

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК З НЕСИМЕТРИЧНИМ
ПОШКОДЖЕННЯМ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЛІРА-САПР**

**MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED
CONCRETE BEAMS WITH ASYMMETRIC DAMAGE IN THE LIRA-
SAPR SOFTWARE COMPLEX**

Бліхарський З.Я., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4823-6405, **Вегера П.І.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-3437-1825, **Дейнека В.М.**, магістр, ORCID: 0009-0005-0965-5112, (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів); **Гриньова І.І.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-7637-6029, (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Blikharskyi Z.Y., Sc.D., professor, ORCID: 0000-0002-4823-6405, **Vegera P.I.**, Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0002-3437-1825, **Deineka V. M.**, graduate student, ORCID: 0009-0005-0965-5112, (Lviv Polytechnic National University, Lviv); **Grynyova I.I.**, Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0001-7637-6029, (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

У статті описано дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок. Змодельовано 10 об'ємно-просторових залізобетонних балок в програмному комплексі ЛІРА-САПР: одну без пошкоджень (контрольна В-0) та 9 пошкоджених з різною величиною однібічного пошкодження. У результаті даного дослідження отримано дані про зміну (збільшення) напружень та деформацій зі збільшенням розмірів пошкодження. Також встановлено величину пошкодження, при якому модель залізобетонної балки отримує вигин з площини.

The article describes the study of the stress-strain state of damaged reinforced concrete beams. To solve the research problem, 10 digital models of reinforced concrete beams (B-0...B-9) were created, including one control beam and nine beams with different sizes of asymmetric damage. Modeling and calculation were carried out in the LIRA-CAD software complex. Volumetric finite elements No. 236 were used to construct the finite-element model, which simulates the non-linear operation of concrete. The 25-exponential law of deformation was used to model the non-linear operation of concrete. Finite elements No. 210 were used to simulate the operation of the

reinforcement carcass - physically nonlinear universal spatial FE. The 14th piecewise linear deformation function was used to determine the physical nonlinearity of the reinforcement material. For further detailed study and analysis of reinforced concrete beams with uneven damage, 9 damage variants with variable values of damage height and width were simulated. It started from 12.5 mm to 62.5 mm. These variations cover several different damage scenarios from minor to major, allowing the moment of departure of the beam from the plane of normal bending to be investigated. As a result of this study, data were obtained on the change (increase) of stresses and deformations with an increase in the size of the damage. The size of the damage, at which the model of the reinforced concrete beam leaves the plane, is also recorded.

Ключові слова: нерівномірне пошкодження, залізобетонні балки, ЛІРА-САПР, нелінійність, моделювання
uneven damage, reinforced concrete beam, LIRA SAPR, nonlinearity, modeling.

Вступ. На сьогоднішній день надзвичайно актуальним є дослідження пошкоджених залізобетонних конструкцій, зокрема під дією навантаження. Одним із важливих завдань будівельної галузі в Україні є саме вивчення та розширення існуючих знань, щодо визначення залишкової несучої здатності залізобетонних конструкцій, оскільки вони є найпоширенішими в країні. Варто зазначити, що пошкодження залізобетонних конструкцій можуть мати різний характер та тип походження: хімічний вплив, неправильна експлуатація, механічні деформації або пряме влучання снарядів та ракет. Ці фактори спричиняють непередбачуваний напружено-деформований стан та деформації залізобетонних елементів у складі будівель та споруд. Саме на розуміння принципів пошкодження, їх впливу на залізобетонні елементи спрямовані дослідження в цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень. Вивчення впливу дефектів та пошкоджень залізобетонних конструкцій широко займаються багато вчених. У роботах [1-4] сформовано топологію пошкоджень та їх вплив на несучу здатність залізобетонних конструкцій. Також вчені в Україні та закордоном досліджували несучу здатність пошкоджених залізобетонних балок [5]. Для досліджень використовуються програмні комплекси, які дозволяють доволі точно моделювати поведінку даних конструкцій, зокрема ЛІРА-САПР [6-7] та FEMAP with NX Nastran [8]. Дані програмні комплекси дозволяють проводити моделювання методом скінченних елементів з врахуванням нелінійної роботи матеріалів, що показує свою ефективність та точність в порівнянні з експериментальними дослідженнями [9-13]. Перелічені вище роботи є не лише теоретичними, а і прикладними, особливо в наш час та сприяють використанню накопиченого досвіду при посиленні та відновленні пошкоджених залізобетонних конструкцій внаслідок бойових дій [14-15].

