

DOI: 10.32347/2786-7269.2024.7.297-309

УДК 624.04

д.т.н., професор Сур'янінов М.Г.,
sng@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221,Єсванджия В.Ю.,
vakhtanhyes22@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1151-3560
Одеська державна академія будівництва та архітектури

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ, ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ТА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ПОШКОДЖЕНОЇ БАЛКИ, ПІДСИЛЕНОЇ ФІБРОБЕТОНОМ У СТИСНУТІЙ ЗОНІ

Наведено результати дослідження несучої здатності, деформативності та тріщиноустійкості пошкодженої балки, підсиленої фібробетоном у стиснутій зоні. Розглядається балка з 40% пошкодженням. Дослідження проходили у два етапи. На першому етапі проведені випробування призм і кубів з бетону та фібробетону, які показали, що введення до складу бетону сталевих фібрових волокон у кількості 2 % за обсягом збільшує межу міцності на стиск на 15,3%. Початковий модуль пружності фібробетону означеної суміші на 38,0% вище, ніж у звичайного бетону такого складу. За результатами експериментальних досліджень призм побудовано діаграму деформування бетону, характер зміни відносних лінійних деформацій фібробетону, а також графіки, що відображають порівняння характеру деформування бетону та фібробетону. На другому етапі на спеціально розробленому стенді проведені випробування зразку балки. Перед бетонуванням в зоні планового пошкодження встановлювався пінопластовий вкладиш, форма і розміри якого відповідали плановому пошкодженню. Після набору бетоном 70% міцності вкладиш видаляли, а утворену порожнину заповнювали 2% сумішшю фібробетону. Встановлено, що балка, переріз якої на 40% пошкоджено в середній стиснутій зоні, а форма пошкодження має вигляд, близький до прямокутного, має несучу здатність 92,0 кН, або 93,9 % несучої здатності непошкодженої балки. Тріщиноутворення почалося на 4-му етапі навантаження, коли величина навантаження становила 26,0кН, тобто 28,3 % несучої здатності пошкодженої балки. При цьому в зоні чистого вигину утворилося 5 тріщин. На п'ятому етапі з'явилися ще дві тріщини. На 8 та 9 етапах навантаження утворилися ще 4 тріщини. Загалом утворилося 12 тріщин. Максимальна кінцева ширина розкриття тріщин становила 0,6 мм. Таким чином, посилення балки з 40% пошкодженням у стиснутій зоні розглянутим у роботі способом дозволяє досягти її несучої здатності, яка становить 93,9% несучої здатності неушкодженої балки.

Ключові слова: пошкоджена балка; сталевібробетон; експеримент; несуча здатність; тріщина.

Вступ. Пошкодження несучих будівельних конструкцій, зокрема, балок, внаслідок різних чинників — дуже поширене явище. На жаль, зараз у нашій країні до традиційних причин пошкоджень додалися пошкодження, викликані наслідками бойових дій. І таких пошкоджень дуже багато. Не завжди необхідна заміна пошкодженої конструкції, часто можна обмежитися її посиленням. У масштабах країни такий підхід, безперечно, призводить до значного економічного ефекту. Існують різні способи підсилення. Поява нових матеріалів обумовила нові, більш ефективні такі способи. Великої популярності набули підсилення будівельних конструкцій композитними матеріалами, армованими вуглецевими, скляними та іншими волокнами. Безперечними їхніми перевагами являються підвищена міцність, стійкість до агресивних впливів оточуючого середовища та ін. Але тут є і деякі недоліки, насамперед, технологічні складнощі та виробництво необхідних композитів в наших умовах.

У цьому зв'язку перспективним напрямком уявляється армування пошкодженої зони сталевібробетоном.

Аналіз попередніх досліджень. Різним способам підсилення залізобетонних балок присвячено чимало робіт [1-10]. Підсиленню балок у стиснутій зоні присвячені роботи [7, 11-15] та ін.

Розглянемо деякі роботи останніх років, які характеризуються застосуванням нових високоефективних будівельних матеріалів, таких, як міцні бетони, сталевібробетон, полімербетон, базальтобетон.

