https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.167

УДК 624.21

Єрьоменко О. Ю.[1], *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-4030-9438*
Полюга Р. І.[2], *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-3729-0577*
Стоянович С. В.[2], *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-1363-7356*

[1] *Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*
[2] *Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, м. Київ, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ СПІВВІДНОШЕННЯ ВМІСТУ СТАЛЕВОЇ ТА БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЇ АРМАТУРИ НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ БАЛОК ІЗ ГІБРИДНИМ АРМУВАННЯМ

Анотація

Вступ. Сучасний етап розвитку будівельної галузі пов'язаний з введенням в практику нових матеріалів, які порівняно з «традиційними» (сталь, бетон, деревина) мають певні переваги у вигляді покращених показників міцності, корозійної стійкості, тощо. До таких матеріалів відносять неметалеву композитну арматуру.

Проблематика. Основним недоліком неметалевої композитної арматури (крім вуглепластикової) є значно менший модуль пружності в порівнянні з сталевою арматурою. Це є причиною виникнення в бетонних конструкціях надмірних деформацій, що не забезпечує виконання вимог за другою групою граничних станів. Одним з шляхів зі зменшення деформацій бетонних конструкцій, без суттєвого збільшення відсотку армування перерізу, є застосування гібридного армування, коли армування виконують одночасно сталевою та композитною арматурою. На теперішній час існує дуже обмежена кількість експериментальних відомостей щодо напружено-деформованого стану конструкцій з таким армуванням.

Мета. Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій з гібридним армуванням, встановлення його ефективності та оптимального співвідношення вмісту сталевої та композитної арматури.

Матеріали та методи. Була досліджена робота балок під навантаженням армованих базальтопластиковою арматурою, сталевою арматурою (контрольна серія) та з гібридним армуванням сталевою та базальтопластиковою арматурою одночасно. Щоб з'ясувати вплив зміни вмісту базальтопластикової арматури по відношенню до сталевої на експлуатаційні показники балок з гібридним армуванням було запроектовані і виготовлені, а потім і досліджені різні серії зразків балок з різним співвідношенням базальтопластикової та сталевої арматури.

Результати. На основі проведених досліджень було оцінено характер роботи та руйнування бетонних балок з гібридним армуванням в залежності від відсотку вмісту сталевої та базальтопластикової арматури. Були отримані та проаналізовані показники міцності бетонних балок з гібридним армуванням. Результати випробувань показали, що міцність балок з гібридним армуванням зросла порівняно з балками контрольної серії і знаходилась на рівні балок армованих базальтопластиковою арматурою. При цьому зменшилися прогини та ширина розкриття тріщин балок.

Висновки. Використання гібридного армування дозволяє збільшити несуну здатність бетонних балок в залежності від відсотку армування перерізу. Визначальними факторами міцності балок з гібридним армуванням є міцність бетону стиснутої зони та відсоток армування перерізу. Оптимальний відсоток співвідношення сталевої та базальтопластикової арматури в бетонних балках з гібридним армуванням є 60 % / 40 %.

Ключові слова: базальтопластикова арматура, балки з гібридним армуванням, деформативність, міцність, сталева арматура.

Вступ

Сучасний етап розвитку будівельної галузі пов'язаний із введенням у практику нових матеріалів, які порівняно з «традиційними» (сталь, бетон, деревина) мають певні переваги у вигляді покращених показників міцності, корозійної стійкості, тощо. До таких матеріалів відносять композитну арматуру. Переваги останньої широко відомі і, в порівнянні з сталевою, полягають у високій міцності на розтяг (у 3–7 разів вищою), легкістю, високою корозійною стійкістю по відношення до впливу переважаючої більшості агресивних середовищ, не магнітністю, тощо. Завдяки своїм перевагам за допомогою неметалевої композитної арматури можна суттєво покращити роботу елементів мостів та підвищити їх довговічність. Існуюча база експериментальних досліджень [1–6] вказує на можливість ефективного використання композитної арматури для армування бетонних конструкцій.

Такі країни як Канада, США, Японія та ряд інші країн Європи вже впровадили використання композитної арматури в плитах для мостів, конструкціях парковок, стінах бар'єрів безпеки та інших бетонних конструкціях.

Основним недоліком даного типу арматури (крім вуглепластикової) є модуль пружності, який, в середньому, в три рази менший ніж у сталевої. Останнє є причиною виникнення в бетонних конструкціях надмірних деформацій і неможливості забезпечення виконання вимог за другою групою граничних станів. Одним з шляхів подолання означеного недоліку, без суттєвого збільшення відсотку армування перерізу, є застосування гібридного армування, коли армування виконують одночасно сталевою та композитною арматурою. На теперішній час існує дуже обмежена кількість експериментальних відомостей щодо напружено-деформованого стану конструкцій з гібридним армуванням, які б дозволили встановити його ефективність та оптимальні співвідношення вмісту сталевої та композитної арматури для досягнення задовільних показників міцності та жорсткості.

