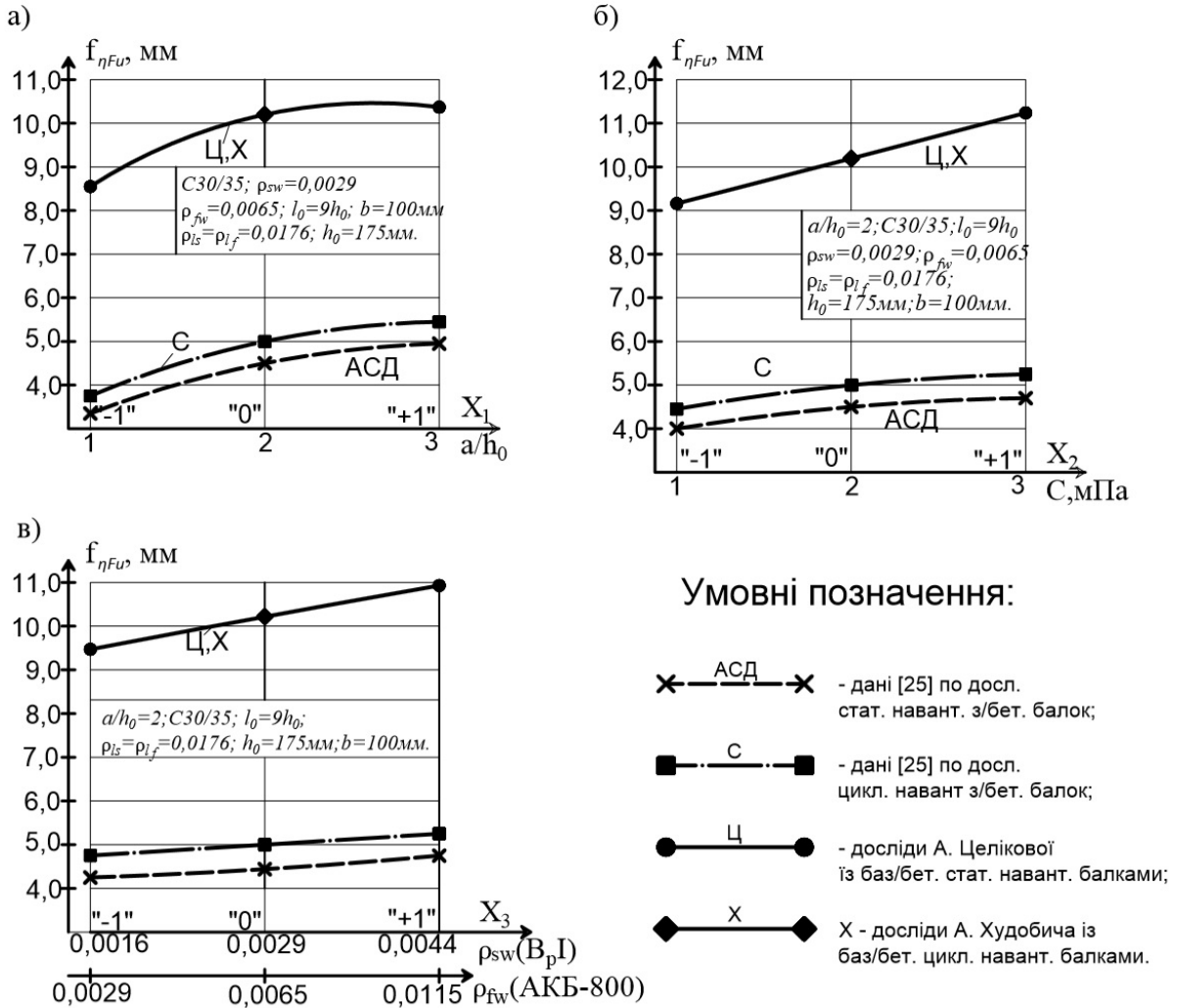


Рис. 2. Залежність прогинів балок при експлуатаційному ($\eta = 0.65F_u$) рівні поперечного навантаження від відносного прогону зрізу (а), класу бетону (б) та кількості поперечної арматури (в).

Утворення нормальних і похилих тріщин у базальтобетонних балках.

