

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.078.7

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.70-76](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.70-76)**Д.Б. Романенко**, викл. техн. дисциплін*ВСП «Рубіжанський фаховий коледж» ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», м. Рубіжне, Україна
e-mail: alpintel@ukr.net*

Чисельне дослідження міцності бібетонних армованих балок, що працюють на згин

Одним з методів відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних згинаних елементів є підсилення їх стиснутої зони. Це підсилення виконується шляхом влаштування надбетонки, зазвичай, із бетону іншого класу, ніж існуючий елемент. У роботі виконано чисельно-теоретичне дослідження положення нульової лінії у залізобетонних балках, виготовлених із бетонів різних класів у розтягнутій та стиснутій частинах поперечного перерізу.

бібетонні армовані балки, згин, чисельне дослідження

Постановка проблеми. Останнім часом в Україні значно підвищився обсяг монолітного будівництва, різноманітних об'єктів з використанням залізобетону, тому тема дослідження є актуальною [3]. Скороченням витрати цементу при цьому можливе за рахунок застосування в розтягнутій зоні елементів, що згинаються, бетону нижчого класу. Цей показник буде ще вищим при виконанні великопролітних монолітних балок зі значною висотою поперечного перерізу.

На даний час багато робіт присвячено вивченню комбінованого комплексного підсилення балок [4]. Але у той же час питання нових комбінованих (бібетонних) залізобетонних конструкцій розкрито не в достатній мірі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток номенклатури будівельних конструкцій передбачає як пошук принципово нових типів елементів з одного матеріалу чи у поєднанні декількох матеріалів для сумісної взаємовигідної їх роботи, так і вдосконалення існуючих будівельних виробів, а саме зменшення їх ваги при забезпеченні тієї ж несучої здатності, підвищення технологічності виготовлення тощо [11]. Це питання ще більш гостро стоїть у залізобетонних конструкціях, що працюють на згин, так як розтягнутий бетон не враховується у розрахунку загальної несучої здатності конструкції, а тільки підвищує її вагу, а отже і затрати на виготовлення. Саме тому заміна розтягнутого бетону у таких конструкціях на більш дешевий матеріал, наприклад, бетон меншого класу по міцності чи із пористими заповнювачами, є актуальною проблемою.

Свої роботи дослідженню підсилення залізобетонних конструкцій присвятили Л.В. Афанасьєва, А.Я. Барашиков [1-2], С.В. Бондаренко, Б.А. Боярчук, А.Б. Голишев [4], О.Ю. Єрьоменко [8], І.В. Задорожнікова, Д.Н. Лазовский, Д.В. Кочкар'юв [9], А.І. Мальганов, Мохамед Х.К. [10], Л.А. Мурашко, Н.М. Онуфрієв, Е.Р. Хіло [11], В.В. Душин і багато інших.

В існуючих публікаціях досліджень розглядалися підсилення залізобетонних конструкцій різними матеріалами. Виконано порівняння підсилення експериментально випробуваних різних балок: непідсилення, підсилені шаром сталевібробетону, полімер-

бетоном, армованим полімербетоном, дрібнозернистим бетоном і арматурою та інші. У порівнянні з непідсиленими зразками, усі способи підсилення значно збільшили несучу здатність. Для балок, підсилених шаром армованого сталевібробетону та полімербетону, несуча здатність збільшилася приблизно в 1,4 рази [1; 2; 10]. А в балках підсилених шаром армованого дрібнозернистого бетону показник збільшення несучої здатності дещо менше – близько 1,18 [8]. Підсилувати залізобетонні елементи можливо не лише збільшенням поперечного перерізу при обетонуванні, а і влаштуванням попереднього напруження у зоні розтягнутого бетону [12,13].

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо вирішеною частиною залишилось питання визначення впливу висоти розтягнутого бетону меншого класу на загальну несучу здатність залізобетонної конструкції, що працює на згин.

Метою даної роботи є чисельно-теоретичне визначення положення нульової лінії у однопролітних залізобетонних балках прямокутного поперечного перерізу із застосуванням різних бетонів у розтягнутій та стиснутій зонах; причому необхідно дослідити різне процентне співвідношення цих бетонів по висоті поперечного перерізу.

