

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЗАЛЬТОБЕТОННИХ БАЛОК

**В. Карпюк, д.т.н.**

*ORCID: 0000-0002-4088-6489*

**І. Карпюк, к.т.н.**

*ORCID: 0000-0003-3437-5882*

**А. Целікова, асистент**

*ORCID: 0000-0002-1394-3986*

**В. Малахов, к.т.н.**

*ORCID: 0000-0002-7635-4337*

**А. Худобич, аспірант**

*ORCID: 0000-0002-5336-599X*

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

<https://doi.org/10.31734/architecture2020.21.009>

### **Карпюк В., Карпюк І., Целікова А., Малахов В., Худобич А. Моделювання напружено-деформованого стану базальтобетонних балок**

У сучасному будівництві дедалі частіше застосовують неметалеву композитну арматуру (НКА). Вона має вищу міцність, кращі діелектричні властивості, малу вагу й не піддається корозії, все частіше замінює сталеву арматуру, особливо в будівлях спеціального призначення. Її застосування для армування бетонних конструкцій стримується недостатнім вивченням особливостей роботи таких елементів і обмеженим нормативним забезпеченням. Активніші темпи впровадження композитної арматури обмежені відсутністю достовірних методів розрахунку їхньої несучої здатності. Саме тому в статті автори моделюють напружено-деформований стан базальтобетонних балок з урахуванням спільної дії бетону й базальтопластикової арматури. Здійснено порівняльний аналіз фактичної несучої здатності похилих перерізів базальтобетонних балок і розрахункових її значень, обчислених за допомогою програмного комплексу «Ліра-САПР», подано результати моделювання напружено-деформованого стану базальтобетонних балок перед їхнім руйнуванням за впливу статичного навантаження. Проаналізовано прямі вимірювання прогинів, деформацій бетону і базальтопластикової арматури, а також узгоджених із ними ізополей переміщень і напружень в експериментальних зразках – балках – перед їхнім руйнуванням. Також наведено ізополі напружень у поздовжній та поперечній базальтопластиковій арматурі в балках із великим, середнім і малим прольотами зрізу, а також дотичні напруження на бічних гранях перед руйнуванням. Автори стверджують, що моделювання складного напружено-деформованого стану дослідних базальтобетонних балок нелінійними звичайно-елементними розрахунками за допомогою програмного комплексу «ЛІРА-САПР» дає змогу чисельно відтворити результати експериментів, найімовірнішу схему роботи та руйнування і достовірно спрогнозувати їхню несучу здатність.

**Ключові слова:** неметалева композитна арматура, моделювання, несуча здатність, напруження, руйнування, базальтобетонна балка.

### **Karpiuk V., Karpiuk I., Tselikova A., Malakhov V., Khudobych A. Simulation of stress-strain state of basalt concrete beams**

Non-metallic composite reinforcement is increasingly used in modern construction. Non-metallic composite reinforcement has higher strength, better dielectric properties, low weight and does not corrode, increasingly replacing steel reinforcement, especially in special purpose buildings. Its use for reinforcement of concrete structures is constrained by insufficient study of the features of such elements and limited regulations. More active rates of introduction of composite armature are limited by lack of reliable methods of calculation of their bearing capacity. That is why in the article the authors provide modeling of the stress-strain state of basalt concrete beams taking into account the combined action of concrete and basalt-plastic reinforcement. A comparative analysis of the actual bearing capacity of inclined sections of basalt concrete beams and its calculated values are measured by using the software package «Lira-CAD» and it presents results of the modeling of the stress-strain state of basalt concrete beams before their destruction under static load. The article presents an analysis of direct measurements of deflections, deformations of concrete and basalt-plastic reinforcement, as well as agreed with them isopoles of displacements and stresses in experimental samples – beams before their destruction. Also, the stress isopole in the longitudinal and transverse basalt-plastic reinforcement in beams with large, medium and small shear spans and the tangential stresses on the side faces before failure are given. The authors claim that modeling the complex stress-strain state of experimental basalt concrete beams by nonlinear finite element calculations using the software complex «LIRA-CAD» allows reproducing the experiment results numerically, the most probable scheme of work and destruction and make a reliable prediction of their bearing capacity.