У роботі [16] наведено результати досліджень посилення пошкоджених залізобетонних балок різними типами ламінатів з армованого волокном полімеру. Випробувано 14 вільно опертих балок прямокутного перерізу при початковому навантаженні, що перевищує навантаження початку тріщиноутворення. Дослідження [17] присвячено посиленню залізобетонних балок композитом з армованого полімеру волокном (ЕВ-FRP). Балки були випробувані при триточковому навантаженні. Випробування показали, що міцність на зсув посиленних балок збільшилася у середньому на 95% при використанні двох шарів ЕВ-CFRP та на 65% при використанні одного шару. У роботі [18] представлені результати експериментів з пошкодженими залізобетонними балками, посиленними за допомогою різного компонування зовнішніх ламінатів з армованого вуглецевим волокном полімеру (CFRP). У роботі [19] вивчалися залізобетонні балки, посилені сталевібробетоном. Отримано експериментальні результати з оцінки міцності, жорсткості,

тріщиностійкості для 4 досліджуваних зразків. Встановлено, що застосування оболонки зі сталевібробетону збільшує руйнівне навантаження на 20 %, жорсткість – у 3,4–11 разів, тріщиностійкість – у 2,6 рази. Дослідження [20] присвячено визначенню здатності залізобетонних балок зі сталевим волокном і без нього поглинати енергію під час вибухового навантаження. Використання оболонки з фібробетону для посилення залізобетонних балок досліджено [21] за допомогою натурних випробувань на балках довжиною 4,55 м. Оболонка з цього матеріалу товщиною 40 мм була нанесена безпосередньо на поверхню балки. Вивчено як посилення, так і ремонт залізобетонних балок. Мета роботи [22] — визначити, чи ефективний надвисокоміцний фібробетон (UHPRC) при ремонті пошкоджених бетонних колон.

Щодо нормативної бази. В Україні основним нормативним документом, який регламентує ремонт і підсилення конструкцій, є ДСТУ Б В.3.1-2:2016 [23]. Цей стандарт поширюється на проектування, виконання і приймання робіт з ремонту і підсилення несучих і огорожувальних бетонних, залізобетонних, кам'яних, армокам'яних, сталевих і дерев'яних конструкцій і фундаментів, а також основ будівель і споруд, в тому числі в особливих умовах експлуатації. Але, на жаль, в ньому навіть не згадується посилення балок сталевібробетоном.

Мета. Метою роботи було дослідження несучої здатності пошкодженої балки, яку у стиснутій зоні посилили сталевібробетоном.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводились на базі лабораторії кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури. Для виготовлення зразків матеріалу при замішуванні бетонної маси рівномірно додавалася фібра, загальний обсяг якої становив 2% обсягу виробу. Проведені попередні дослідження призм та кубів, відповідно до нормативних документів [24]. Для дослідження використано методи математичної статистики, експериментальні методи механіки.

Результати та обговорення. За результатами експериментальних досліджень призм побудовано діаграму деформування бетону, характер зміни відносних лінійних деформацій фібробетону, а також графіки, що відображують порівняння характеру деформування бетону та фібробетону (рис. 1).

Після обробки методами математичної статистики первинних показників, отриманих за результатами випробувань призм та кубів, були отримані наступні характеристики:

– для фібробетону:

щільність – $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$;

початковий модуль пружності – $E = 3,6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$;

коефіцієнт Пуассона – $\mu = 0,22$;

– для бетону:

щільність – $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$;

початковий модуль пружності – $E = 2,6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$;

коефіцієнт Пуассона – $\mu = 0,2$.