Виклад основного матеріалу. Як було зазначено, зменшення вартості залізобетонних конструкцій, що працюють на згин, за рахунок застосування у розтягнутій зоні бетонів меншого класу, завжди є актуальною задачею. З огляду на розходження міцності бетону при роботі на розтяг і стиск, а так само характер тріщиноутворення по нормальних перетинах елементів, що згинаються, потрібно поставити задачу дослідження міцності балок виготовлених з бетонів різних класів. Для цього змодельовані балки, розрахункова схематична схема яких показана на рис. 1.

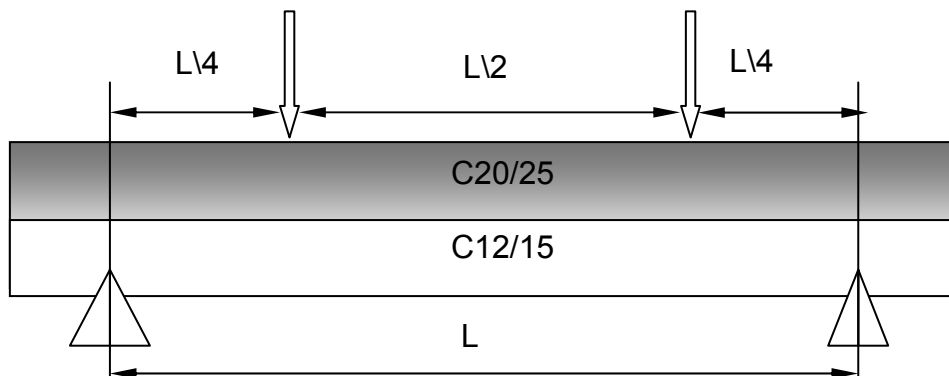


Рисунок 1 – Розрахункова схематична схема досліджуваних бібетонних армованих балок
Джерело: розроблено автором

Згідно поставленій задачі, а саме оптимізації геометричних параметрів розташування бетонів різних класів по висоті перерізів згинаних залізобетонних конструкцій, було змодельовані та проаналізовані результати розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонних однопролітних балок прямокутного поперечного перерізу розміром $b \times h = 100 \times 150$ мм. Довжина балок складала 1200 мм. Верхня стиснута частина балок моделювалася із бетону класу C20/25, а нижня розтягнута частина – із бетону класу C12/15 (див. рис. 1). Армвання балки виконувалось двома арматурними стержнями $\varnothing 12$ мм періодичного профілю класу A400C у розтягнутій зоні. Конструктивна арматура каркасу балки під час моделювання не враховувалась.

Завантажувалися балки двома силами рівновіддаленими від опор, таким чином, щоб посередині балки виникала ділянка із чистим згином. На кінцях балки прикладались шарнірні опори для яких змодельовані наступні граничні умови:

заборона переміщень у вертикальній площині XZ і дозволені переміщення по горизонтальній поздовжній осі Y.

Для матеріалів (бетонів двох класів та арматури) задавалися модулі пружності E та G , коефіцієнта Пуассона ν . Для врахування повних діаграм деформування матеріалів, задавалися функціональні залежності згідно ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування» [5]. Для проведених паралельно із теоретичними експериментальними дослідженнями, склад бетонів та визначення їх міцності за контрольними зразками визначалися згідно ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу» [7] та ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками» [6].

У програмному комплексі LIRA була змодельована балка таким чином, що 156 елементів були задані жорсткістю бетону класу C20/25 (у стиснутій зоні), а 78 елементів задані жорсткістю бетону класу C12/15 (у розтягнутій зоні). Тобто створена модель балки з різних класів бетону (див. рис. 2). Отримані результати розрахунку досліджуваних бібетонних балок у програмному комплексі LIRA приведені на рис. 3.

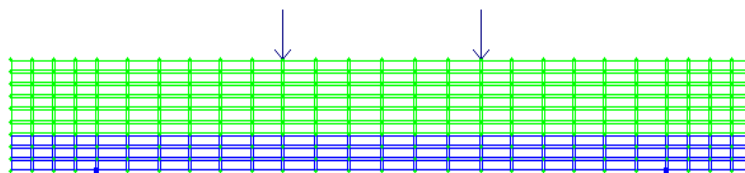


Рисунок 2 – Схема змодельованої бібетонної балки у програмному комплексі Lira з бетонів класу C20/25 і C12/15 зі співвідношенням висот $h_{ст.} / h_{розт.} = 2$