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану конструкцій з гібридним армуванням, встановлення його ефективності та оптимального співвідношення вмісту сталевої та композитної арматури.

Основна частина

Дана робота є продовженням досліджень описаних в [7, 8, 9], в яких було розглянуто роботу балок під навантаженням армованих базальтопластиковою арматурою, сталевою арматурою (контрольна серія) та з гібридним армуванням сталевою та базальтопластиковою арматурою одночасно. Для можливості коректного порівняння результатів відсоток армування був прийнятим однаковим для балок всій серій. За результатами випробувань встановлено, що міцність балок з гібридним армуванням зросла порівняно з балками контрольної серії і знаходилась на рівні балок армованих базальтопластиковою арматурою. При цьому прогини та ширина розкриття тріщин зменшилися і за рівня навантаження 60 % від руйнівного не перевищували гранично допустимих за нормами, в той час, як в балках армованих виключно базальтопластиковою арматурою вони на (30–120) % перевищували граничні величини [7, 8, 9].

У зв'язку з вищенаведеним ефективність гібридного армування є очевидною. У той же час актуальним залишається питання оптимального співвідношення вмісту сталевої і базальтопластикової арматури при армуванні перерізу. З метою з'ясування питання впливу зміни вмісту базальтопластикової арматури по відношенню до сталевої на експлуатаційні показники балок з гібридним армуванням було запроектовано, виготовлено та досліджено 6 серій зразків балок.

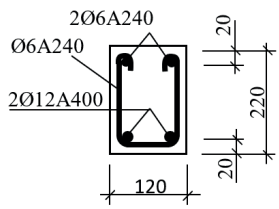
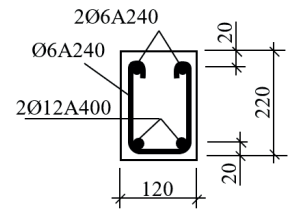
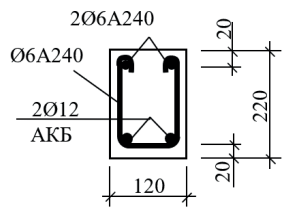
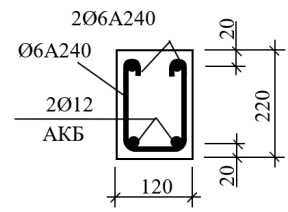
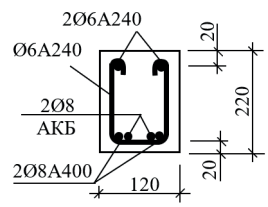
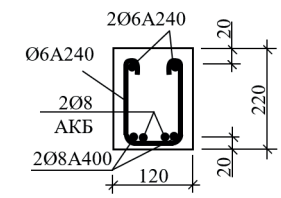
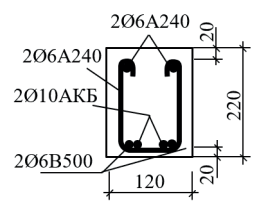
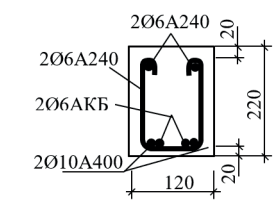
Армування поперечних перерізів зразків балок всіх серій (нових та попередніх досліджень [7, 8, 9] наведені в **табл. 1**.

Для можливості порівняння балок між собою та з результатами попередніх досліджень клас бетону прийнято таким же, як і роботах [7, 8, 9], а відсоток армування максимально близьким до аналогічного показника в згадуваних дослідженнях. Величина відсотку армування балок нових та попередніх досліджень склала:

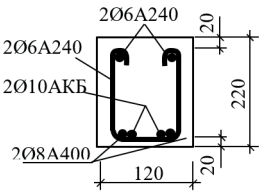
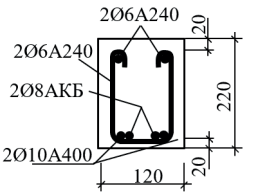
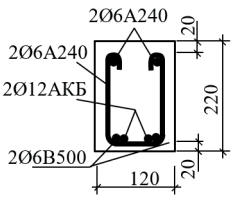
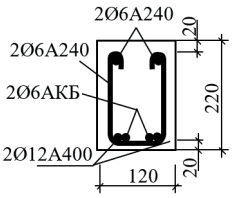
- БМ, БМД, ББ, ББД — 0,95 %;
- БМБ, БМБД — 0,84 %;
- Б 6/10, Б 10/6 — 0,89 %;
- Б 8/10, Б 10/8 — 1,07 %;
- Б 6/12, Б 12/6 — 1,18 %.