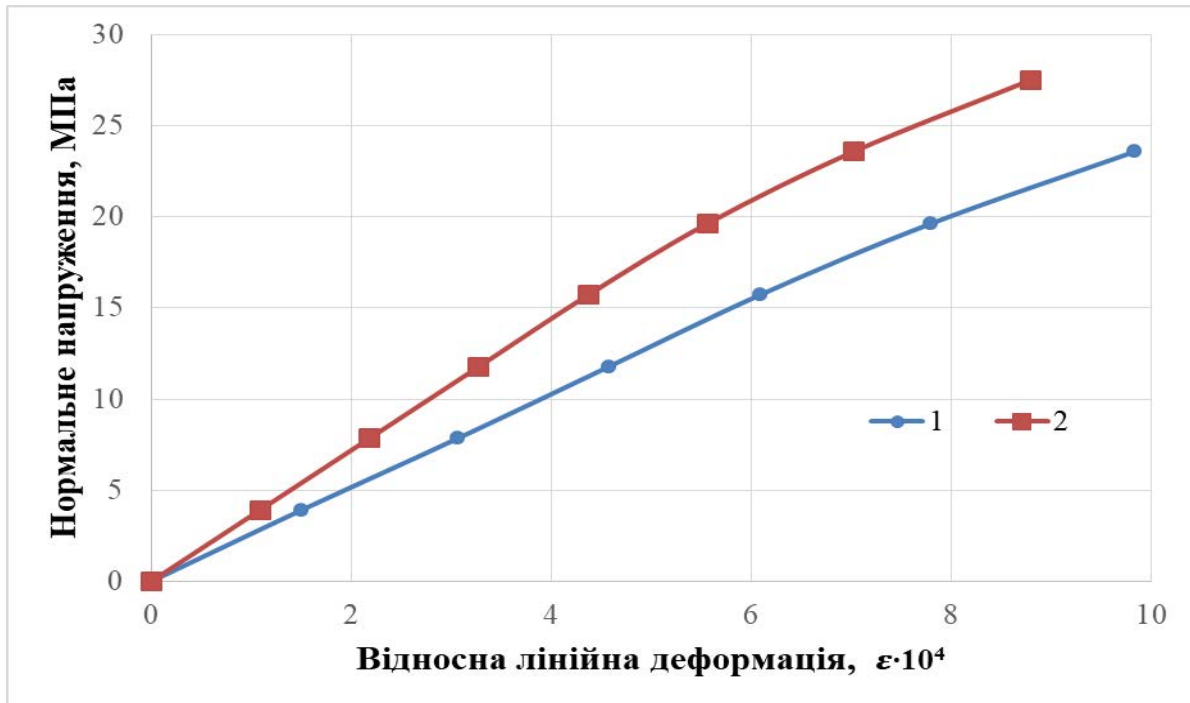


Рис. 1. Порівняння характеру деформування бетону (1) та фібробетону (2)

Випробування зразків матеріалів показали, що введення до складу бетону сталевих фібрових волокон у кількості 2 % за обсягом збільшує межу міцності на стиск на 15,3%.

Початковий модуль пружності фібробетону означеної суміші на 38,0% вище, ніж у звичайного бетону такого складу.

Співвідношення між деформаціями бетонного та сталеві фібробетонного зразків за даними тензодатчиків та індикаторів виявилися приблизно однаковими, що дозволяє з достатньою точністю визначити не тільки деформації, але й характеристики даних матеріалів. Початковий модуль пружності при введенні в суміш сталевих фібри зріс, що зумовило зниження деформативності матеріалу, а це дуже важливо при розрахунках другого граничного стану. Коефіцієнт Пуассона при тому змінився несуттєво. Повна абсолютна деформація сталеві фібробетонного зразка склала 71% від аналогічної деформації бетонної призми при однаковому навантаженні, близькому до руйнівного. Цей факт дозволяє прогнозувати зниження значень прогинів та ширини розкриття тріщин у конструкціях, виконаних із сталеві фібробетону щодо залізобетонних конструкцій. З отриманих результатів випливає, що характеристики міцності сталеві фібробетону вище, ніж бетону аналогічного

складу. Останнє дозволяє збільшити несучу здатність сталевібробетонних конструкцій щодо бетонних при однакових розмірах.

Також спостерігається важлива відмінність у характері руйнування випробуваних кубів і призм. Якщо бетонний зразок руйнувався за класичним сценарієм, тобто було характерне крихке руйнування з розколюванням на частини, то зразок зі сталевібробетону не змінив геометричної форми і після вичерпання своєї несучої здатності. Єдина помітна відмінність до та після випробування – наявність тріщин та збільшення ребра зразка у напрямку, перпендикулярному площині дії навантаження. У місцях розтріскування видно часткове висмикування фібри з бетонної матриці.

Випробування зразку балки проводилися на спеціально розробленому стенді (рис. 2). Плоско-поперечний вигин середньої частини випробовуваної балки створюється за допомогою гідравлічного домкрата і металевої балки двотаврової траверсою, що передає на балку дві рівні зосереджені сили.

У процесі випробувань фіксувалося навантаження, що передається на балку, прогини та деформації окремих волокон бетону та характер тріщиноутворення.

Навантаження прикладали ступенями по 0,05 від руйнуючого, величину якого визначили в ході попередніх досліджень.



Рис. 2. Випробувальний стенд

За кожним ступенем навантаження слідувала витримка 8-10 хвилин. Між ступенями відстежувався процес початку та розвитку тріщиноутворення. Прогини вимірювали за допомогою прогиноміру Максимова, а деформації — індикаторами годинного типу з ціною поділу 0,01 мм. Індикатори

розташовували у характерних зонах роботи балки. Перші чотири — в середній частині балки, де є чистий вигин. Ще 6 індикаторів у зонах передачі навантаження. База вимірів деформацій усіх індикаторів — 24 см.