Джерело: розроблено автором

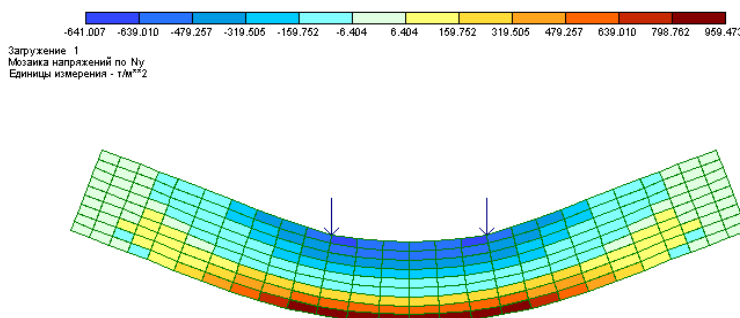


Рисунок 3 – Результати розрахунку змодельованої бібетонної балки у програмному комплексі LIRA з бетонів класу C20/25 і C12/15

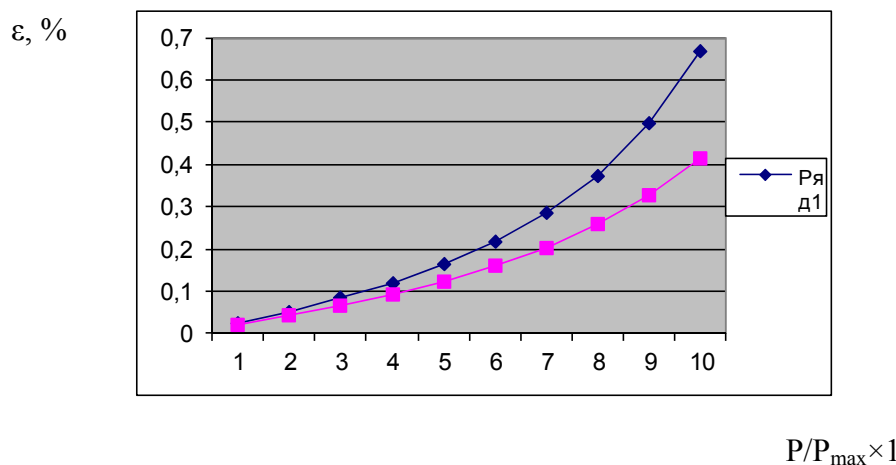
Джерело: розроблено автором

Також була змодельована балка з однорідного бетону класу C12/15, з такими ж геометричними характеристиками, як і вище описана. З отриманих результатів моделювання знайдені максимальні відносні деформації елементу 135 (цей вузол знаходиться посередині балки у розтягнутій зоні і є одним із найбільш «слабких» елементів в досліджуваних балках). Відносні деформації цього елементу на кожній із ступеня навантаження занесені до таблиці 1. Графічно зміна відносних деформацій вказаного елементу комбінованої бібетонної та бетонної балок показано на рис. 4.

Таблиця 1 – Відносні деформації (%) найбільш напруженого елемента посередині прольоту балки

Балка, Елемент 135	Навантаження P/P_{max}									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Бетонна балка	0.02425	0.05164	0.08301	0.11957	0.16308	0.21631	0.28384	0.37345	0.49699	0.66657
Бібетонна балка	0.01963	0.04128	0.0654	0.0926	0.12374	0.16008	0.20349	0.25692	0.3251	0.41556

Джерело: розроблено автором



Ряд 1 – бібетонна, ряд 2 – бетонна балки

Рисунок 4 – Графічне зображення отриманих результатів дослідження – зміни відносних деформацій найбільш напруженого скінченного елемента посередині балки

Джерело: розроблено автором

Для порівняння скінченно-елементний аналіз моделей бібетонних балок із врахуванням фізичної нелінійності бетону, геометричної нелінійності роботи композитного залізобетонного стержня та реологічних властивостей бетону виконано в системі NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) Femap 10.1.1 SC 32bit / 64 bit. Були змодельовані, розраховані та виконані аналізи розрахунків балок із різним процентним співвідношенням бетонів класів C12/15 та C20/25. На рис. 5 показано три типи балок із різним типом співвідношення бетонів різних класів.