Таблиця 1

Схема армування поперечних перерізів балок

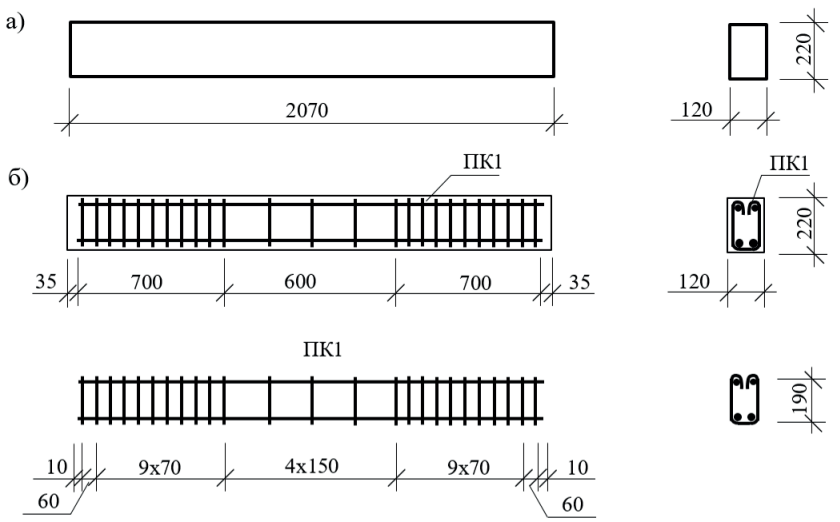
№ серії балки	Маркування балок	Поперечний переріз балок	№ серії балки	Маркування балок	Поперечний переріз балок
1	2	3	4	5	6
1^1	БМ-1 БМ-2 БМ-3		4^1	БМД-1 БМБ-2 БМД-3	
2^1	ББ-1 ББ-2 ББ-3		5^1	ББД-1 ББД-2 ББД-3	
3^1	БМБ-1 БМБ-2 БМБ-3		6^1	БМБД-1 БМБД-2 БМБД-3	
7^2	Б 6/10-1 Б 6/10-2 Б 6/10-3		8^2	Б 10/6-1 Б 10/6-2 Б 10/6-3	

Кінець таблиці 1

1	2	3	4	5	6
9^2	Б 8/10-1 Б 8/10-2 Б 8/10-3		10^2	Б 10/8-1 Б 10/8-2 Б 10/8-3	
11^2	Б 6/12-1 Б 6/12-2 Б 6/12-3		1	12^2	Б 12/6-1 Б 12/6-2 Б 12/6-3	

Примітка. 1 — поперечні перерізи балок попередніх досліджень [7, 8, 9]; 2 — прийняті позначення: чисельник дробу в позначенні відповідає діаметру сталевої арматури, а знаменник діаметра АКБ (арматура композитна базальтопластикова) арматури.

Довжина всіх зразків була однаковою — 2 000 мм, розміри поперечного перерізу $b \times h$ = = 120 мм × 220 мм (**рис. 1**). Армування балок було виконано просторовим арматурним каркасом [7]. Поперечне армування виконано з арматурних стержнів Ø6 А240 з кроком 70 мм в опорних зонах. Конструктивну арматуру в стиснутій зоні прийнято — 2Ø6 А240С.



а) опалубне креслення балок серії БМ;

б) арматурне креслення балок серії БМ, де ПК1 — поперечний каркас.