Досліджено посилення фібробетоном балки, переріз якої на 40% пошкоджено в середній стиснутій зоні (рис. 3).

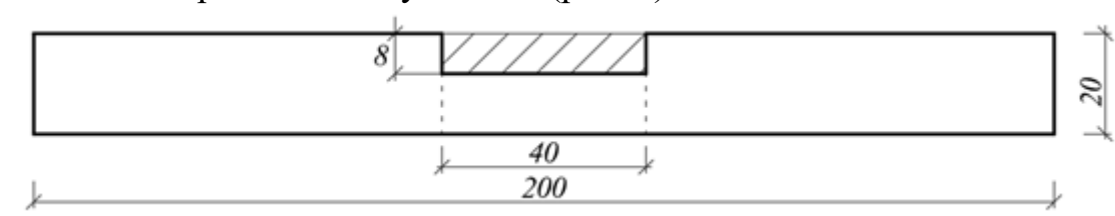


Рис. 3. Схема балки, пошкодженої у стиснутій зоні/

Дослідження проводили на балках прямокутного перерізу розмірами 200x120мм, армованих двома вертикальними каркасами.

Перед бетонуванням у зоні пошкодження встановлювався пінопластовий вкладиш, форма та розміри якого відповідали пошкодженню. Після набору бетоном 70% міцності вкладиш витягувався, а порожнина, що утворилася, заповнювалася 2% сумішшю з фібробетону. Несуча здатність посиленої балки склала 92,0 кН, або 93,9 % несучої здатності непошкодженої балки. Графік залежності відносної поздовжньої деформації від навантаження для лівої опорної частини балки, наведено на рис. 4, а для зони чистого згину — на рис. 5.

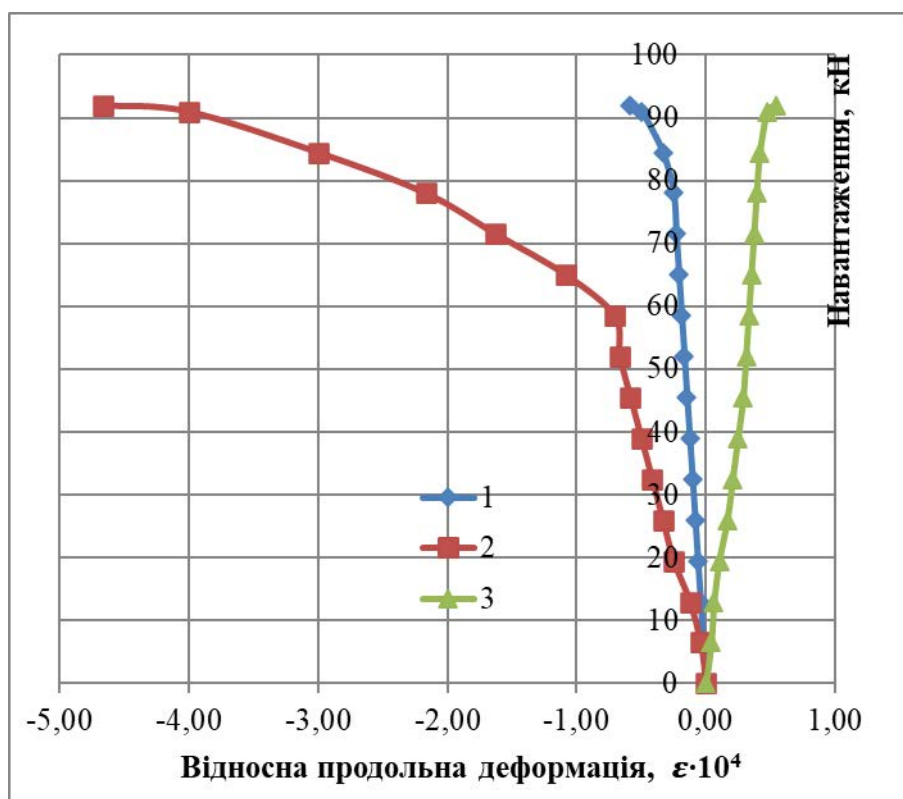


Рис. 4. Залежність відносної поздовжньої деформації від навантаження для лівої опорної частини балки за показаннями індикаторів 1, 2, 3