**Key words:** non-metallic composite reinforcement, modeling, bearing capacity, stress, fracture, basalt concrete beam.

**Постановка проблеми.** У сучасній світовій практиці поряд із традиційною металевою арматурою у конструкціях, що експлуатуються в умовах агресивного середовища водного господарства, меліоративних систем, берегозахисних споруд, інженерних мереж, конструкцій проїзної частини мостів тощо, все ширше застосовують скло- й базальтопластикову композитну арматуру. Окрім високої стійкості до впливу агресивного середовища, композитна арматура має ще низку властивостей, а саме низьку теплопровідність, діелектричність і немагнітність, які розширюють сферу її застосування.

Останніми роками в Україні освоєно виробництво й розроблено відповідні технічні умови на скло- й базальтопластикову композитну арматуру, яка відповідає вимогам міжнародних стандартів. Водночас відсутність експериментально-теоретичних досліджень щодо міцності, жорсткості та тріщиностійкості згинальних конструкцій, а також нормативних документів з проектування, унеможливило використання композитної арматури в будівельній практиці України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нормативні документи з розрахунку та проектування конструкцій, армованих композитною арматурою, розробляють в усьому світі. Основними нормативними документами, у яких наведено методи розрахунку несучої здатності бетонних балкових конструкцій, армованих НКА, є: європейські *EUROCODE – 2* [1], японські *JSCE* [2], американські *ACI* [3], канадські *CSA* [4], італійські *CNR* [5], ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 [6] та ДСТУ Б. В.2.6. – 156: 2010 [7].

Дисертаційне дослідження R. Fico [9] було виконане в рамках розробки італійських норм із розрахунку й проектування конструкцій з НКА. Автор порівняв основні вимоги різних національних норм проектування конструкцій з НКА, математично змоделивавши напружено-деформований стан великої кількості бетонних зразків, армованих КА.

У 2015 році А. Рахманов [10] провів експериментальні дослідження напружено-деформованого стану нерозрізних балок із різним вмістом базальтопластикової арматури в опорних зонах багатопрілітних балок. Прольотна зона дослідних зразків була армована сталевією арматурою. Автор запропонував удосконалену методику для розрахунку багатопрольотних нерозрізних бетонних балок зі змішаним армуванням та використанням реальних діаграм стану матеріалів. Така методика дає змогу враховувати перерозподіл внутрішніх

зусиль між опорними і прольотними нормальними перерізами. Дослідження S. Elavenit [11] показали, що базальтопластикову арматуру можна використовувати як альтернативу сталевій арматурі в конструкціях, які експлуатуються в морській воді, кислотному, лужному та інших середовищах.

Учені А. Serbescu, M. Guadagnini, K. Pila-koutas [12] досліджували довговічність та корозійну стійкість *BFRP*. Вони встановили гарантовану міцність цієї арматури – близько 1300 мПа, модуль пружності – 40ГПа, а також те, що вона збереже 72–80 % від початкової міцності після її взаємодії з бетоном чи цементним розчином протягом 100 років. Запропоновано комплексну довготривалу модель прогнозу міцності стрижнів *BFRP*.

Дослідник З. Бліхарський у результаті аналізу експериментальних досліджень залізобетонних балок з одночасним впливом корозійного середовища й навантаження вивчив вплив одночасної дії агресивного середовища й навантаження на міцність залізобетонних балок, а також показав моделювання єдиного ушкодження арматури розтягуванням без пошкодження бетону.

