

DOI: 10.32347/2076-815X.2024.85.614-624

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

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ФІБРОБЕТОНОМ

Представлені результати комп'ютерного моделювання та скінчено-елементного аналізу пошкоджених балок, підсиленіх фібробетоном. В роботі використані два програмних комплекси — SOFiSTiK та Autodesk Robot Structural Analysis. Попередньо були проведені експериментальні дослідження балок, пошкоджених у розтягнутій або стиснутій зоні, посиленіх сталеві фібробетоном. При цьому було визначено несучу здатність двох груп посиленіх балок. Перша група складалася з трьох зразків (ЗБП1, ЗБП2, ЗБП3), що мали пошкодження стиснутої зони; у другій групі було два зразки з пошкодженнями у розтягнутій зоні (ЗБП4, ЗБП5). Окрім несучої здатності, для кожного зразка визначені прогини та відносні поздовжні деформації. Одночасно було досліджено тріщиноутворення у непошкодженій балці та у пошкоджених балках, посиленіх фібробетоном, фіксувалося навантаження, при якому утворилася перша тріщина, загальна кількість тріщин, початкова та кінцева ширина розкриття кожної з них. З метою оцінки отриманих результатів експериментальних досліджень було проведено комп'ютерне моделювання та скінчено-елементний аналіз посиленіх балок. Встановлено, що прогини та навантаження, отримані в результаті розрахунків у програмі Robot Structural Analysis децю вищі за ті ж самі величини, що отримані у SOFiSTiK. Максимальна розбіжність у прогинах спостерігається для зразка ЗБП5 і складає 1,52 %, у напруженнях — для зразка ЗБП3 (15,6 %). Порівняння результатів обчислення максимальних напружень у SOFiSTiK з результатами експериментальних досліджень дає максимальну розбіжність 5,85% (зразок ЗБП3). А найбільша розбіжність даних експерименту та чисельного аналізу виникає у прогинах — тут вона коливається в інтервалі 19,0÷19,2 %.

Ключові слова: пошкоджена балка; сталеві фібробетон; експеримент; метод скінчених елементів; SOFiSTiK; Robot.

**Вступ.** Теоретичні методи розрахунку посилень нині розроблено недостатньо. Це пояснюється складністю математичної моделі посилення, незалежно від застосовуваного способу. Сказане повною мірою відноситься до балок, посиленних фібробетоном. У зв'язку з цим, перевага надається чисельним методам. Насамперед, методу скінчених елементів (МСЕ), оскільки це єдиний універсальний метод, на можливість застосування якого не накладається практично жодних обмежень. Цим пояснюється використання МСЕ для чисельного аналізу у всіх сучасних інженерних програмах розрахунку.

Незважаючи на те, що всі програмні комплекси реалізують метод скінчених елементів, процес розв'язання задачі в кожному з них має свої особливості, які незначно, але все ж таки впливають на результат. По-перше, в різних програмах задіяні різні скінчені елементи; по-друге, відрізняються процеси побудови скінчено-елементної сітки и, як наслідок, кількість скінчених елементів при однаковій геометричній моделі конструкції.

**Аналіз попередніх досліджень.** Публікацій, що відбивають результати чисельного аналізу пошкоджених балок, дуже багато. Можливо, дещо умовно їх можна поділити на дві групи. Першу групу складають роботи, у яких розглядаються теоретичні аспекти чисельного аналізу [1-5]. Таких робіт порівняно мало. Друга група — це публікації, де описуються практичні розрахунки з використанням того чи іншого програмного комплексу. Здебільшого це відомі пакети — ANSYS, ABAQUS, FEMAP, NASTRAN, LIRA-SAPR, SCAD та ін. Частіше за все застосовується ANSYS.

У роботі [6] руйнування балки моделюється у тривимірній постановці. Цікава робота представлена авторами статті [7], де проведено багатофакторний чисельний експеримент із застосуванням комп'ютерного моделювання в ANSYS. Виконано порівняння отриманих результатів із даними фізичного експерименту інших авторів. Отримано оптимальні значення для відсотка армування сталевую фіброю та товщини «сорочки». Встановлено, що найбільш близькі до результатів дослідних даних розрахунки з введенням в ANSYS криволінійних діаграм деформування бетону, запропонованих авторами раніше для елементів, що згинаються. Схожій проблемі присвячені статті [8-10] зарубіжних вчених. Цикл робіт [11-13] присвячений моделюванню балок, зміцнених листами з полімеру, армованого вуглецевим волокном. Не менш цікаві роботи в ANSYS наших співвітчизників [14-15].