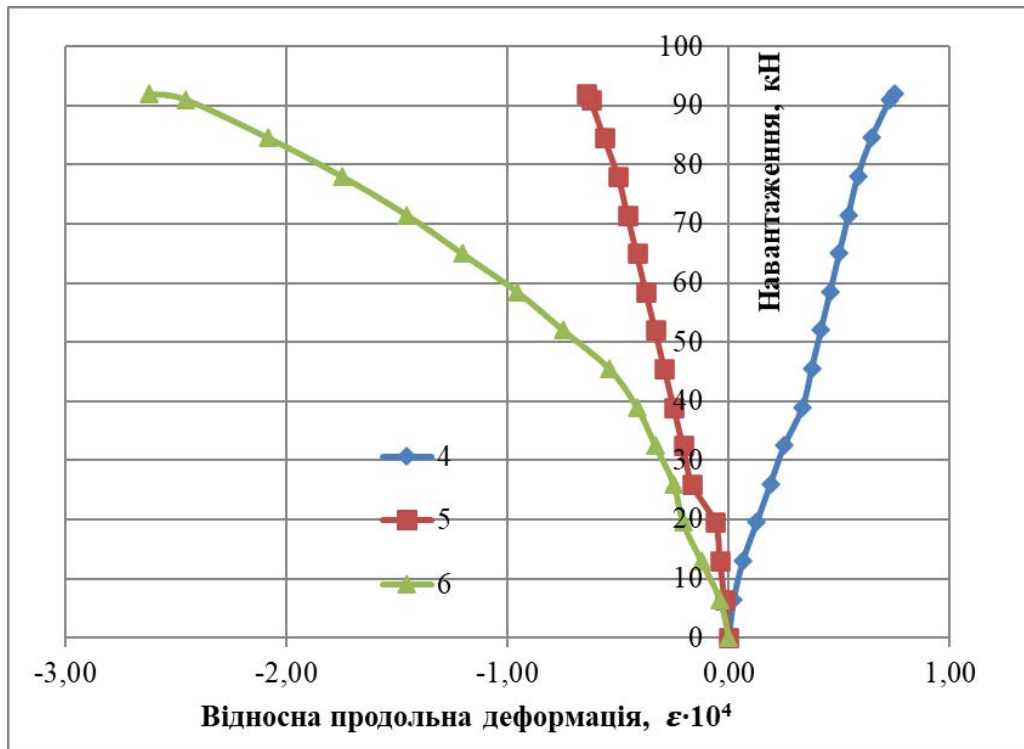


Рис. 5. Залежність відносної поздовжньої деформації від навантаження для зони чистого згину балки за показаннями індикаторів 4, 5, 6

Тріщиноутворення почалося на 4-му етапі навантаження, коли величина навантаження становила 26,0кН, тобто 28,3 % несучої здатності пошкоджені балки. При цьому в зоні чистого вигину утворилося 5 тріщин. На п'ятому етапі з'явилися ще дві тріщини. На 8 та 9 етапах навантаження утворилися ще 4 тріщин. Загалом утворилося 12 тріщин. Максимальна кінцева ширина розкриття тріщин становила 0,6 мм.



Рис. 6. Утворення тріщин у пошкодженій балці

Утворення тріщин (рис. 6) та ширина їх розкриття на всіх етапах навантаження наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Тріщини у пошкодженій балці

Ступінь навантаження	Величина навантаження, кН	Номер тріщини	Остаточна ширина розкриття, мм
1	2	3	4
1	6,5		
2	13,0		

1	2	3	4
3	19,5		
4	26,0	1-6	1— 0,25; 2, 4 — 0,2; 3,5 — 0,1; 6 — 0,05
5	32,5	7-8	7 — 0,1; 8 — 0,05
6	39,0		
7	45,5		
8	52,0	9-10	9 — 0,2; 10 — 0,15
9	58,5	11-12	11 — 0,6; 12 — 0,25
10	65,0		
11	71,5		
12	78,0		
13	84,5		
14	91,0		
15	92		

Висновки

Таким чином, проведені випробування призм і кубів з бетону та фібробетону показали, що введення до складу бетону сталевих фібрових волокон у кількості 2 % за обсягом збільшує межу міцності на стиск на 15,3%. Початковий модуль пружності фібробетону означеної суміші на 38,0% вище, ніж у звичайного бетону такого складу.