**Постановка завдання.** Наше завдання – порівняти результати розрахунків несучої здатності похилих перерізів дослідних зразків – балок, армованих *BFRP*; перевірити можливість відтворення експериментальних значень та найімовірнішу схему руйнування базальтобетонних балок за допомогою комплексу «Ліра-САПР».

**Виклад основного матеріалу.** Було змодельовано напружено-деформований стан дослідних зразків – балок – у нелінійній постановці методом скінчених елементів у апробованому програмному комплексі «ЛІРА-САПР» версії 2018 року, який ґрунтується на загальній теорії залізобетону з тріщинами, розробленій проф. М. Карпенком [8] та його учнями. Бетон і базальтопластикові арматура працюють сумісно і мають різні фізико-механічні властивості, зокрема бетон характерний нелінійною залежністю між напруженнями та деформаціями. Тож характеристики бетону були прийняті за результатами випробування кубів та призм (табл. 1). Характеристики базальтопластикової арматури прийняті згідно із сертифікатом якості заводу-виробника та ДСТУ Н Б В.2.6 – 185 2012 [6].

Границю міцності бетону за складного напруженого стану дослідних зразків визначали за допомогою феноменологічного критерію міцності

Г. Генієва, В. Киссюка, Г. Тюпіна, закладеного в зазначеному програмному комплексі.

Відповідно до розмірів поперечного перерізу, балку умовно розбивали на восьмивузлові

ізопараметричні скінчені елементи розміром  $10 \times 10 \times 10$  мм для зручності моделювання арматури, а також виходячи з розмірів щебню для бетону.

Таблиця 1

**Усредненні дослідні значення характеристик міцності й деформаційних властивостей бетону за класами**

Клас бетону	Середня міцність бетону, МПа				Модуль пружності бетону, МПа		Коефіцієнт Пуассона, $\mu_c = \nu_c$		Граничні відносні деформації стиснення, $\times 10^{-5}$	
	Куб		Призма							
C	$\bar{f}_{c,cube}^{90}$	$\bar{f}_{c,cube}^t$	$\bar{f}_{ck,90}$	$\bar{f}_{ck,t}$	$\bar{E}_{ck,90}$	$\bar{E}_{ck,t}$	$V_{c,90}$	$V_{c,t}$	$\bar{\epsilon}_{cu,90}$	$\bar{\epsilon}_{cu,t}$
C16/20	25,7	28,27	19,51	23,59	27300	29195	0,22	0,224	469,5	483,5
C30/35	45,8	50,38	34,47	37,30	34995	35853	0,21	0,214	413,8	426,2
C40/50	64,2	70,62	49,34	53,20	38978	39571	0,19	0,195	356,9	367,6

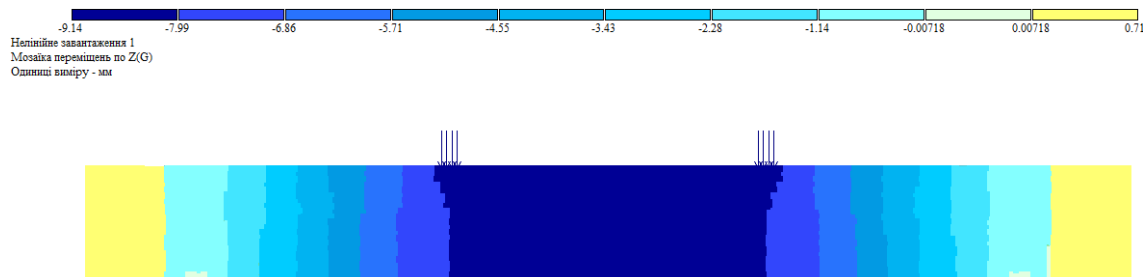


Рис. 1. Ізополя вертикальних переміщень балок  $rb$  з великим прольотом зрізу ( $a/h_0 = 3$ ) і дотичних напружень  $\tau_{xz}$  на її бічній грані перед руйнуванням