У нашій країні для моделювання та чисельного аналізу пошкоджених балок також активно застосовується комплекс LIRA-SAPR [16-18].

Варто відмітити також роботу [19], виконану в ABAQUS, де викладено методикау моделювання та нелінійного аналізу для вимірювання реакції залізобетонної балки, зміцненої листом з армованого вуглецевим волокном полімеру (CFRP), який піддається ударним навантаженням.

**Мета.** Метою роботи було комп'ютерне моделювання та скінчено-елементний аналіз пошкоджених балок, підсилених фібробетоном.

**Матеріали та методи дослідження.** Для комп'ютерного моделювання пошкоджених балок та визначення їх напружено-деформованого стану після підсилення в роботі використані два програмних комплекси — SOFiSTiK [20] та Autodesk Robot Structural Analysis [21].

**Результати та обговорення.** Попередньо були проведені експериментальні дослідження балок, пошкоджених у розтягнутій або стиснутій зоні, посилені сталевібробетоном. Спочатку за різними існуючими методиками було визначено теоретичне значення несучої здатності залізобетонної балки без ушкоджень, а потім її несучу здатність визначили експериментально. За результатами побудовано графік зміни прогинів під дією навантаження, що зростає, графіки залежності відносної поздовжньої деформації від навантаження для лівої та правої опорних частин балки, а також для зони її чистого згину.

На наступному етапі досліджень було визначено несучу здатність двох груп посиленіх балок. Перша група складалася з трьох зразків (ЗБП1, ЗБП2, ЗБП3), що мали пошкодження стиснутої зони; у другій групі було два зразки з пошкодженнями у розтягнутій зоні (ЗБП4, ЗБП5). Окрім несучої здатності, для кожного зразка визначені прогини та відносні поздовжні деформації.

Одночасно було досліджено тріщиноутворення у непошкодженій балці та у пошкоджених балках, посиленіх фібробетоном, фіксувалося навантаження, при якому утворилася перша тріщина, загальна кількість тріщин, початкова та кінцева ширина розкриття кожної з них.

Ось з метою оцінки отриманих результатів експериментальних досліджень було й проведено комп'ютерне моделювання та скінчено-елементний аналіз посиленіх балок.

Моделювання та розрахунки виконувалися для п'яти зразків посиленіх балок — ЗБП1 – ЗБП5. Оскільки жодна з програм не дає можливості визначити несучу здатність, в усіх розрахунках розглядалося навантаження у вигляді двох зосереджених сил, величиною  $F = 40,3$  кН кожна, що відповідає середній несучій здатності непошкоджених балок. Сили прикладені на відстанях 60 см від краю балки; опори розташовані на 5 см від краю. Таким чином, зона чистого вигину складала 80 см.

Пружні константи, які задавалися для розрахунків, були отримані після обробки методами математичної статистики первинних показників за результатами випробувань призм та кубів:

– для фібробетону:

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

коефіцієнт Пуассона –  $\mu = 0,22$ ;

– для бетону:

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

коефіцієнт Пуассона –  $\mu = 0,2$ .

Результати розрахунків у ПК SOFiSTiK зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків у ПК SOFiSTiK

Зразок	Кількість елементів	Максимальний прогин, мм	Максимальне напруження, МПа	
			XX	YY
ЗБП1	272	4,06	32,80	14,70
ЗБП2	240	4,03	31,00	13,60
ЗБП3	263	3,98	29,77	11,97
ЗБП4	252	4,00	30,66	12,35
ЗБП5	256	3,90	30,53	14,45

На рис. 1, 2 показано геометричну та скінчено-елементну моделі зразка балки ЗБП3, у якій пошкоджено, а потім підсилено фібробетоном стиснуту зону. На рис. 3, 4 зображені епюри напружень та прогинів.