При виборі типу та розмірів скінченних елементів (СЕ), на які розбивалась створена модель, враховано час створення об'ємної скінченно-елементної сітки, необхідний дисковий простір для проведення програмним комплексом NASTRAN розрахунку, збіжність отриманих результатів при розрахунку моделей, розбитих різними СЕ. Під час порівняння збіжності отриманих результатів вирішено розбивати модель на тетраедри із стороною рівною 1-2% від загальної довжини окремого елемента зразка. Такі розміри СЕ забезпечують середньоквадратичне відхилення всіх розрахунків до 0,5%. При дослідженні моделей зразків об'ємні моделі стали та бетону створювалися окремо, а потім виконувалося об'єднання співпадаючих вузлів елементів.

У результаті даних розрахунків отримано графіки положення нульової лінії (зони розтягнутого бетону) по довжині балок. Найбільш інформативні результати розрахунку показані на графічному рис. 6. Слід відмітити, що деякі явні неточності у припорних зонах обумовлені задаванням граничних умов тільки на нижній частині

балок. Тому на бокових гранях балок відсутні напруження, а отже і нульова лінія прямує до нижніх змодельованих опорних частин.

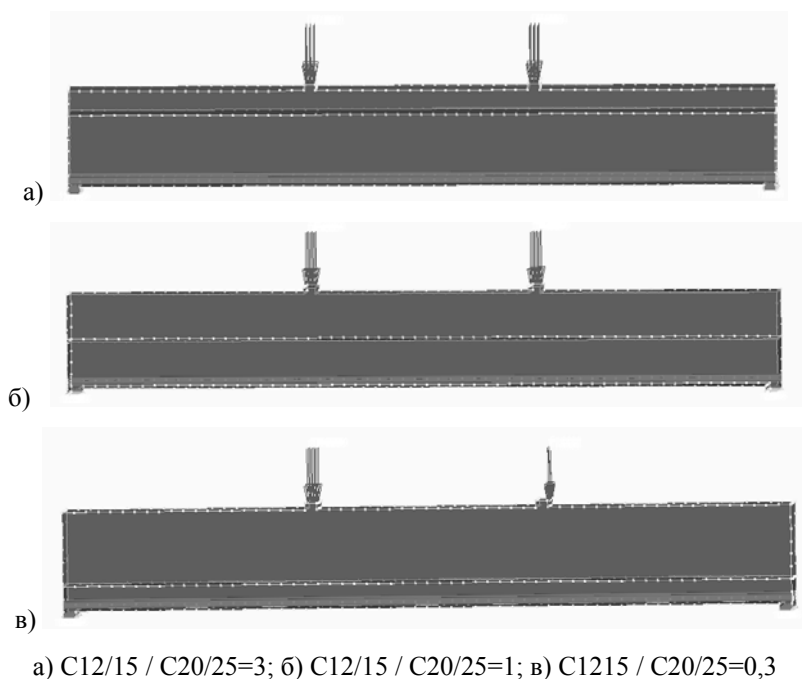


Рисунок 5 – Моделі аналізованих бібетонних балок із співвідношенням класів розтягнутого до стиснутого бетонів

Джерело: розроблено автором

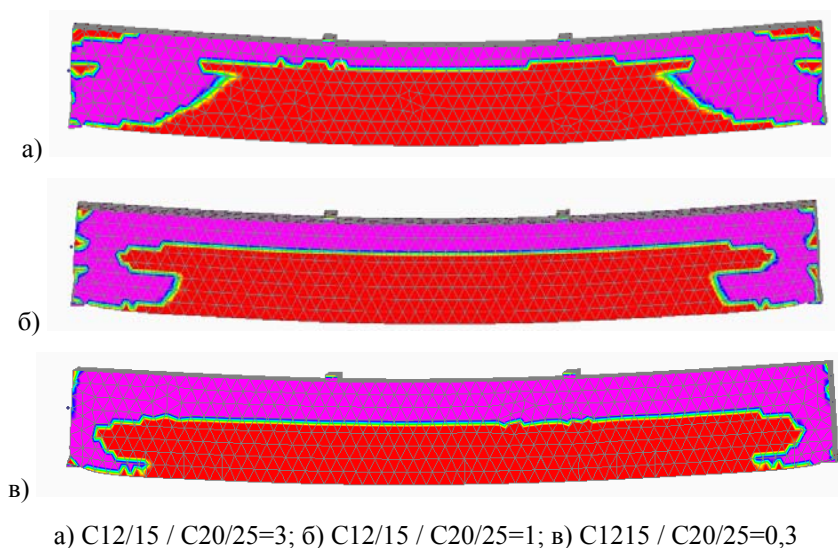


Рисунок 6 – Положення нульової лінії у бібетонних балках із співвідношенням класів розтягнутого до стиснутого бетонів