Загальна кількість скінчених елементів у моделі – 39400, вузлів – 45738. Застосовуючи кроково й кроково-ітераційний методи, використовували кусочно-лінійний закон деформування матеріалів №14 бібліотеки з відповідним алгоритмом. Як і в натурному експерименті, зовнішнє навантаження прикладали кроково до вузлів згідно з рис. 1. Для уникнення ефекту місцевого змінання у місцях прикладання навантаження були встановлені пластини розмірами  $0,01 \times 0,01$  м із заданою жорсткістю. Таку саму кількість жорстких пластин із такими ж розмірами було встановлено в місцях біля опор. Спосіб опирання дослідної балки задавали унеможливленням переміщень за відповідними осями.

За результатами розрахунків були отримані ізополя напружень і прогинів на кожному етапі навантаження дослідних зразків – балок. Також на рис. 2–4 показано напружено-деформований стан бетону й базальтопластикової арматури в експериментальних балках з великим, середнім та малим прольотами зрізу безпосередньо перед їхнім руйнуванням ( $n \cong 0,95F_u$ ).

Підсумкові результати моделювання напружено-деформованого стану базальтобетонних балок перед їхнім руйнуванням ( $n \cong 0,95F_u$ ) за дії статичного навантаження показано в табл. 2.

Аналіз прямих вимірів прогинів, деформацій бетону й базальтопластикової арматури, а також узгоджених із ними ізополів переміщень та напружень в експериментальних зразках – балках – перед їхнім руйнуванням показав, що середні розтягувальні та стискальні напруження, відповідно, в нижній робочій та верхній монтажній арматурі в балках із великими й середніми прольотами зрізу ( $a/h_0 = 2-3$ ) коливаються в межах 611–623 МПа, тобто на рівні  $0,76-0,78 f_{fk}$ , а в балках із малими прольотами зрізу ( $a/h_0 = 1$ ) – 188–191 МПа, тобто на рівні  $0,24 f_{fk}$ .

Середні розтягувальні напруження в поперечній арматурі *BFRP* у балках із великими прольотами зрізу ( $a/h_0 = 3$ ) незалежно від її кількості дорівнювали  $\sigma_{fvt} = 79$  МПа  $\approx 0,1 f_{fk}$  за середніх відносних деформацій  $\epsilon_{fvt} \cong 0,0018$ . А в балках із середніми прольотами зрізу ( $a/h_0 = 2$ ) середні розтягувальні напруження  $\sigma_{fvc} = 122$  МПа  $\approx 0,15 f_{fk}$  за  $\epsilon_{fvc} \cong 0,0028$ .