Характеризується відповідними залежностями (8) і (9) і графічно відображене на рис.3.

$$\hat{Y}(M_{crf}^{\perp}) = 3,25 + 0,98x_2 + 0,14x_3, \text{ кНм}, \text{ } \bar{U} = 5,1\%; \quad (8)$$

$$\hat{Y}(V_{crf}^{\prime}) = 20,5 - 9,6x_1 + 3,3x_2 + 0,8x_3 + 5,1x_1^2 - 0,5x_2^2 - 0,6x_3^2 - 2,4x_1x_2, \text{ } \bar{U} = 8,0\%, \quad (9)$$

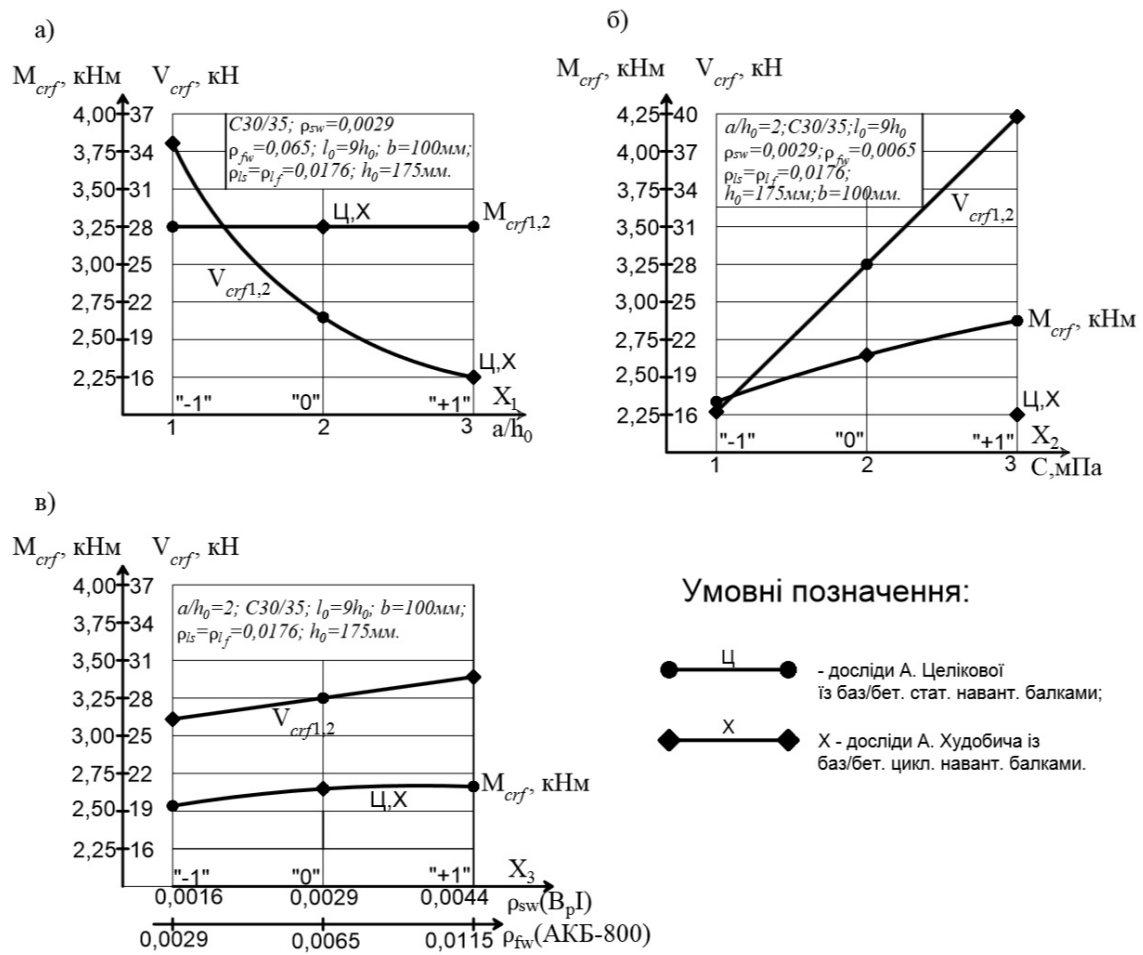


Рис. 3. Залежність моменту $M_{cr1,2}$ і поперечної сили $V_{crf1,2}$ утворення, відповідно, нормальних і похилих тріщин у дослідних базальтобетонних зразках-балках від величини прольоту зрізу (а), класу бетону (б) і кількості поперечної арматури (в) за дії статичного (індекс 1) і малоциклового (індекс 2) повторного навантаження.