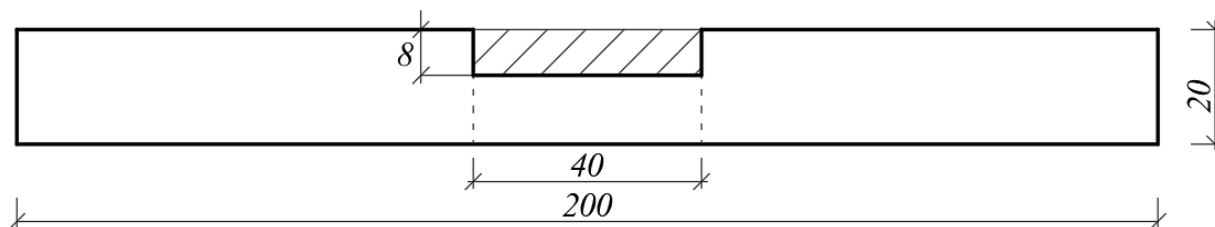


Рис. 1. Геометрична схема зразка ЗБП3

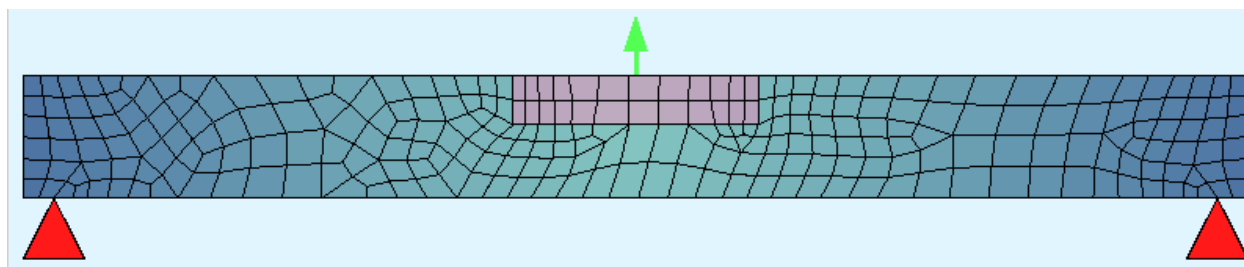


Рис. 2. Скінчено-елементна модель зразка ЗБП3

Скінчено-елементні моделі, епюри напружень та прогинів чотирьох інших зразків пошкоджених балок тут не наводимо, оскільки вони мають аналогічний характер.