Розділ 1

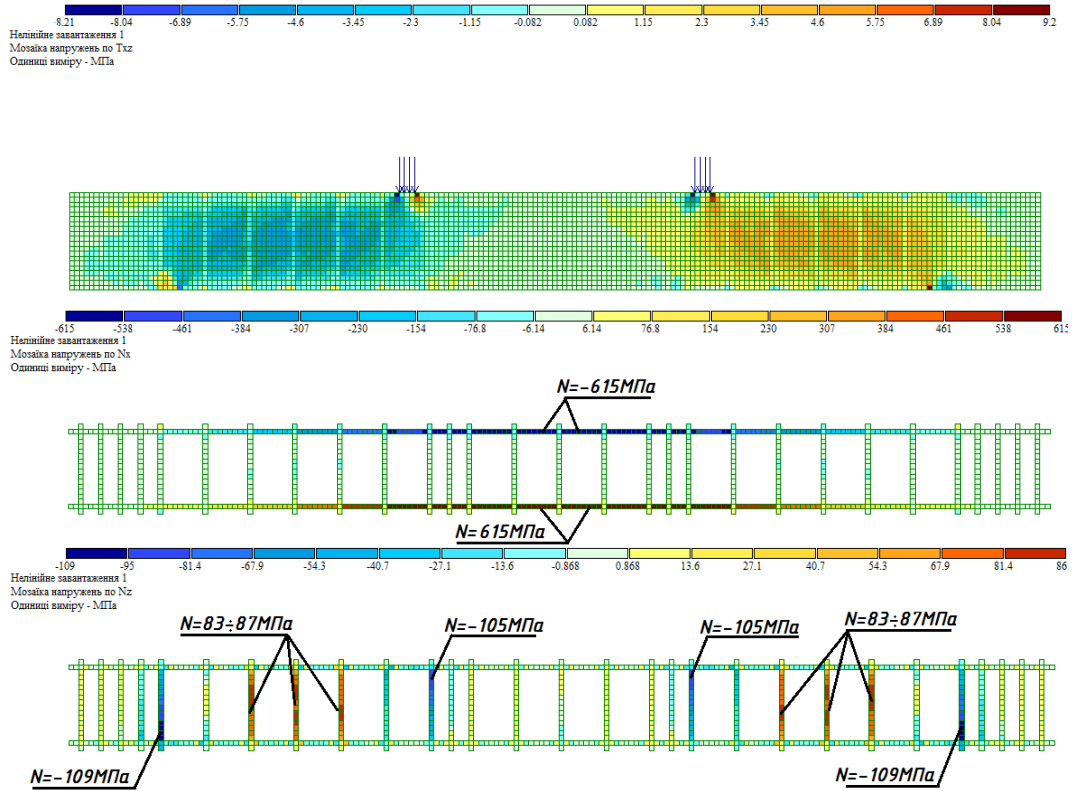


Рис. 2. Ізополя напружень у поздовжній та поперечній базальтопластиковій арматурі з великим прольотом зрізу ( $a/h_0 = 3$ ) і дотичних напружень  $\tau_{xz}$  на її бічній грані перед руйнуванням