Встановлено також, що балка, переріз якої на 40% пошкоджено в середній стиснутій зоні, а форма пошкодження має вигляд, близький до прямокутного, має несучу здатність 92,0 кН, або 93,9 % несучої здатності непошкодженої балки. Тріщиноутворення почалося на 4-му етапі навантаження, коли величина навантаження становила 26,0кН, тобто 28,3 % несучої здатності пошкодженої балки. При цьому в зоні чистого вигину утворилося 5 тріщин. На п'ятому етапі з'явилися ще дві тріщини. На 8 та 9 етапах навантаження утворилися ще 4 тріщин. Загалом утворилося 12 тріщин. Максимальна кінцева ширина розкриття тріщин становила 0,6 мм. Можна стверджувати, що посилення балки з 40% пошкодженням у стиснутій зоні розглянутим у роботі способом дозволяє досягти її несучої здатності, яка становить 93,9 % несучої здатності неушкодженої балки.

Список літератури

1. Воскобійник П.П., Овсій Д.М., Воскобійник Є.П. Експериментальні дослідження відновлення експлуатаційних властивостей залізобетонних балок з метою їх повторного застосування. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Полтава: ПолтНТУ, 2016. № 32. С. 451-458.

2. Дослідження напружено-деформованого стану припорних ділянок залізобетонних балок при малоциклового навантаженні. В.М. Карпюк, К.І. Албу, О.К. Кіцак та ін. / Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вип. 51. С. 106-116.

3. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з дефектами та пошкодженнями, які викликають косий згин. О.П. Воскобійник, О.О. Кітаєв, Я.В. Макаренко, Є.С. Бугаєнко / Зб. наук праць (галузеве машинобудування, будівництво). Полтава: ПолтНТУ, 2011. Вип. 1(29). С. 87-92.
4. Клименко Е.В., Полянский К.В. Экспериментальное и теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния и несущей способности наклонных сечений поврежденных железобетонных балок прямоугольного сечения. Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Ин-т БелНИИС; редкол.: О.Н. Лешкевич [и др.]. Минск, 2019. Вып. 11. С. 147-163.
5. Клименко Є.В., Мельник М.В. До питання про роботу пошкоджених залізобетонних конструкцій. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса : ОДАБА, 2010, Вип. 39. С. 337-342.
6. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівельних споруд: навчальний посібник / З. Я. Бліхарський. Львів: Львівська політехніка, 2008. 108 с.
7. Семенюк С.Д. Экспериментальные исследования работы усиленных железобетонных балок при малоцикловом нагружении / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне, 2011. Вип. 22. С. 841 – 850.
8. Weidner S., Mrzigod A., Bechmann, R., Sobek W. Graue Emissionen im Bauwesen- Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. Beton-Und Stahlbetonbau, 2021, 116, 969–977.
9. Zdanowicz, Ł.; Seręga, S.; Tekieli, M.; Kwiecień, A. Polymer Flexible Joint as a Repair Method of Concrete Elements: Flexural Testing and Numerical Analysis. Materials 2020, 13, 5732.
10. Lye, H.L.; Mohammed, B.S.; Liew, M.; Wahab, M.; Al-Fakih, A. Bond behaviour of CFRP-strengthened ECC using Response Surface Methodology (RSM). Case Stud. Constr. Mater. 2019, 12, e00327.
11. Задорожнікова І.В. Експериментальні дослідження тріщиностійкості та прогинів балок підсиленних у стиснутій зоні / І.В. Задорожнікова // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2007. Вип. 15. С. 364 - 369.
12. Задорожнікова І.В. Підсилення стиснутої зони, як засіб відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних згинальних елементів: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / І.В. Задорожнікова // Луцьк, 2006. 140 с.
13. Семенюк С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагружений / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне, 2012. Вип. 23. С. 523 - 532.
14. Войцехівський О.В. Відпрацювання найбільш ефективної схеми відновлення залізобетонних балок сучасними ремонтними сумішами / О.В. Войцехівський, Т.І. Приндюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Рівне: НУВГП, 2004. Вип. 11. С. 357 - 361.
15. Гнідець Б.Г. Реконструкція і підсилення мостів зі зміною статичної схеми і регулюванням зусиль // Збірник наукових праць : Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Львів.: Каменяр, 2000. Вип. 4. С. 569 - 576.
16. Nabil F Grace, G. A. Sayed, A. K. Soliman, K. R. Saleh. Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. Aci Structural Journal. September 1999. 188(8).
17. Abdul Saboor Karzad. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer. March 2020. DOI:10.13140/RG.2.2.15656.52484
18. Ning Zhuang, Honghan Dong, Da Chen, Yeming Ma. Experimental Study of Aged and Seriously Damaged RC Beams Strengthened Using CFRP Composites. October 2018. Advances in Materials Science and Engineering 2018(6):1-9. DOI:10.1155/2018/6260724.

19. Radaikin Oleg, Sharafutdinov Linar. Reinforced concrete beams strengthened with steel fiber concrete. August 2020 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 890(1):012045. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012045.