Рисунок 1 — Армування зразків балок

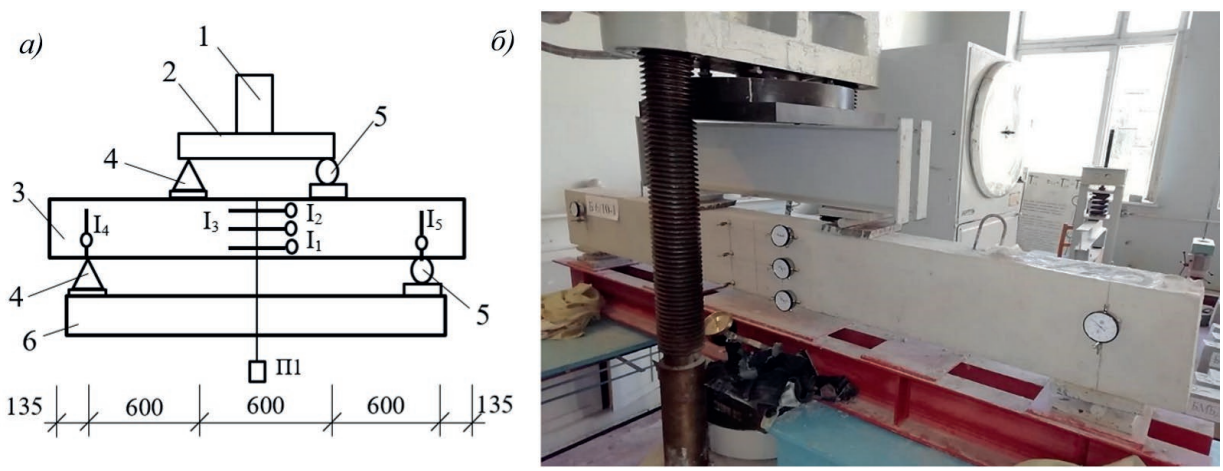
Бетонування експериментальних балок проводили в інвентарній металевій опалубці на заводі з виробництва залізобетонних виробів ПАТ «Криворіжіндустрбуд» (**рис. 2**).

Крім бетонування зразків балок було виготовлено зразки кубів (розмірами

100 мм × 100 мм × 100 мм) та призми (розмірами 100 мм × 100 мм × 400 мм) для визначення показників міцності та модуля пружності бетону конструкцій.

Рисунок 2 — Сформовані зразки балок

Короткочасні випробування балок проводили на універсальному гідравлічному пресі П-125 за схемою однопрольотної вільнолежачої балки, навантаженої двома зосередженими силами у третинах прольоту (**рис. 3**). В процесі випробування експериментальних балок фіксували деформації граней балки в зоні чистого згину, визначали прогини балок, момент появи тріщин, а також слідкували за розвитком тріщин по висоті та ширині їх розкриття. Навантаження дослідних зразків балок здійснювали ступенями по 0,1 від руйнівного навантаження, яке визначали за розрахунковими руйнуючими навантаженнями.



а) схема установки для випробування балок: 1 — плита пресу; 2 — верхня розподільча траверса; 3 — дослідна балка; 4 — нерухома опора; 5 — рухома траверса; 6 – нижня траверса; I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 — індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01;

б) стенд для випробування зразків балок.

Рисунок 3 — Загальний вигляд стенду та схема розміщення приладів для проведення випробувань балок

Випробування балок короткочасними навантаженнями до руйнування почалося на 151 добу та закінчили на 161-у добу після виготовлення зразків. Усі дослідні зразки під час проведення експерименту знаходились в одному приміщені за однакових умов.

Випробуванням балок передувало дослідження показників міцності та жорсткості бетону та арматури. Для зручності порівняння в **табл. 2** та **табл. 3** наведені означені показники, як бетону і арматури «нових» балок так і балок попередніх досліджень [7].

Таблиця 2

Показники міцності та деформативності бетонів за видами

Ч. ч.	Вид бетону	Кубикова міцність, R, МПа		Призмова міцність, R_b, МПа		Початковий модуль пружності, $E_b \cdot 10^{-3}$, МПа		Міцність на розтяг, R_{bt}, МПа		Граничні деформації при стиску, $\varepsilon_{bR} \cdot 10^{-5}$
		Вік зразків, діб								
		28	151	28	151	28	151	28	151	151
1	На відходах ГЗК	35,17	51,82	26,8	30,86	31,17	36,02	2,11	3,11	162
2*	На кварцовому піску	32,09	46,13	23,86	27,49	29,72	34,7	1,93	2,77	204
* — використано при виготовлені зразків балок серій ББ, БМ, БМБ.										

Таблиця 3

Фізико-механічні характеристики арматури

Клас арматури	Межа текучості, Н/мм^2	Тимчасовий опір на розрив, Н/мм^2	Модуль пружності, Н/мм^2	Відносне видовження після розриву, %
А400С (∅ 8)	508	622	$198 \cdot 10^3$	23,4
А400С (∅ 10)	519	629	$200 \cdot 10^3$	21,6
А400С (∅ 12)	527	602	$201 \cdot 10^3$	20,6
А240 (∅ 6)	298	373	$210 \cdot 10^3$	17,8
В500 (∅ 6)	620 (умовна)	663	$192 \cdot 10^3$	2,12
АКБ (∅ 6)	-	961	$57{,}3 \cdot 10^3$	2,7
АКБ (∅ 8)	-	992	$59{,}52 \cdot 10^3$	2,85
АКБ (∅ 10)	-	953	$46{,}1 \cdot 10^3$	2,9
АКБ (∅ 12)	-	925	$53 \cdot 10^3$	2,9

Характер руйнування зразків з гібридним армуванням залежав від співвідношення вмісту сталевої та АКБ арматури. Цей вміст для балок всіх серій склав:

- БМ, БМД — 100 % / 0 % [7];
- ББ, ББД — 0 % / 100 % [7];
- БМБ, БМБД — 50 % / 50 % [7];
- Б 6/10 — 27 % / 73 %;
- Б 10/6 — 73 % / 27 %;
- Б 8/10 — 39 % / 61 %;
- Б 10/8 — 61 % / 39 %;
- Б 12/6 — 80 % / 20 %;
- Б 6/12 — 20 % / 80 %.