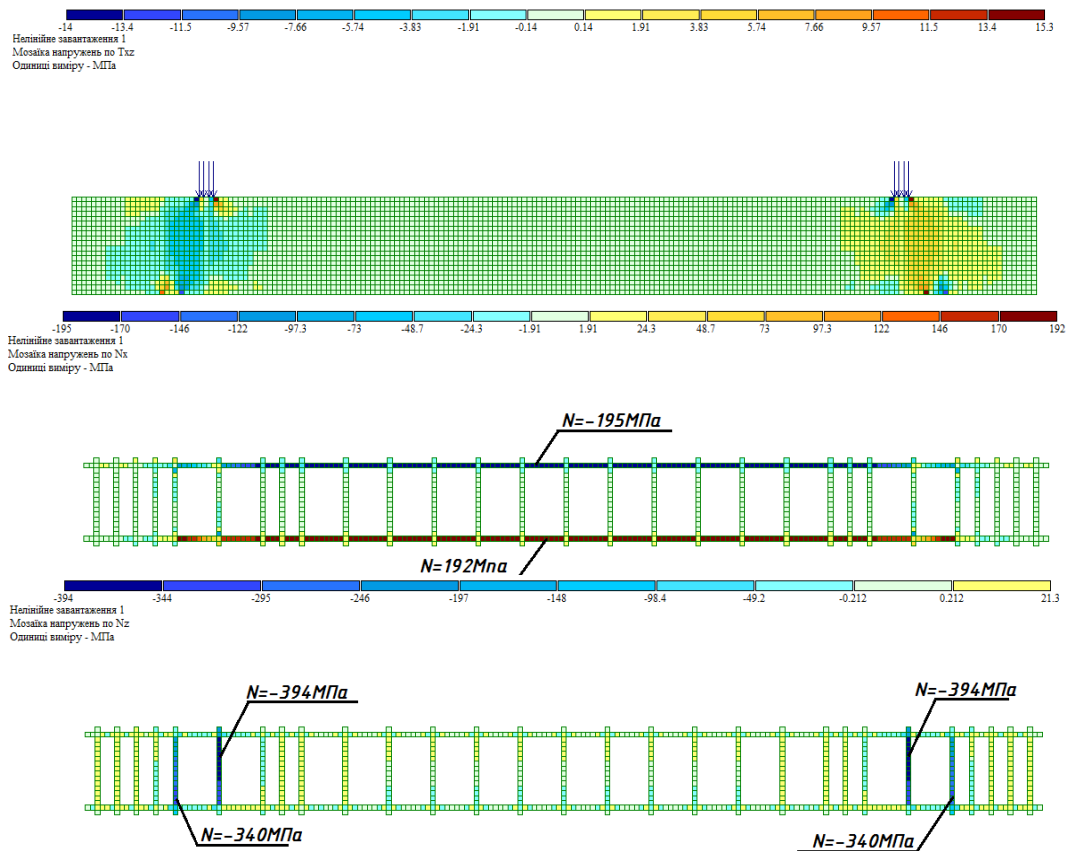


Рис. 3. Ізополя напружень у поздовжній та поперечній базальтопластиковій арматурі з малим прольотом зрізу ( $a/h_0 = 1$ ) і дотичних напружень  $\tau_{xz}$  на її бічній грані перед руйнуванням