Ширина розкриття нормальних тріщин у дослідних елементах при малоцикловому навантаженні експлуатаційного рівня.

Може бути описана залежностями (10)...(11) і представлена рис. 4.

$$\hat{Y}(W_{ks}^{\perp cys}) = 0,14 + 0,02x_1 + 0,03x_2 + 0,01x_3 + 0,01x_1^2 - 0,03x_2^2 + 0,01x_1x_3, \quad \bar{U} = 6,2\%; \quad (10)$$

$$\hat{Y}(W_{kf1,2}^{\perp cys}) = 0,35 + 0,06x_1 + 0,10x_2 + 0,05x_3 + 0,02x_1x_3, \text{ мм}, \bar{U} = 11,5\%. \quad (11)$$

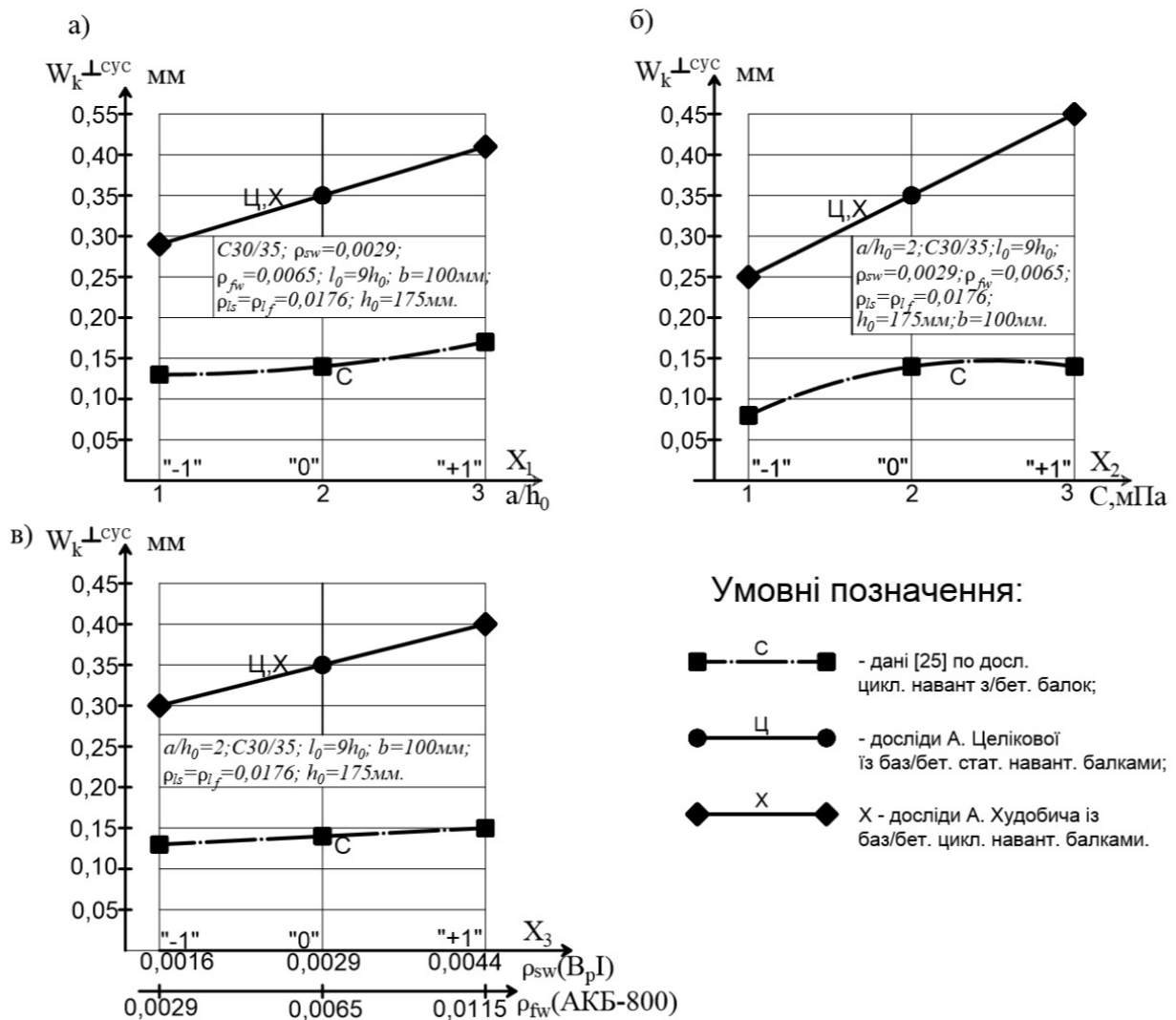


Рис. 4. Вплив конструктивних чинників на ширину розкриття нормальних і похилих тріщин у дослідних залізобетонних і базальтобетонних балках при статичному малоцикловому їх навантаженні експлуатаційного рівня ($\eta \cong 0.65F_u$).

Як видно із рис. 5, ширина розкриття нормальних тріщин у експериментальних зразках при експлуатаційному рівні навантаження не перевищує допустимих рівнів.

Ширина розкриття похилих тріщин у дослідних балках при статичних і малоциклових навантаженнях експлуатаційного рівня.

Характеризується статичними залежностями (12)...(14) і відображена на рис. 5.

$$\hat{Y}(W_{ks}^{\prime}) = 0,35 - 0,06x_1 - 0,03x_2 - 0,01x_3 - 0,01x_1x_3, \text{ ММ}, \bar{U} = 10,4\%; \quad (12)$$

$$\hat{Y}(W_{ks}^{\prime cyc}) = 0,40 - 0,05x_1 - 0,03x_2 - 0,03x_1x_3, \text{ ММ}, \bar{U} = 6,0\%; \quad (13)$$

$$\hat{Y}(W_{kf1}^{\prime}) = 0,30 - 0,08x_1 - 0,15x_2 + 0,07x_3 + 0,03x_1^2 + 0,03x_2x_3, \text{ ММ}, \bar{U} = 13,7\%. \quad (14)$$