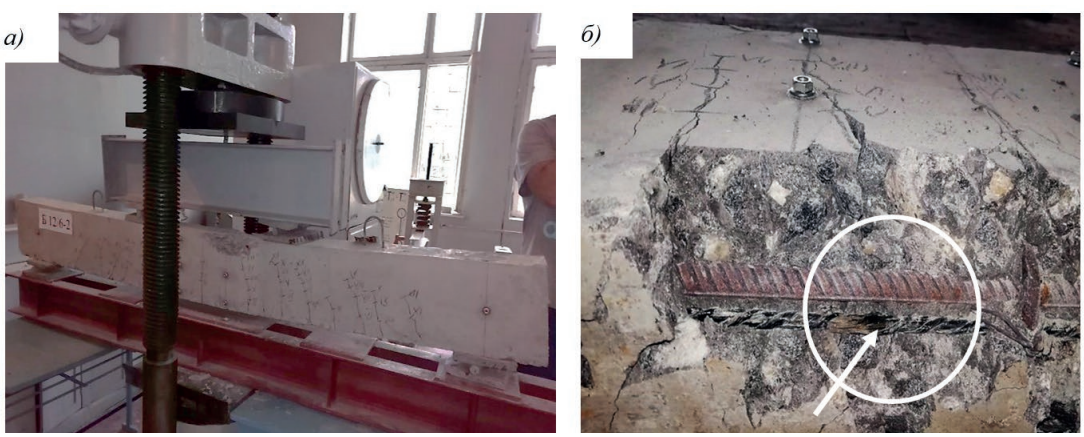
У наведених вище залежностях чисельник дробу відповідає відсотку вмісту сталевої арматури, а знаменник — відсотку вмісту базальтопластикової арматури.

Роботу під навантаженням балок з гібридним армуванням можна поділити на два етапи — до моменту початку текучості сталевої арматури та після нього. Перші нормальні тріщини виникли при рівні навантаження 0,2–0,3 від руйнівного. До рівня навантажень 0,4–0,5 від руйнівного балки працювали аналогічно балкам армованим сталевою арматурою – пропорційно збільшенню навантаження відбувався розвиток магістральних тріщин, утворювалися нові розташовані в середній третині прольоту. Останнє пояснюється переважаючим впливом сталевої арматури. Подальше збільшення навантаження призводило до появи текучості арматури. На цьому етапі основний опір навантаженню чинить базальтопластикова арматура. При цьому різко збільшується ширина розкриття існуючих тріщин, утворюються нові, зростають прогини. Такий характер роботи є типовим для балок армованих композитною арматурою.

У цілому балки серій Б 6/10, Б 10/6, Б 8/10, Б 10/8, Б 6/12, Б 12/6 показали схожий між собою характер роботи та руйнування. Різниця полягала в тому, що в залежності від відсотку вмісту сталевої арматури момент тріщиноутворення в балках з переважаючим вмістом сталевої арматури наступав за рівнів навантажень, близьких до аналогічного показника балок армованих тільки сталевою арматурою (серія БМ, [7]). Ширина розкриття тріщин та їх кількість за довжиною також була схожою до балок серії БМ в балках серій Б 12/6, Б 10/6, Б 10/8 і близькими до балок ББ в балках серій Б 6/12, Б 6/10, Б 8/10 [9].

Зважаючи на те, що в балках серій Б 6/12, Б 6/10 була використана високоміцна холоднотягнута арматура В500, то за відсутності в неї площадки текучості робота балок відрізнялася стабільністю показників. Останні змінювалися лінійно, в прямій залежності від діючого навантаження. При навантаженнях близько 0,9 від руйнівного відбувався розрив сталевої арматури після чого опір продовжувала створювати базальтопластикова арматура. Подальше зростання навантаження призводило до виникнення граничних напружень стискання в бетоні стиснутої зони з наступним його зминанням. Розриву базальтопластикової арматури не було зафіксовано. На окремих ділянках були ушкоджені волокна поверхневого шару цієї арматури.