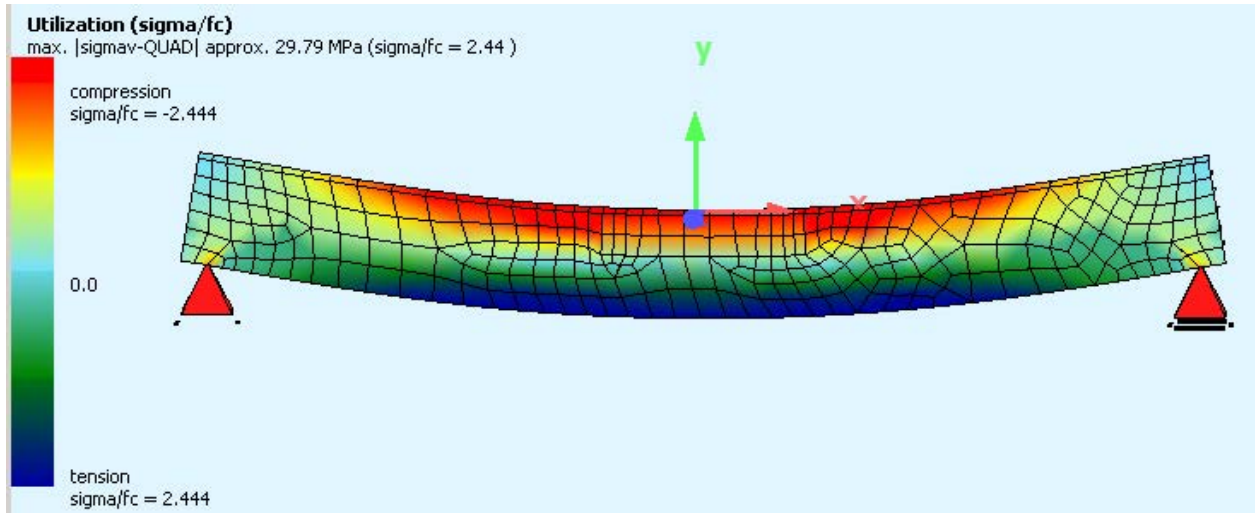


Рис. 3. Напруження у зразку ЗБП3

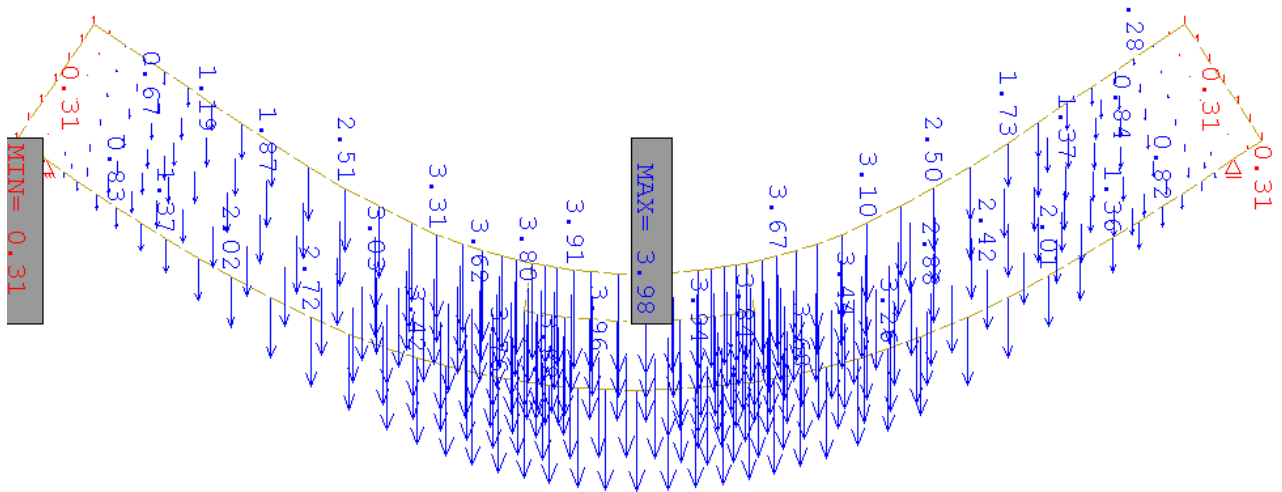


Рис. 4. Прогини зразка ЗБП3

Тепер розглянемо результати моделювання та розрахунків у програмі Autodesk Robot Structural Analysis на прикладі зразка ЗБП5, у якого було пошкоджено розтягнуту зону.

Загальні результати розрахунків по всіх зразках зведено до табл. 2.

На рис. 5 показано геометричну модель зразка балки ЗБП5, у якої пошкоджено, а потім підсилено фібробетоном розтягнуту зону. На рис. 6,8 зображені епюри напружень та прогинів.

Таблиця 2

Результати розрахунків у Robot Structural Analysis Professional

Зразок	Кількість елементів	Максимальний прогин, мм	Максимальне напруження, МПа	
			XX	YY
ЗБП1	282	4,07	37,66	20,12
ЗБП2	278	4,08	35,26	18,28
ЗБП3	278	4,04	35,27	18,28
ЗБП4	278	4,05	35,30	17,98
ЗБП5	278	3,96	35,20	17,98