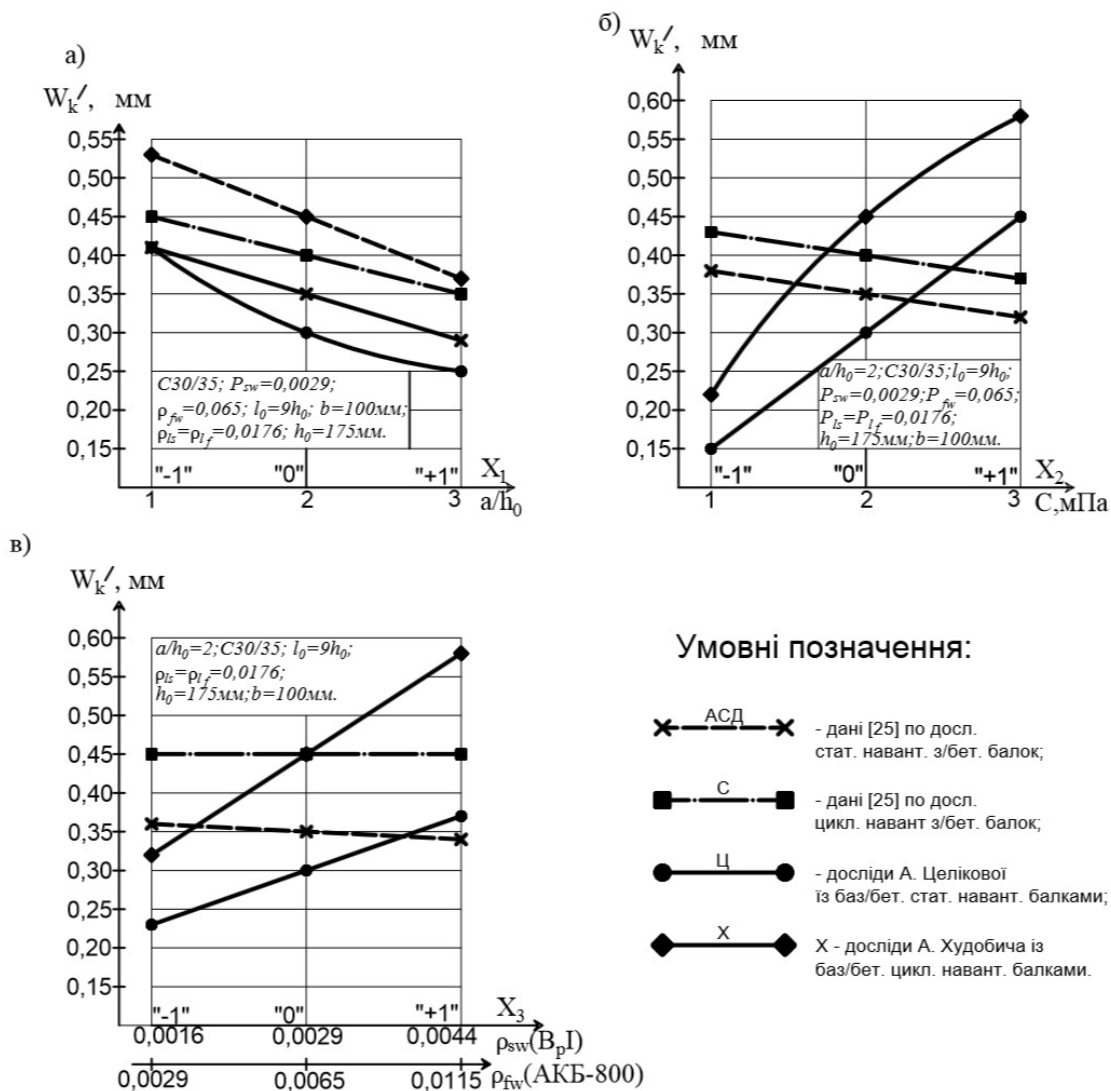


Рис. 5. Залежність ширини розкриття похилих тріщин у дослідних зразках-балках при експлуатаційному рівні ($\eta \cong 0.65F_u$) їх навантаження від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б) і кількості поперечної арматури (в).

Висновки:

1. Реалізований системний підхід до експериментально – теоретичного вивчення напружено – деформованого стану балкових конструкцій, армованих сталевую і базальтопластиковою (BFRP) арматурою, вперше дозволив зробити достовірну кількісну і якісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на їх несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість та інші параметри працездатності як зокрема, так і у взаємодії один з одним, суттєво уточнити фізичну модель роботи вказаних конструкцій при їх статистичному та малоцикловому повторному навантаженні. Зокрема було встановлено, що міцність дослідних елементів нелінійно збільшується:

- зі зменшенням величини відносного прольоту зрізу a/h_0 від 3 до 1 у зазначених серіях на 80...122%;
- зі збільшенням класу бетону від С16/20 до С 40/50 на 24...47%;
- зі збільшенням кількості поперечної арматури ρ_{sw} від 0.0016 до 0.0044 і базальтопластикової ρ_{fw} від 0.0029 до 0.0115, відповідно, на 12... 16% і 20...21%;