У зразках балок Б 12/6 за рівня навантаження 0,8 від руйнівного та в зразках Б 10/6 за рівня навантаження 0,6 від руйнівного в сталевій арматурі виникали деформації текучості. Після цього деформації зразків підвищувалися, внаслідок чого деформації в бетоні стиснутої зони та розтягнутій базальтопластиковій арматури досягали граничних значень. Руйнування зразків відбувалося внаслідок зминання бетону стиснутої зони з одночасним розривом базальтопластикової арматури (**рис. 4**).



а) загальний вигляд;

б) розрив частини волокон одного зі стержнів базальтопластикової арматури.

Рисунок 4 — Зруйнований зразок балки серії Б 12-6-2

Руйнування зразків балок Б 8/10, Б 10/8, як і в балках інших серій було спричинено роздробленням бетону стиснутої зони. Останньому передувало виникнення ефекту текучості сталевої арматури. При цьому руйнування балок серії Б 8/10 супроводжувалося руйнуванням (розшаруванням) поверхневого шару волокон базальтопластикової арматури при навантаженнях 0,90–0,95 від руйнівного, що призводило до швидкого зростання деформацій і остаточного зминання бетону стиснутої зони.

Єдиною серією зразків балок з гібридним армуванням, випробування якої не супроводжувалося розривом сталевої арматури чи виникненням дефектів (частковий розрив волокон, розшарування волокон) в базальтопластиковій арматурі були балки серії Б 10/8. Це свідчить про те, що співвідношення сталевої арматури до базальтопластикової арматури у співвідношенні 61 % / 39 % (≈ 60 % / 40 %) дозволяє виконати армування перерізу балки забезпечивши певний рівень надійності конструкції — сумісну роботу обох видів арматури за будь-якого рівня навантаження, забезпечити прогнозований характер руйнування балок внаслідок зминання бетону стиснутої зони.

Показники міцності дослідних балок та балок попередніх досліджень [7] за серіями, наведено в **табл. 4**.

Таблиця 4

Показники міцності дослідних балок

Ч. ч.	Серія балок	Руйнівне зусилля, F_{ui}, кН	Відносне значення міцності, F_{ui} / F_u	Відсоток армування перерізу, μ, %	Співвідношення вмісту сталевої та АКБ арматури в перерізі, % / %
1	БМ3	70,221	1	0,95	100 / 0
2	БМД3	75,871	1,08	0,95	100 / 0
3	ББ3	100,88	1,43	0,95	0 / 100
4	ББД3	101,17	1,44	0,95	0 / 100
5	БМБ3	96,1 (45,13)	1,37	0,84	50 / 50
6	БМБД3	99,24 (49,71)	1,41	0,84	50 / 50
7	Б 6/102	96,25	1,37	0,89	27 / 73
8	Б 10/6	93,08 (63,771)	1,33	0,89	73 / 27
9	Б 8/10	119,67 (59,17)	1,7	1,07	39 / 61
10	Б 10/8	112,92 (69,53)	1,61	1,07	61 / 39
11	Б 6/122	106,25	1,51	1,18	20 / 80
12	Б 12/6	122,05 (101,5*)	1,74	1,18	80 / 20

Примітка. F_u — руйнівне зусилля балок серії БМ; 1 — зусилля, яке відповідає початку текучості сталевої арматури; 2 — використана високоміцна арматура В500; 3 — наведені результати попередніх досліджень [7].

Дані наведені в **табл. 4** свідчать про те, що заміна сталевої арматури на базальтопластикову арматуру і використання гібридного армування дозволило збільшити несну здатність зразків балок на (33–74) %. Характер руйнування дослідних балок вказує на те, що зразки армовані з використанням базальтопластикової арматури зруйнувалися внаслідок зминання бетону стиснутої зони. Останнє пояснюється високою міцністю базальтопластикової арматури на розтяг внаслідок чого балки мали переважаючий запас міцності за розтягнутою зоною, були «переармовані». Тобто показники міцності балок, багато в чому, визначалися міцністю бетону стиснутої зони. За

«традиційною» методикою проектування балок слід уникати «переармування» перерізу з метою економії арматури. У той же час, зважаючи на крихкий характер руйнування базальтопластикової арматури, більш прийнятним є варіант руйнування зі зминанням бетону стиснутої зони, оскільки він не відбувається раптово, а базальтопластикова арматура продовжує пружно працювати не даючи балці обрушитися.