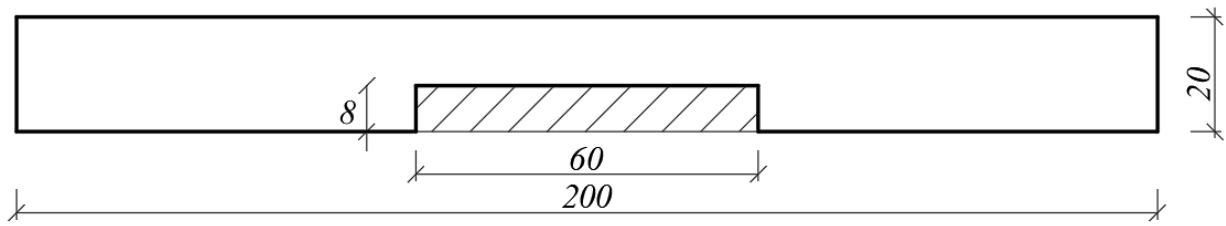


Рис. 5. Геометрична модель зразка ЗБП5

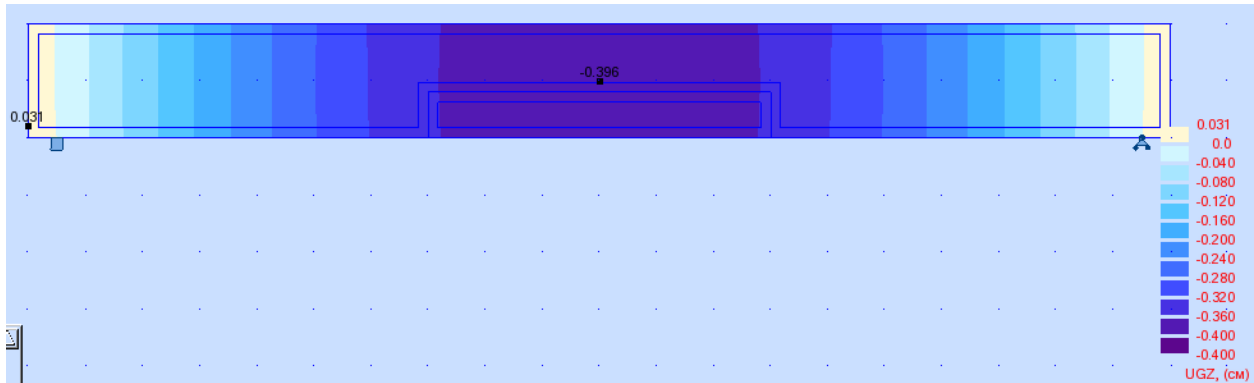


Рис. 6. Прогини зразка ЗБП5

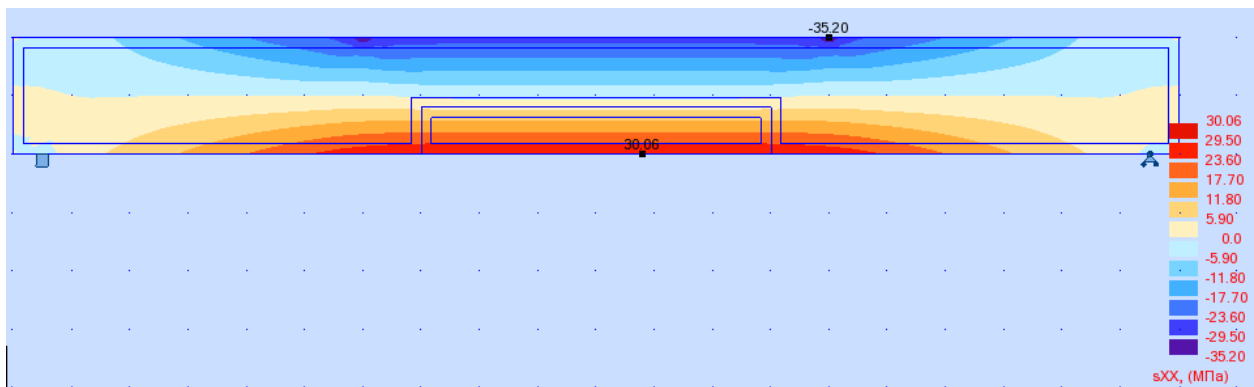


Рис. 7. Напруження ХХ у зразку ЗБП5

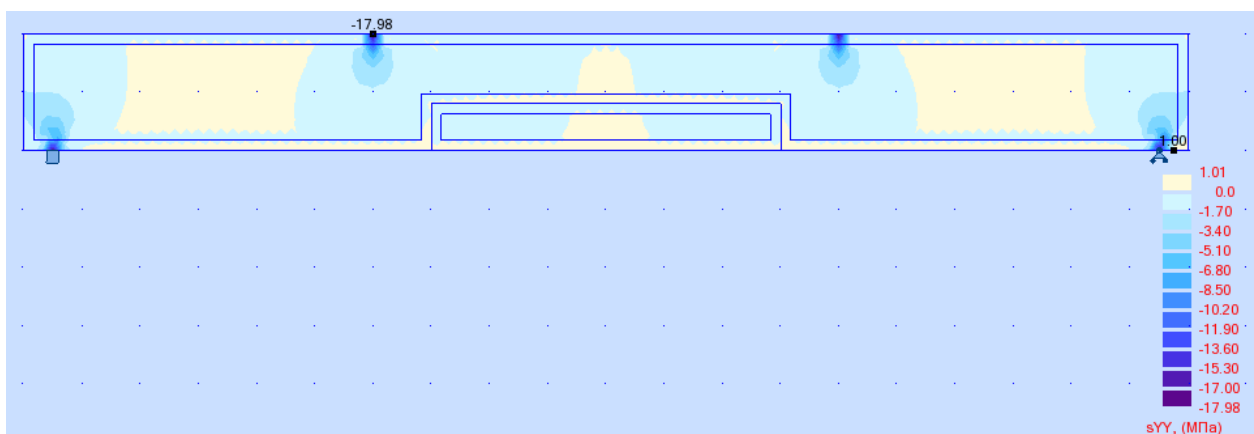


Рис. 8. Напруження YY у зразку ЗБП5

Інші результати моделювання та розрахунку пошкоджених балок у програмі Robot Structural Analysis Professional виглядають аналогічно.