Джерело: розроблено автором

Висновки. З отриманих досліджень видно, що бібетонні балки в порівнянні з бетонними балками, витримують більше навантаження. Отже зменшується переріз залізобетонної балки і зменшується її кошторисна вартість. Різне співвідношення розтягнутого та стиснутого бетонів по висоті поперечного перерізу бібетонних балок, по різному впливає на загальну несучу здатність балок. У перспективі подальших

розробок за даним напрямком потрібно отримати оптимальні співвідношення міцності бетону розтягнутої і стиснутої зон при різних відношеннях їх товщини.

Список літератури

1. Барашиков А.Я., Блалі ель Мустафа. Вплив способу підсилення на міцність, тріщиностійкість та прогини залізобетонних балок. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоeconomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2003. Вип. 9. С. 416-424.
2. Барашиков А.Я., Сунак О.П., Боярчук Б.Я. Експериментальні дослідження згинальних залізобетонних елементів, підсилені різними способами. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоeconomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2000. Вип. 5. С. 294-297.
3. Гарькава О.В., Гасенко А.В. Визначення міцності залізобетонних колон при косому стиску. *Наука та будівництво*. 2017. Вип.4 (14). С. 29-35.
4. Голишев А.Б., Ткаченко Й.Н. Підсилення несучих залізобетонних конструкцій виробничих будівель та просядочних основ. К: Логос, 2004. 219 с.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ: М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2009.
6. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Київ: Мінрегіонбуд України.
7. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ: Мінрегіонбуд України.
8. Єрьоменко О.Ю. Ефективність варіантів підсилення у стиснутій зоні залізобетонних елементів, що працюють на згин: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.23.01. Київ, 2006. 20 с.
9. Кочкар'юв Д.В. Інженерні методи розрахунку залізобетонних статично невизначених стержневих систем. *Зб. наук. пр. УкрДУЗТ*. 2017. Вип. 170. С. 98-104.
10. Мохамед Х.К., Барашиков А.Я., Мурашко Л.А. Міцність залізобетонних нерозрізних балок після їх підсилення. К: Вища школа, 1995. 591 с.
11. Хіло Е.Р., Попович Б.С. Підсилення залізобетонних конструкцій із зміною їх розрахункового напруженого стану. Львів: Вища школа, 2005. 38 с.
12. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V. & Andriets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. Vol. 77. P. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92>
13. Wang C., Shen Y., Yang R. & Wen Z. Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 6, 1467940. <https://doi.org/10.1155/2017/1467940>

References

1. Barashykov, A.Ia. & Blali el Mustafa (2003). Vplyv sposobu pidsylennia na mitsnist', trishynostijkist' ta prohyny zalizobetonnykh balok [The influence of the method of reinforcement on the strength, crack resistance and deflection of reinforced concrete beams]. *Zb. nauk. pr. NUVHP: Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy – Coll. of science Ave. NUVHP: Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 9, 416-424 [in Ukrainian].
2. Barashykov, A.Ia., Sunak, O.P. & Boiarchuk, B.Ia. (2000). Eksperymental'ni doslidzhennia zghynal'nykh zalizobetonnykh elementiv, pidsylenykh riznymy sposobamy [Experimental studies of bending reinforced concrete elements reinforced by various methods]. *Zb. nauk. pr. NUVHP: Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy – Coll. of science Ave. NUVHP: Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 5, 294-297 [in Ukrainian].
3. Har'kava, O.V. & Hasenko, A.V. (2017). Vyznachennia mitsnosti zalizobetonnykh kolon pry kosomu stysku [Determination of the strength of reinforced concrete columns under oblique compression]. *Nauka ta budivnytstvo – Science and construction*, 4 (14), 29-35 [in Ukrainian].
4. Holyshev, A.B. & Tkachenko, Y.N. (2004). Pidsylennia nesuchykh zalizobetonnykh konstruktсий vyrobnychykh budivel' ta prosadochnykh osnov [Reinforcement of load-bearing reinforced concrete structures of industrial buildings and subsidence foundations] Logos [in Ukrainian].
5. Betonni ta zalizobetonni konstruktсии. Osnovni polozhennia proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions of design]. (2009). *DBN V.2.6-98:2009*. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [in Ukrainian].

6. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrol'nyimi zrazkamy [Building materials. Concretes. Methods of determination of strength according to control samples]. (2010). *DSTU B V.2.7-214:2009 from September 1, 2010*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
7. Budivel'ni materialy. Betony. Pravyla pidboru skladu [Building materials. Concretes. Rules of composition selection]. (2010). *DSTU B V.2.7-215:2009 from September 1, 2010*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
8. Yer'omenko, O.Yu. (2006). Efektyvnist' variantiv pidsylennia u stysnutij zoni zalizobetonnykh elementiv, scho pratsiuut na zghyn [Effectiveness of reinforcement options in the compressed zone of reinforced concrete elements operating in bending]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
9. Kochkar'ov, D. V. (2017). Inzhenerni metody rozrakhunku zalizobetonnykh statychno nevyznachnykh sterzhnevnykh system [Engineering methods of calculating reinforced concrete statically indeterminate rod systems]. *Zb. nauk. pr. UkrDUZT – Coll. of science UkrDUZT Ave, 170*, 98-104 [in Ukrainian].
10. Mokhamed, Kh.K., Barashykov, A.Ia. & Murashko, L.A. (1995). Mitsnist' zalizobetonnykh nerozriznykh balok pislia ikh pidsylennia [Strength of reinforced concrete uncut beams after their reinforcement]. Kyiv :Vyscha shkola [in Ukrainian].
11. Khilo, E.R. & Popovych, B.S. (2005). Pidsylennia zalizobetonnykh konstruksij iz zminoiu ikh rozrakhunkovoho napruzhenoho stanu [Strengthening of reinforced concrete structures with a change in their estimated stress state]. Lviv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
12. Pavlikov, A.M., Harkava, O.V., Hasenko, A.V. & Andriiets, K.I. (2019). Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Vol. 77*, P. 84-92 <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92> [in English].
13. Wang, C., Shen, Y., Yang, R. & Wen, Z. (2017). Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering, Vol. 6*, 1467940 <https://doi.org/10.1155/2017/1467940> [in English].

Dmytrii Romanenko, Lecturer of technical disciplines

VSP «Rubizhan Vocational College» DZ «Luhansk National University named after Taras Shevchenko», Rubizhne, Ukraine

Numerical study of the strength of bi-concrete reinforced bent beams

One of the methods of restoring the operational qualities of reinforced concrete bent elements is to strengthen their compressed zone. This reinforcement is performed by placing a concrete overlay, usually of a different grade of concrete than the existing element. In existing research publications, reinforcement of reinforced concrete structures with various materials was considered. A comparison of the reinforcement of experimentally tested different beams was made: unreinforced, reinforced with a layer of steel fiber concrete, polymer concrete, reinforced polymer concrete, fine-grained concrete and reinforcement, and others. Compared to unreinforced samples, all reinforcement methods significantly increased the load-bearing capacity. For beams reinforced with a layer of reinforced steel fiber concrete and polymer concrete, the bearing capacity increased by approximately 1.4 times. And in beams reinforced with a layer of reinforced fine-grained concrete, the indicator of the increase in bearing capacity is slightly less - about 1.18.

In the work, a numerical and theoretical study of the position of the zero line in reinforced concrete beams made of concrete of different classes in the stretched and compressed parts of the cross section is performed. According to the task, namely the optimization of the geometric parameters of the location of concrete of different classes according to the height of the sections of bent reinforced concrete structures, the results of the calculation of the stress-strain state of reinforced concrete single-span beams with a rectangular cross-section of size $b \times h = 100 \times 150$ mm were simulated and analyzed. The length of the beams was 1200 mm. The upper compressed part of the beams was modeled from C20/25 class concrete, and the lower stretched part - from C12/15 class concrete. The beam was reinforced with two reinforcing rods $\varnothing 12$ mm of periodic profile class A400C in the stretched zone. Structural reinforcement of the beam frame was not taken into account during modeling.

From the obtained studies, it can be seen that bi-concrete beams, in comparison with concrete beams, withstand more load. Therefore, the cross-section of the reinforced concrete beam decreases and its estimated cost decreases. The different ratio of stretched and compressed concrete to the height of the cross-section of bi-concrete beams has different effects on the overall load-bearing capacity of the beams. In the perspective of further developments in this direction, it is necessary to obtain optimal ratios of the concrete strength of the stretched and compressed zones at different ratios of their thickness.

Bi-concrete reinforced beams, bending, numerical study

Одержано (Received) 18.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023