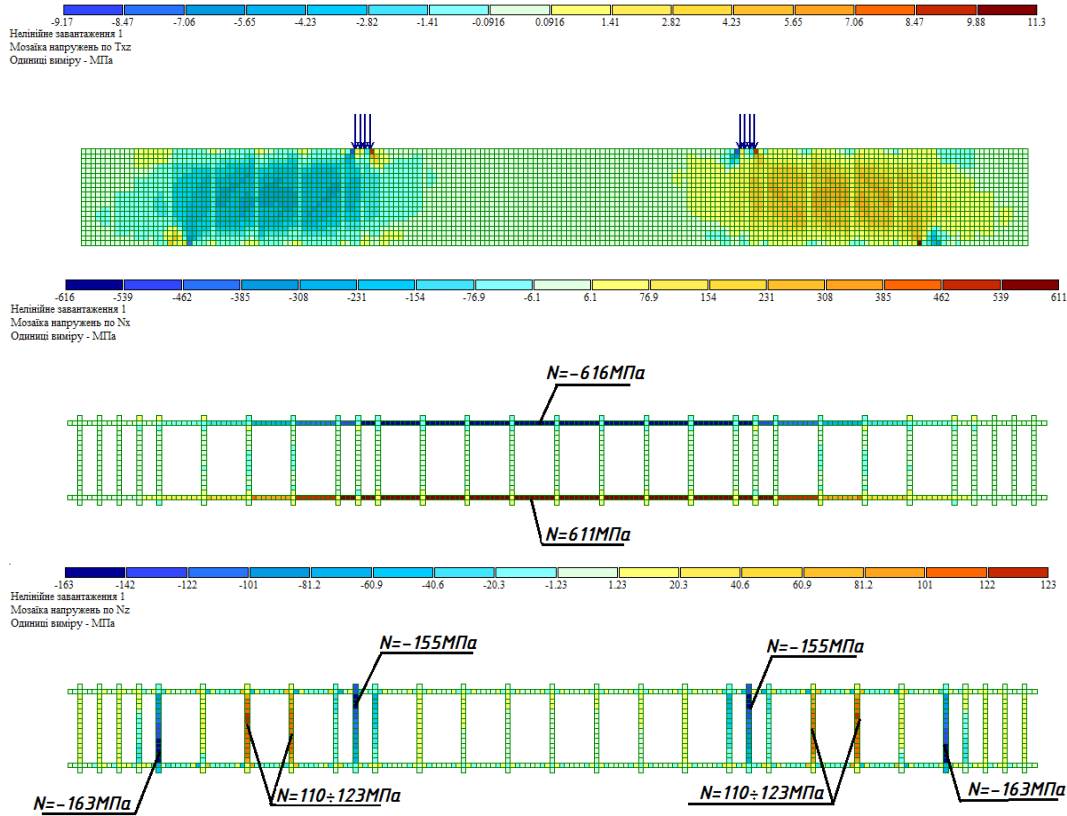


Рис. 4. Ізополі напружень у поздовжній та поперечній базальтопластиковій арматурі із середнім прольотом зрізу ( $a/h_0 = 2$ ) і дотичних напружень  $\tau_{xz}$  на її бічній грані перед руйнуванням

Таблиця 2

**Результати моделювання напружено-деформованого стану базальтобетонних балок перед їхнім руйнуванням за дії статичного навантаження ( $n \cong 0,95F_u$ )**

№ досліджу	План експерименту			Прогини $f$ , мм	Напруження в арматурі й бетоні, МПа						
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		$\sigma_{fix}$	$\sigma_{fcx}$	$\sigma_{fwz}$	$\sigma_{fwcz}$	$\tau_{cxz}$	$\sigma_{cx}$	$\sigma_{cz}$
1	+	+	+	7,8	630	-630	70	-89	8,8	-9,7	-26,3
2	+	+	-	9,1	615	-615	87	-105	9,2	-10,1	-26,3
3	+	-	+	7,8	630	-630	70	-107	8,8	-9,7	-26,3
4	+	-	-	9,1	615	-615	87	-105	9,2	-10,1	-26,3
5	-	+	+	3,5	192	-195	-	-394	15,3	-16,1	-54,9
6	-	+	-	3,7	183	-187	-	-327	15,4	-16,4	-54,4
7	-	-	+	3,5	192	-195	-	-394	15,3	-16,1	-54,9
8	-	-	-	3,7	183	-187	-	-327	15,4	-16,4	-54,4
9	+	0	0	8,4	622	-624	80	-129	9,0	-9,8	-26,3
10	-	0	0	3,6	189	-192	-	-372	15,4	-16,3	-54,7
11	0	+	0	8,6	611	-616	123	-163	11,3	-12,4	-34,5
12	0	-	0	8,6	611	-616	123	-163	11,3	-12,4	-34,5
13	0	0	+	7,9	617	-625	109	-178	11,1	-12,0	-34,6
14	0	0	-	9,4	606	-604	133	-135	11,6	-12,8	-34,4
15	0	0	0	8,6	611	-616	123	-163	11,3	-12,4	-34,5
Середнє, $a/h_0 = 3$				8,44	622	-623	79	-	9,0	-9,9	-26,3
Середнє, $a/h_0 = 2$				8,62	611	-615	122	-	11,3	-12,4	-34,5
Середнє, $a/h_0 = 1$				3,60	188	-191	-	-363	15,4	-16,3	-54,7

У всіх балках із мінімальними прольотами зрізу ( $a/h_0 = 1$ ) поперечна арматура була стиснута. Середні стискальні напруження в ній становили  $\sigma_{fvc} = -363 \text{ МПа} \approx 0,45 f_{fk}$  за  $\varepsilon_{fvc} \cong 0,0084$ .

Максимальні горизонтальні стискальні напруження в бетоні у місцях прикладання зосереджених сил незалежно від класу бетону в балках із великими прольотами зрізу в середньому дорівнювали:  $\sigma_{cx} = -9,9 \text{ МПа}$ , у балках із середніми прольотами зрізу –  $\sigma_{cx} = -12,4 \text{ МПа}$ , із малими –  $\sigma_{cx} = -16,3 \text{ МПа}$ , тобто не досягали граничних значень.