- одночасному зменшенні відносного прольоту зрізу і збільшенні класу бетону на 7...23%;
- одночасному зменшенні a/h_0 і збільшенні ρ_{fw} на 7... 9%.

2. Заміна сталевих арматур на більш податливу базальтопластикову BFRP при всіх інших однакових конструктивних чинниках призводить до зменшення несучої здатності похилих перерізів дослідних зразків – балок при їх статичному навантаженні, в середньому, на 47%, а при малоциклового повторному – на 51%.

3. Малоциклове повторне навантаження знижує несучу здатність приопорних ділянок залізобетонних балок, в середньому, на 8%, а бетонних елементів, армованих BFRP – на 14%.

4. Прогини бетонних балок, армованих BFRP, більше, ніж у два рази перевищують прогини аналогічних залізобетонних елементів з такими ж конструктивними чинниками і досягають, в середньому, 1/154 від розрахункової довжини прольоту при експлуатаційному рівні ($0.65F_u$) навантаження і збільшуються до 1/110 перед руйнуванням ($0.95F_u$).

5. Ширина розкриття нормальних тріщин залізобетонних балок при експлуатаційному рівні малоциклового повторного навантаження, в середньому, дорівнює 0.14 мм, а базальтобетонних – 0.35 мм. Відповідно, середнє значення ширини розкриття похилих тріщин у залізобетонних балках становить 0.40 мм, а базальтобетонних – 0.45 мм при аналогічному навантаженні.