Аналіз даних наведених в **табл. 4** вказує на те, що крім міцності бетону стиснутої зони на міцність зразків балок впливав відсоток армування. Арматура розтягнутої зони сприймаючи розтягуючи зусилля розвантажує переріз, збільшуючи висоту стиснутою зони, тим самим зменшуючи напруження в ній. Так найменший приріст міцності (від 33 % до 41 %) мали балки серій БМБ, БМБД, Б 6/10, Б 10/6 з відсотком армування 0,84 %, 0,89 %. Збільшення відсотку армування призвело до збільшення показників міцності. Оптимальним відсотком армування слід вважати 1,07 %, який відповідав балкам серій Б 8/10, Б 10/8. Для них приріст міцності склав (61–70) %, що є величинами близьким до максимальних.

Подальше збільшення відсотку армування до 1,18 % (балки серій Б 6/12, Б 12/6) практично не збільшило, а для серії Б 6/12 зменшило, величину руйнівного зусилля. Останнє вказує на те, що для даного класу бетону з міцності на стикання оптимальним відсотком армування базальтопластиковою арматурою, чи базальтопластиковою і сталевою арматурою одночасно є 1,07 %. Останнє твердження справедливе лише з точки зору показників міцності і потребує додаткових експериментальних досліджень у випадку використання бетону іншого класу.

Висновки

Заміна сталевої арматури на базальтопластикову арматуру дозволяє збільшити несну здатність зразків балок на орієнтовно 44 %.

Використання гібридного армування дозволяє збільшити несну здатність зразків балок на (33–74) % залежно від відсотку армування перерізу.

Зразки балок армовані базальтопластиковою арматурою та балок з гібридним армуванням руйнуються внаслідок зминання бетону стиснутої зони.

Визначальними факторами показників міцності балок армованих базальтопластиковою арматурою та балок з гібридним армуванням є міцність бетону стиснутої зони та відсоток армування перерізу.

Оптимальним відсотком армування балок з гібридним армуванням є 1,07 %, що дозволяє досягнути максимальних показників приросту міцності (61–70) % порівняно з балками армованими сталевою арматурою. Останнє твердження потрібно перевірити шляхом проведення додаткових експериментальних випробувань на зразках балок з різним класом бетону на стиск.

Для балок з гібридним армуванням, з точки зору забезпечення надійності, оптимальним відсотком співвідношення сталевої та базальтопластикової арматури слід вважати 60 % / 40 %. За такого співвідношення сумісна робота обох видів арматури відбувалася на всіх рівнях навантаження без її фізичного руйнування. У зразках з іншим відсотковим співвідношенням сталевої та базальтопластикової арматури відбувалося руйнування одного чи іншого виду арматури за рівнів навантажень близьких до руйнівних.

Список літератури

1. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. *ACI Committee 440.* American Concrete Institute, 2006. ACI 440.1R-06. 44 p.

2. FRP reinforcement in RC structures. *International Federation for Structural Concrete*, 2007. FIB Bulletin 40. 160 p.

3. Пискунов В.Г., Горик А.В. Механика и технология композитов в XXI столетии. Композиты в строительстве. Бетон и железобетон в Украине. Полтава, 2002. № 4 (14). С. 24–26.

4. Potyrała P.B. Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. *Universitat politechnica de Catalunya*. Barcelona, 2011.

5. Степанова В.Ф., Красовская Т.М., Шахов С.В., Беленчук В.В. Композитная неметаллическая арматура для строительных конструкций. Материалы второй международной конференции: *Бетон и железобетон – пути развития*. Москва, 2005. Том 5. С. 476–482.

6. Boyle H.C. and Karbhari, V.M. Investigation of bond behaviour between glass fiber composite reinforcements and concrete. Polymer-Plastics. *Technology and Engineering*. 1994. 33(6) 733. P. 753.

7. 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*. Vol. 230. 2018. URl: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002035 (дата звернення: 11.01.2021).

8. Valovoi A., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S., Research of the Deflections of Beams Reinforced with BFRP Armature and Hybrid Reinforcement Using Metal and BFRP Armature. *Actual Problems of Engineering Mechanics: Materials Science Forum.* Trans Tech Publications Ltd. Switzerland, 2019. Vol. 968, p. 301–308. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.301 (дата звернення: 11.01.2021).

9. Valovoi A., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S., Crack resistance and width of crack opening of beams with hybrid reinforcement using BFRP and metal armature. *Actual Problems of Engineering Mechanics: Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. Switzerland, 2020. Vol. 864. P. 149–157. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.149 (дата звернення: 11.01.2021).

References

1. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. *ACI Committee 440.* American Concrete Institute, 2006. ACI 440.1R-06. 44 p. [in English].

2. FRP reinforcement in RC structures. *International Federation for Structural Concrete*, 2007. FIB Bulletin 40. 160 p. [in English].