20. Fatih Altun, Mehmet M. Köse, Canan Yilmaz, Kamuran Arı. Experimental investigation of reinforced concrete beams with and without steel fiber under explosive loading. January 2008. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences 14(6):419-426.

21. Martinola, Giovanni & Meda, Alberto & Plizzari, Giovanni & Rinaldi, Zila. (2010). Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. Cement & Concrete Composites - Cement Concrete Composites. 32. 731-739. 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001.

22. Alasmari, H. (2023). Rehabilitation of overload-damaged reinforced concrete columns using ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Open Engineering, 13(1), 20220437. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0437>.

23. ДСТУ Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. К., 2017. 72 с.

24. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.

Doctor of Science, Professor **Mykola Surianinov**,
Postgraduate **Vakhtanh Yesvandzhyia**
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

BEARING CAPACITY, DEFORMABILITY AND CRACK RESISTANCE OF A DAMAGED BEAM REINFORCED WITH FIBER CONCRETE IN THE COMPRESSED ZONE

The paper presents the results of the study of the load-bearing capacity, deformability and crack resistance of a damaged beam reinforced with fiber concrete in the compressed zone. A beam with 40% damage is considered. The research was conducted in two stages. At the first stage, tests of prisms and cubes made of concrete and fiber concrete were carried out, which showed that the introduction of steel fiber into the composition of concrete in the amount of 2% by volume increases the compressive strength by 15.3%. The initial modulus of elasticity of fiber concrete of the specified mixture is 38.0% higher than that of ordinary concrete of this composition. According to the results of experimental studies of prisms, a diagram of concrete deformation, the nature of changes in relative linear deformations of fiber concrete, as well as graphs showing a comparison of the nature of deformation of concrete and fiber concrete were constructed. At the second stage, the beam sample was tested on a specially designed stand. Before concreting, a foam insert was installed in the zone of planned damage, the shape and dimensions of which corresponded to the planned damage. After the concrete set to 70% strength, the liner was removed, and the formed cavity was filled with a 2% fiber concrete mixture. A beam with 40% cross-sectional damage in the mid-compression zone and a near-rectangular damage shape was found to have a load-bearing capacity of 92.0 kN, or

93.9% of the load-bearing capacity of an undamaged beam. Cracking started at the 4th loading stage, when the load value was 26.0kN, i.e. 28.3% of the bearing capacity of the damaged beam. At the same time, 5 cracks formed in the area of pure bending. At the fifth stage, two more cracks appeared. At the 8th and 9th loading stages, 4 more cracks formed. A total of 12 cracks were formed. The maximum final crack opening width was 0.6 mm. Thus, the strengthening of a beam with 40% damage in the compressed zone by the method considered in the work allows you to achieve its bearing capacity, which is 93.9% of the bearing capacity of an intact beam.

Keywords: damaged beam; reinforced concrete; experiment; bearing capacity; crack.

REFERENCES

1. Voskobiynyk P.P., Ovsii D.M., Voskobiynyk E.P. Experimental studies of restoration of operational properties of reinforced concrete beams with the aim of their reuse. Resource-saving materials, constructions, buildings and structures. Poltava: PoltNTU, 2016. No. 32. P. 451-458. {in Ukrainian}.

2. Study of the stress-strain state of the supporting areas of reinforced concrete beams under low-cycle loading. V.M. Karpyuk, K.I. Albu, O.K. Kitsak and others. / Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture. 2013. Issue 51. P. 106-116. {in Ukrainian}.

3. Experimental studies of reinforced concrete beams with defects and damage that cause oblique bending. O.P. Voskobiynyk, O.O. Kitaev, Y. V. Makarenko, E.S. Bugayenko / Collection of labor sciences (industry mechanical engineering, construction). Poltava: PoltNTU, 2011. Issue 1(29). P. 87-92. {in Ukrainian}.

4. Klymenko E.V., Polyansky K.V. Experimental and theoretical study of the stress-strain state and bearing capacity of inclined sections of damaged reinforced concrete beams of rectangular section. Problems of modern concrete and reinforced concrete: Sat. science tr. BelNIIS Institute; editor: O.N. Leshkevich [and others]. Minsk, 2019. Issue 11. P. 147-163. {in Ukrainian}.

5. E.V. Klymenko. M.V. Melnyk. To the question of the operation of damaged reinforced concrete structures. Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture, Odessa: ODABA, 2010, Vol. 39. P. 337-342. {in Ukrainian}.