У табл. 3 наведені максимальні прогини та напруження, отримані за результатами експериментальних досліджень, та скінчено-елементного аналізу у двох програмах.

Таблиця 3

## Порівняння результатів експерименту та комп'ютерного аналізу

Зразок	Максимальний прогин, мм			Максимальне напруження, МПа		
	SOFiSTiK	Robot	Експеримент	SOFiSTiK	Robot	Експеримент
ЗБП1	4,06	4,07	4,97	32,80	37,66	33,71
ЗБП2	4,03	4,08	4,98	31,00	35,26	32,18
ЗБП3	3,98	4,04	4,84	29,77	35,27	31,62
ЗБП4	4,00	4,05	4,95	30,66	35,30	31,28
ЗБП5	3,90	3,96	4,76	30,53	35,20	31,76

## Висновки

Таким чином, проведене комп'ютерне моделювання та розрахунки методом скінчених елементів п'яти зразків посиленних балок у двох програмах — SOFiSTiK та Autodesk Robot Structural Analysis. Отримані значення напружень та прогинів. Встановлено, що прогини та навантаження, отримані в результаті розрахунків у програмі Robot Structural Analysis дещо вищі за ті ж самі величини, що отримані у SOFiSTiK. Максимальна розбіжність у прогинах спостерігається для зразка ЗБП5 і складає 1,52 %, у напруженнях — для зразка ЗБП3 (15,6 %). Порівняння результатів обчислення максимальних напружень у SOFiSTiK з результатами експериментальних досліджень дає максимальну розбіжність 5,85% (зразок ЗБП3). А найбільша розбіжність виникає у прогинах — тут вона коливається в інтервалі 19,0÷19,2 %.

## Список літератури

1. Pazdan, M. (2021). FEM modelling of the static behaviour of reinforced concrete beams considering the nonlinear behaviour of the concrete. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 43(3) 206-223. <https://doi.org/10.2478/sgem-2021-0012>
2. Hawileh, Rami & Musto, H.A. & Abdalla, Jamal & Naser, M.Z. (2019). Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 173. 106952. 10.1016/j.compositesb.2019.106952.
3. Oller Ibars, E., Ferreira, D., Marí Bernat, A., & Bairán García, J. M. (2017). Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear by externally bonded (EB) fibre reinforced polymer (FRP) sheets. *Hormigón y Acero*. doi: 10.1016/j.hya.2017.04.022
4. Sheikh-Sobeh, A.; Kachouh, N.; El-Maaddawy, T. Numerical Analysis of Concrete Deep Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Buildings* 2023, 13, 2767. <https://doi.org/10.3390/buildings13112767>
5. Thanh Tung Pham, Ngoc Tan Nguyen, Thi-Thanh Thao Nguyen, Ngoc Linh Nguyen, Numerical analysis of the shear behavior for steel fiber reinforced concrete beams with corroded reinforcing bars, *Structures*, Volume 57, 2023, 105081, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105081>.