6. Для суттєвого збільшення несучої здатності похилих перерізів прогінних базальтобетонних конструкцій, зменшення їхніх прогинів та ширини розкриття нормальних і похилих тріщин вважаємо за доцільне виготовлювати їх із попередньо напруженою BFRP з відповідним науково – технічним супроводом.

References

- [1] ACI 440.1R-03, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, 2003.
- [2] CAN/CSA-S6-00, Canadian High Bridge Design Code, Canadian Standards Association, 2019.
- [3] JSCE, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers, 1997.
- [4] EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2 - Design of Concrete Structures. Part 1: General rules and rules, CEN, 2004. – 225 p.
- [5] CNR-DT 203/2006, Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars, Rome, Italy, 2006.
- [6] (10)Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і скло- ровінгу: ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 – [Чиний від 2013-04-01] – Київ.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. – 28 с. – (Національний стандарт України).
- [7] Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Set of rules: СП63.13330.2012 / ТК 465 “Building” of 01.01.2013 in Building regulations 52-01-2003 – М:2012. [online]. 2013, pp. 79 [accessed (25.10.2019)]. Desponibil: <http://docs.cntd.ru/document/1200095246>
- [8] Karpiuk I., Karpiuk V., Klimenko E., Tselikova A., Khudobych A. Comparative analysis of research and calculated values of bearing capacity of reinforced concrete and basalt concrete beams according to recommendations. Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури. 2020, № 80. С. 36-50.
- [9] Brik, V.B. Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber, BF Composite Rebar Reinforcement, Washington: Transportation Research Board, 2003, pp. 30.
- [10] Fico, R., Limit states design of concrete structures reinforced with frp bars. PHD Thesis, University of Naples Federico II, 2007.
- [11] Rahmonov, A.D. Prochnost, giostkost i treschenostjokost nerazreznih betonnih balok s kombinirovannim armirovaniem: dissertacija na soiskanije nauchnoj stepeni kandidata nauk [Strength, Stiffness and Crack Resistance of Non-Cut Concrete Beams with Combined Reinforcement: Dissertation for the Candidate of Science Degree]. Kazan, 2015, pp. 160.
- [12] Koval, P.M. Vrahuvanja diji malociklovih navantajen pri rozrahunku bazaltobtonnih balok, armovanih bazaltoplatikovoju armaturoju [Considering the number of low-cycle loads at the

- basing base, reinforced basalt-plastic fittings]. In: *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2018, 16(13), pp. 37-45.
- [13] Elavenit, S., Saravanan, S., Reddy, R. *Investigation of structural members with basalt rebar reinforcement as an effective alternative of standard steel rebar* [online]. 2017, [accessed 10.01.2020].
- [14] Serbescu, A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K. Mechanical characterization of basalt FRP rebars and long-term strength predictive model. In: *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(2).
- [15] VINCENT, P., AHMED, E., BENMOKRANE, B. Characterization of Basalt Fiber – Reinforced Polymer (BFRP) reinforcing bars for concrete structures. In: *Proceedings, Annual Conference Canadian Society for Civil Engineering – 2013*, 5 January 2013. pp. 4489 – 4498.
- [16] Li, L., Lu, J., Fang, S., Liu, F., Li, S. Flexural study of concrete beams with basalt fibre polymer bars. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: structures and Buildings*, 2018, 171(7), pp. 505 – 516.
- [17] Atutis, M., Valivonis, J., Atutis, E. Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers. Part 1: Flexural behavior and serviceability. *Composite Structures*, 2018, pp. 114 – 123.
- [18] THORHALLSSON, E., ZHELYAZOV, T., GUNNARSSON, A., SHAEBJORNSSON, J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars. *Concrete – innovation and Design: fib Symposium Proceedings*, 2015, pp. 277 – 278.
- [19] Zhu, H., Wu, G., Zhang, L., Zhang, J., Hui, D. Experimental study on the fire resistance of RC beams strengthened with near surface – mounted high – T_g BFRP bars. *Composites Part B: Engineering* 60, 2014, pp. 680 – 687.
- [20] HOFMANN, S., GRAUBNER, C.-A., PROSKE, T. Load – bearing performance of concrete beams with basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebars. *Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 2018, pp. 419 – 426.
- [21] SCMIDT, A., KAMPMANN, R., TELIKAPALLI, S., EMPARANZA, A.R., DE CASO, F., Basalt FRP production: Market analysis and state – of – the – art report. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures*, 2019, pp. 189 – 196.
- [22] Kustikova, J.O. *Napryazgonno-deformirovannoe sostoyaniye scepheniya bazaltoplastikovej armatury s betonom: dissertaciya na soiskanie nauchnoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk* [The stress-strain state of adhesion of basalt-plastic reinforcement with concrete: a dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Moscow, 2014, pp. 181.
- [23] Brik, V.B. *Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber, BF Composite Rebar Reinforcement*, Washington: Transportation Research Board, 2003, pp. 30.
- [24] Technology group “Ekipag” “*Otcheti o provedennih ispitaniyah stekloplastikovej i bazaltoplastikovej armatury*” [Test reports of fiberglass and basalt-plastic reinforcement]. 2008-2011 [accessed 18.12.2019]. Disponibil: <http://www.frp-rebar.com/frp-rebar-test.html>
- [25] Карпюк В.М. Особливості напружено-деформованого стану і розрахунку залізобетонних конструкцій за дії циклічного навантаження високих рівнів (Монографія) / В.М. Карпюк, Ю.А.Сьоміна, А.І.Костюк, О.Ф.Майстренко - Одеса: ОДАБА, 2018. 237 с.