3. Pyskunov V.H., Horyk A.V. Mekhanyka y tekhnolohyia kompozytov v XXI stoletyy. Kompozyty v stroytelstve [Mechanics and technology of composites in the XXI century. Composites in construction]. *Beton y zhelezobeton v Ukrayni.* Poltava, 2002. № 4 (14). P. 24–26. [in Russian].

4. Potyrała P.B. Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. Universitat politechnica de Catalunya. Barcelona. 2011. [in English].

5. Stepanova V.F., Krasovskaia T.M., Shakhov S.V., Belenchuk V.V. Kompozytnaia nemetallycheskaia armatura dlia stroytelnikh konstruktsyi [Composite non-metallic reinforcement for building structures]. *Materials of the second international conference*: *Concrete and reinforced concrete - ways of development*. Moscow, 2005. Tom 5. P. 476–482. [in Russian].

6. Boyle H.C. and Karbhari, V.M. Investigation of bond behaviour between glass fiber composite reinforcements and concrete. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1994. 33(6)733. P. 753. [in English].

7. 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*. Vol. 230. 2018. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002035 (Last accessed: 12.01.2021) [in English].

8. Valovoi A., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S., Research of the Deflections of Beams Reinforced with BFRP Armature and Hybrid Reinforcement Using Metal and BFRP Armature. *Actual Problems of Engineering Mechanics: Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. Switzerland, 2019. Vol. 968. P. 301–308. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.301 (Last accessed: 12.01.2021) [in English].

9. Valovoi A., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S., Crack resistance and width of crack opening of beams with hybrid reinforcement using BFRP and metal armature. *Actual Problems of Engineering Mechanics: Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. Switzerland, 2020. Vol. 864. P. 149–157. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.149 (Last accessed: 12.01.2021) [in English].

Alexander Eremenko[1], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-4030-9438*
Roman Poliuga[2], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-3729-0577*
Serhii Stoyanovich[2], *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-1363-7356*

[1] *Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*
[2] *National Academy of Fine Arts and Architecture, Kyiv, Ukraine*

RESEARCH OF THE EFFECT OF CHANGING THE RATIO OF THE CONTENT OF STEEL AND BASALT-PLASTIC REINFORCEMENT ON THE STRENGTH INDICATORS OF BEAMS WITH HYBRID REINFORCEMENT

Abstract

Introduction. The current stage of development of the construction industry is associated with the introduction of new materials into practice, compared with the «traditional» (steel, concrete, wood) have certain advantages in the form of improved strength, corrosion resistance, etc. These materials include non-metallic composite reinforcement.

Problems Statement. The main disadvantage of non-metallic composite reinforcement (except for carbon fiber reinforcement) is significantly lower modulus of elasticity compared to metal reinforcement. This is the reason for the occurrence of excessive deformations in concrete structures, does not ensure the fulfillment of the requirements for the second group of limiting states. One of the ways to reduce the deformations of concrete structures, without a significant increase in the percentage of reinforcement of the section, is the use of hybrid reinforcement, when reinforcement is performed simultaneously with metal and composite reinforcement. Currently, there is a very limited amount of experimental data on the stress-strain state of structures with such reinforcement.

Purpose. Research of the stress-strain state of structures with hybrid reinforcement, establishing its effectiveness and the optimal ratio of the content of metal and composite reinforcement to achieve satisfactory strength and stiffness of a concrete structure.

Materials and Methods. The work of beams under load, reinforced with basalt-plastic reinforcement, metal reinforcement (control series) and with hybrid reinforcement with metal and basalt-plastic reinforcement simultaneously was researched. To find out the effect of changes in the content of basalt-plastic reinforcement in relation to metal on the performance of beams with hybrid reinforcement, various series of samples of beams with different ratios of basalt-plastic and metal reinforcement.

Results. On the basis of the conducted studies, the nature of the work and destruction of concrete beams with hybrid reinforcement was assessed depending on the percentage of metal and basalt-plastic reinforcement. The strength indicators of concrete beams with hybrid reinforcement were obtained and analyzed. The test results showed that the strength of beams with hybrid reinforcement increased in comparison with beams of the control series and was at the level of beams reinforced with basalt-plastic reinforcement. At the same time, the deflections and crack width of the beams decreased.

Conclusion. The use of hybrid reinforcement makes it possible to increase the bearing capacity of concrete beams, depending on the percentage of reinforcement in the section. The determining factors for the strength of beams with hybrid reinforcement are the strength of the concrete in the compressed zone and the percentage of section reinforcement. The optimal percentage of the ratio of metal and basalt reinforcement in concrete beams with hybrid reinforcement is 60 % / 40 %.

Keywords: beams with hybrid reinforcement, basaltoplastic reinforcement, steel reinforcement, strength, deformability.