6. Tjitradi, Darmansyah & Eliatun, Eliatun & Taufik, Syahril. (2017). 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms. 7. 14-23. 10.5923/j.mechanics.20170701.02.
7. Радайкин О.В., & Шарафутдинов Л.А. (2017). К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной «Рубашкой», на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS». Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, (1 (39)), 111-120.
8. Vasudevan G., Kothandaraman S., Azhagarsamy S. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling // Strength of materials. Puducherry. 2013. Pp. 149–162.
9. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels // Composites. 2014. Pp. 199–207.
10. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. // Cement and concrete research. 2015. P. 24–34.
11. Barour, S., & Zergua, A. (2020). Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear using carbon fiber reinforced polymer materials. Journal of Engineering, Design and Technology, ahead-of-print(ahead-of-print). doi:10.1108/jedt-03-2020-0099
12. Barour, S., Zergua, A., Bouziadi, F., & Abed Jasim, W. (2019). Finite element analysis of CFRP-externally strengthened reinforced concrete beams subjected to three-point bending. World Journal of Engineering, 17(2), 183–202. doi:10.1108/wje-04-2019-0121
13. Barour, S., Zergua, A., Bouziadi, F., Kaloop, M.R., & El-Demerdash, W.E. (2022). Nonlinear Numerical and Analytical Assessment of the Shear Strength of RC and SFRC Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets. Advances in Civil Engineering.
14. Modeling of the stress-deformed state and cracking in reinforced concrete structures using ANSYS MECHANICAL. V.S. Dorofeev, V.M. Karpyuk, O.S. Neutov, S.F. Neutov / Technical Sciences. University of Warmia and Mazuru in Olsztun. 2014. № 17(2), Pp. 105-121.
15. Sakhno S., Liulchenko Y., Chyrva T., Pischikova O. Determination of bearing capacity and calculation of the gain of the damaged span of a railway overpass by the finite element method, Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing. Multi-authored monograph. — Sofia: Publishing House “St. Ivan Rilski”, 2020. Pp. 326 - 340.
16. Моделювання роботи пошкоджених залізобетонних балок у "ЛІРА-САПР" / Клименко Є.В., Антонюк Н.Р., Полянський К.В. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2019. Вип. 77. С. 58-65.
17. Investigation of Residual Bearing Capacity of Inclined Sections of Damaged Reinforced Concrete Beams. Y. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, K. Polianskyi / Croatian Regional Development Journal, Croatia, 2020. Vol. 1, No. 1. Pp. 16-29.
18. Чисельне моделювання процесу руйнування залізобетонних балок монолітного огороження та його посилення вуглецевими матеріалами / В. Чирва, Т. Чирва, О. Панченко та ін. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: зб. наук. праць / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт.; гол. ред. О.Д. Журавський. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 6. С. 34 – 41.
19. Alshaarbaaf, I., Mouwainea, E. & Said, A. (2023). Numerical analysis of reinforced concrete beams subjected to impact loads. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 32(1), 20220232. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0232>
20. Кухтин В.Н., Булаев И.В., Баранов И.С. Применение расчётного комплекса SOFiSTiK для расчёта мостовых конструкций. Учебное пособие. М.: МАДИ, 2015. 136 с.
21. Сухоруков В.В. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Проектно-вычислительный комплекс: справочно-учебное пособие. АСВ, 2009. 128 с.



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

## **COMPUTER SIMULATION AND NUMERICAL ANALYSIS OF DAMAGED BEAMS REINFORCED WITH FIBER CONCRETE**

The results of computer modeling and finite element analysis of damaged beams reinforced with fiber concrete are presented. The work uses two software complexes — SOFiSTiK and Autodesk Robot Structural Analysis. Previously, experimental studies of beams damaged in the stretched or compressed zone, reinforced with steel fiber concrete, were carried out. At the same time, the bearing capacity of two groups of reinforced beams was determined. The first group consisted of three samples (ZBP1, ZBP2, ZBP3) that had damage to the compressed zone; in the second group there were two samples with damage in the stretched zone (ZBP4, ZBP5). In addition to the bearing capacity, deflections and relative longitudinal deformations are determined for each sample. At the same time, crack formation in the undamaged beam and in the damaged beams reinforced with fiber concrete was investigated, the load at which the first crack formed, the total number of cracks, and the initial and final opening width of each of them were recorded. In order to evaluate the obtained results of experimental studies, computer modeling and finite element analysis of reinforced beams were carried out. It is established that the deflections and loads obtained as a result of calculations in the Robot Structural Analysis program are slightly higher than the same values obtained in SOFiSTiK. The maximum discrepancy in deflections is observed for sample ZBP5 and is 1.52%, in stresses — for sample ZBP3 (15.6%). Comparing the results of calculating the maximum stresses in SOFiSTiK with the results of experimental studies gives a maximum discrepancy of 5.85% (sample ZBP3). And the biggest discrepancy between the data of the experiment and the numerical analysis occurs in the deflections — here it fluctuates in the range of 19.0÷19.2%.

Keywords: damaged beam; reinforced concrete; experiment; finite element method; SOFiSTiK; Robot.