JOINT WORK OF STEEL AND BASALT PLASTIC REINFORCEMENT WITH CONCRETE AS PART OF BEAM STRUCTURES

¹Karpiuk I.A., Ph.D., Associate Professor,
irina.carpyuk@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3437-5882

¹Klymenko, Ye.V., ScD, Professor,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹Karpiuk V.M., ScD, Professor,
v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹**Tselikova A.S.**, Ph.D., Assistant,
tselikovaa93@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1394-3986

¹**Khudobych A.A.**, postgraduate student,
khudobycha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5336-599X

¹**Hlibotskyi R.V.**, postgraduate student
romich.gl@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8730-5952

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
str. Didrichson, 4, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. Experimental data on strength, deflections and cracking in beams are presented. Beams are made with dimensions 2000x200x100mm with steel and basalt-plastic (BFRP) reinforcement. They have been tested for static and low-cycle reloading. The results of studies of the main parameters of the performance of research elements are presented in the form of the corresponding experimental-statistical dependences for the actions of operational and destructive loads with the same design factors. With the help of stochastic and graphical analysis, the influence of the type of reinforcement and design factors on the strength and deformation characteristics, as well as on the crack resistance of experimental samples - beams, is estimated.

Keywords: steel and basalt-reinforced plastic (BFRP) reinforcement, strength, deformability and fracture toughness of beams, static and low-cycle loading.

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА СТАЛЬНОЙ И БАЗАЛЬТОВОЙ ПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ В СОСТАВЕ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

¹**Карпюк И.А.**, к.т.н., доцент,
irina.carpyuk@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3437-5882

¹**Клименко Е.В.**, д.т.н., профессор,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹**Карпюк В.М.**, д.т.н., профессор,
v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹**Целикова А.С.**, к.т.н., доцент,
tselikovaa93@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1394-3986

¹**Худобич А.А.**, аспирант,
khudobycha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5336-599X

¹**Глибощкий Р.В.**, аспирант
romich.gl@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8730-5952

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
str. Didrichson, 4, Odessa, 65029, Ukraine

Аннотация. Представлены экспериментальные данные прочности, прогибов и образования трещин в бетонных балках со стальной и базальтопластиковой (BFRP) арматурой с размерами 2000x200x100мм при действии статической и малоцикловой повторной нагрузки. Результаты исследований основных параметров работоспособности исследовательских элементов представлены в виде соответствующих экспериментально-статистических зависимостей за действия эксплуатационного и разрушительного нагрузок при одинаковых конструктивных факторах. С помощью стохастического и графического анализа оценено влияние вида арматуры и конструктивных факторов на прочностные и деформативные характеристики, а также на трещиностойкость экспериментальных образцов - балок.

Ключевые слова: стальная и базальтопластиковая (BFRP) арматура, прочность, деформативность и трещиностойкость балок, статическая и малоцикловая загрузки.