6. Z.Ya. Blihar'skyi. Reconstruction and strengthening of construction structures: study guide / Z.Ya. Blihar'skyi. Lviv: Lviv Polytechnic, 2008. 108 c. {in Ukrainian}.

7. Semenyuk S.D. Experimental studies of the work of reinforced reinforced concrete beams under low-cycle loading / S.D. Semenyuk, Yu.G. Boloshenko // Resource-economical materials, constructions, buildings and structures: a collection of scientific papers. Rivne, 2011. Issue 22. P. 841 – 850. {in Ukrainian}.

8. Weidner S., Mrzigod A., Bechmann, R., Sobek W. Graue Emissionen im Bauwesen-Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. Beton-Und Stahlbetonbau, 2021, 116, 969–977. {in German}.

9. Zdanowicz, Ł.; Seręga, S.; Tekieli, M.; Kwiecień, A. Polymer Flexible Joint as a Repair Method of Concrete Elements: Flexural Testing and Numerical Analysis. Materials 2020, 13, 5732. {in English}

10. Lye, H.L.; Mohammed, B.S.; Liew, M.; Wahab, M.; Al-Fakih, A. Bond behaviour of CFRP-strengthened ECC using Response Surface Methodology (RSM). Case Stud. Constr. Mater. 2019, 12, e00327. {in English}

11. Zadoroznikova I.V. Experimental studies of crack resistance and deflections of beams reinforced in a compressed zone / I.V. Zadorozhnikova // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures. Rivne, 2007. Issue 15. P. 364 - 369. {in Ukrainian}.

12. Zadoroznikova I.V. Reinforcement of the compressed zone as a means of restoring the operational qualities of reinforced concrete flexural elements: thesis. Ph.D. technical Sciences: 05.23.01 / I.V. Zadorozhnikova // Lutsk, 2006. 140 p. {in Ukrainian}.

13. Semenyuk S.D. Calculation of the strength of normal cross-sections of curved reinforced concrete elements strengthened by the expansion of the compressed zone under the action of low-cycle loads / S.D. Semenyuk, Yu.G. Boloshenko // Resource-economical materials, constructions, buildings and structures: a collection of scientific papers. Rivne, 2012. Issue 23. P. 523 - 532. {in Ukrainian}.

14. Voytsechivskyi O.V. Development of the most effective scheme for the restoration of reinforced concrete beams with modern repair mixtures / O.V. Voitsechivskyi, T.I. Pryndiuk // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: Collection of scientific papers. Rivne: NUVHP, 2004. Issue 11. C. 357 - 361. {in Ukrainian}.

15. Hnidets B. G. Reconstruction and strengthening of bridges with a change in the static scheme and adjustment of forces // Collection of scientific works: Mechanics and physics of the destruction of building materials and structures. Lviv.: Kamenyar, 2000. Vol. 4. P. 569 - 576. {in Ukrainian}.

16. Nabil F Grace, G.A. Sayed, A.K. Soliman, K.R. Saleh. Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. Aci Structural Journal. September 1999. 188(8). {in English}

17. Abdul Saboor Karzad. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer. March 2020. DOI:10.13140/RG.2.2.15656.52484. {in English}

18. Ning Zhuang, Honghan Dong, Da Chen, Yeming Ma. Experimental Study of Aged and Seriously Damaged RC Beams Strengthened Using CFRP Composites. October 2018. *Advances in Materials Science and Engineering* 2018(6):1-9. DOI:10.1155/2018/6260724. {in English}

19. Radaikin Oleg, Sharafutdinov Linar. Reinforced concrete beams strengthened with steel fiber concrete. August 2020 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 890(1):012045. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012045. {in English}

20. Fatih Altun, Mehmet M. Köse, Canan Yilmaz, Kamuran Ari. Experimental investigation of reinforced concrete beams with and without steel fiber under explosive loading. January 2008. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 14(6):419-426. {in English}

21. Martinola, Giovanni & Meda, Alberto & Plizzari, Giovanni & Rinaldi, Zila. (2010). Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites - Cement Concrete Composites*. 32. 731-739. 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001. {in English}

22. Alasmari, H. (2023). Rehabilitation of overload-damaged reinforced concrete columns using ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Open Engineering*, 13(1), 20220437. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0437>. {in English}

23. DSTU B V.3.1-2:2016 Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures. K., 2017. 72 p. {in Ukrainian}.

24. DSTU B V.2.7-214:2009 Concretes. Methods of determination of strength according to control samples. K.: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010. 43 p. {in Ukrainian}.