Максимальні вертикальні стискальні напруження в бетоні у тих самих місцях прикладання зосереджених сил також незалежно від класу бетону майже утричі перевищували максимальні горизонтальні стискальні напруження і в середньому дорівнювали в балках із великими прольотами зрізу:  $\sigma_{cz} = -26,3 \text{ МПа}$ , із середніми –  $\sigma_{cz} = -34 \text{ МПа}$ , із малими –  $\sigma_{cz} = -54,7 \text{ МПа}$ . Ці величини свідчать про те, що локальні вертикальні стискальні напруження в бетоні у дослідях № 7 і 8 приблизно удвічі перевищували пікові призмові  $\sigma_{ck}$ .

Максимальні дотичні напруження в бетоні також спостерігали в місцях прикладання зосереджених сил і на опорах. У балках із великими прольотами зрізу –  $\tau_{cxz} = 9,0 \text{ МПа}$ , із середніми –  $\tau_{cxz} = 11,3 \text{ МПа}$ , із малими –  $\tau_{cxz} = 15,4 \text{ МПа}$ , що сягає  $0,5 \sigma_{ck}$  у балках № 7 і 8.

Аналізуючи прямі виміри деформацій бетону і базальтопластикової арматури, а також результати моделювання їхнього напружено-деформованого стану, стає очевидним, що руйнування дослідних зразків – балок, армованих *BFRP* із великими й середніми прольотами зрізу, відбувалося за небезпечними похилими тріщинами внаслідок розроблення і зрізу бетону над ними. При цьому розтягувальні напруження в поперечній арматурі *BFRP* не сягали межі текучості й дорівнювали відповідно  $0,1 f_{fk}$  і  $0,15 f_{fk}$ .

Руйнування балок із малими прольотами зрізу ( $a/h_0 = 1$ ) відбувалося як за небезпечними похилими тріщинами (досліди № 5, 6, 10), так і за похилими стислими смугами між зосередженими силами й опорами (досліди № 7, 8). При цьому в усіх випадках поперечна арматура у прольотах зрізу зазнавала стискальних напружень  $\sigma_{fvc} \cong -363 \text{ МПа} = -0,45 f_{fk}$ .

**Висновки.** Моделювання складного напружено-деформованого стану дослідних базальто-бетонних балок нелінійними скінчено-елементними розрахунками за допомогою програмного комплексу «ЛІРА-САПР» дає змогу відтворити результати експериментів, найімовірнішу схему роботи й руйнування та достовірно спрогнозувати їхню несучу здатність.

### Бібліографічний список

1. EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2 - Design of Concrete Structures. Part 1: General rules and rules, CEN, 2004. 225 p.
2. JSCE, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Tokyo, Japan : Japan Society of Civil Engineers, 1997.
3. ACI 440.1R-03, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, 2003.
4. CAN/CSA-S6-00, Canadian High Bridge Design Code, Canadian Standards Association, 2019.
5. CNR-DT 203/2006, Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars, Rome, Italy, 2006.
6. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу: ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012. Київ: Мінрегіонбуд, 2012.
7. ДСТУ Б В.2.6-145:2010 Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги. Україна, 2010.
8. Програма ЛІРА-САПР, МОНОМАХ-САПР – программы для расчета конструкций. Официальный сайт. URL: <https://www.liraland.ua> (дата звернення: 07.03.2018).
9. Fico R., Limit states design of concrete structures reinforced with frp bars. PHD Thesis, University of Naples Federico II, 2007.
10. Рахмонов А. Д. Прочность, жесткость и трещиностойкость неразрезных бетонных балок с комбинированным армированием: дисс. ... канд. технич. наук. Казань, 2015. 160 с.
11. Elavenit S., Saravanan S., Reddy R. Investigation of structural members with basalt rebar reinforcement as an. *Journal of Industrial pollution Control* 33. 2017. P. 1422–1429.
12. Serbescu A., Guadagnini M., Pilakoutas K. Mechanical characterization of basalt FRP rebars and long-term strength predictive model. *Journal of Composites for Construction*. 2015. 19(2).

Стаття надійшла 28.01.2020