### **REFERENCES**

1. Pazdan, M. (2021). FEM modelling of the static behaviour of reinforced concrete beams considering the nonlinear behaviour of the concrete. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 43(3). P/ 206-223. <https://doi.org/10.2478/sgem-2021-0012>. {in English}

2. Hawileh, Rami & Musto, H.A. & Abdalla, Jamal & Naser, M.Z. (2019). Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 173. 106952. 10.1016/j.compositesb.2019.106952. {in English}
3. Oller Ibars, E., Ferreira, D., Marí Bernat, A., & Bairán García, J. M. (2017). Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear by externally bonded (EB) fibre reinforced polymer (FRP) sheets. *Hormigón y Acero*. doi: 10.1016/j.hya.2017.04.022. {in English}
4. Sheikh-Sobeh, A.; Kachouh, N.; El-Maaddawy, T. Numerical Analysis of Concrete Deep Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Buildings* 2023, 13, 2767. <https://doi.org/10.3390/buildings13112767>. {in English}
5. Thanh Tung Pham, Ngoc Tan Nguyen, Thi-Thanh Thao Nguyen, Ngoc Linh Nguyen, Numerical analysis of the shear behavior for steel fiber reinforced concrete beams with corroded reinforcing bars, *Structures*, Volume 57, 2023, 105081, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105081>. {in English}
6. Tjitradi, Darmansyah & Eliatun, Eliatun & Taufik, Syahril. (2017). 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms. 7. 14-23. 10.5923/j.mechanics.20170701.02. {in English}
7. Radaikin O.V., & Sharafutdinov L.A. (2017). To assess the strength, rigidity and crack resistance of bendable reinforced concrete elements reinforced with steel fiber concrete “Shirt”, based on computer modeling in the ANSYS PC. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, (1 (39)), 111-120. {in Ukrainian}
8. Vasudevan G., Kothandaraman S., Azhagarsamyb S. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling // *Strenght of materials*. Puducherry. 2013. Pp. 149–162. {in English}
9. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels // *Composites*. 2014. Pp. 199–207. {in English}
10. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. // *Cement and concrete research*. 2015. P. 24–34. {in English}
11. Barour, S., & Zergua, A. (2020). Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear using carbon fiber reinforced polymer materials. *Journal of Engineering, Design and Technology*, ahead-of-print(ahead-of-print). doi:10.1108/jedt-03-2020-0099. {in English}

12. Barour, S., Zergua, A., Bouziadi, F., & Abed Jasim, W. (2019). Finite element analysis of CFRP-externally strengthened reinforced concrete beams subjected to three-point bending. *World Journal of Engineering*, 17(2), 183–202. doi:10.1108/wje-04-2019-0121. {in English}

13. Barour, S., Zergua, A., Bouziadi, F., Kaloop, M.R., & El-Demerdash, W.E. (2022). Nonlinear Numerical and Analytical Assessment of the Shear Strength of RC and SFRC Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets. *Advances in Civil Engineering*. {in English}

14. Modeling of the stress-deformed state and cracking in reinforced concrete structures using ANSYS MECHANICAL. V.S. Dorofeev, V.M. Karpyuk, O.S. Neutov, S.F. Neutov / *Technical Sciences*. University of Warmia and Mazuru in Olsztun. 2014. № 17(2), Pp. 105-121. {in English}

15. Sakhno S., Liulchenko Y., Chyrva T., Pischikova O. Determination of bearing capacity and calculation of the gain of the damaged span of a railway overpass by the finite element method, *Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing*. Multi-authored monograph. — Sofia: Publishing House “St. Ivan Rilski”, 2020. Pp. 326 - 340. {in English}

16. Modeling the operation of damaged reinforced concrete beams in "LIRA-SAPR" / Klymenko E.V., Antonyuk N.R., Polyanskyi K.V. // *Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture*. 2019. Issue 77. P. 58-65. {in Ukrainian}

17. Investigation of Residual Bearing Capacity of Inclined Sections of Damaged Reinforced Concrete Beams. Y. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, K. Polianskyi / *Croatian Regional Development Journal*, Croatia, 2020. Vol. 1, No. 1. Pp. 16-29. {in English}

18. Numerical modeling of the process of destruction of reinforced concrete beams of a monolithic fence and its reinforcement with carbon materials / V. Chirva, T. Chirva, O. Panchenko et al. // *Building structures. Theory and practice: coll. of science works*. Kyiv: KNUBA, 2020. Issue 6. P. 34 – 41. {in Ukrainian}

19. Alshaarbafe, I., Mouwainea, E. & Said, A. (2023). Numerical analysis of reinforced concrete beams subjected to impact loads. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1), 20220232. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0232>. {in English}

20. Kukhtin V.N., Bulaev I.V., Baranov I.S. Application of the SOFiSTiK calculation complex for the calculation of bridge structures. Tutorial. M.: MADI, 2015. 136 p. {in Ukrainian}

21. Sukhorukov V.V. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Design and computing complex: reference and training manual. DIA, 2009. 128 p. {in Ukrainian}