Мета дослідження. Виконати моделювання залізобетонних балок в

програмному комплексі ЛІРА-САПР в нелінійній постановці задачі з однобічними пошкодженнями поперечного перерізу балок.

Задачею дослідження є аналіз напружено-деформовано стану пошкоджених залізобетонних балок та визначення величини нерівномірного пошкодження, що спричиняє вихід балки з площини.

Методика дослідження. Для вирішення задачі дослідження було створено 10 цифрових моделей залізобетонних балок (В-0...В-9) в програмному комплексі ЛІРА-САПР, зокрема 1 контрольна балка (непошкоджена) та 9 балок з різним ступенем пошкодження. Загальний вигляд конструкції балки показано на рисунку 1. Така конструкція балок використовувалася у всіх цифрових моделях.

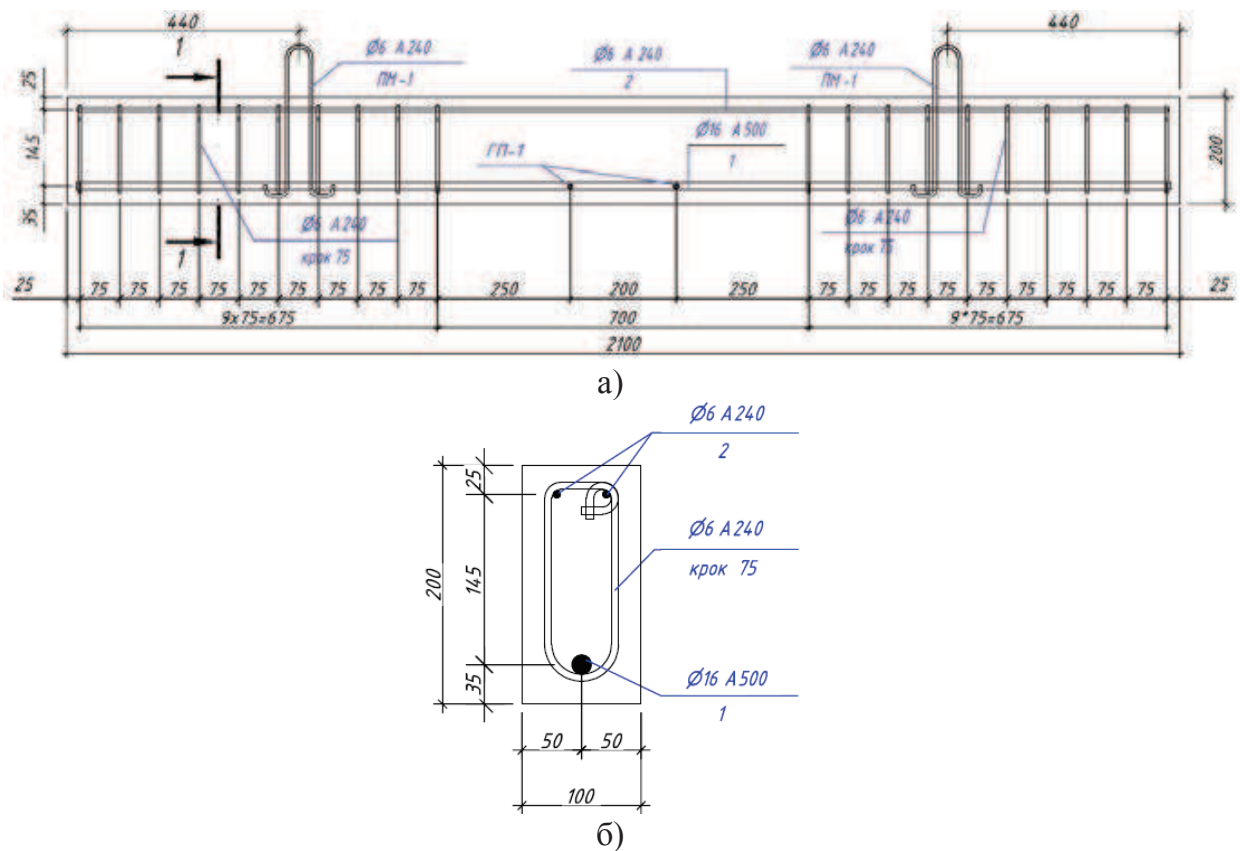


Рис. 1. Загальний вигляд армування дослідних балок : а) поздовжній розріз; б) поперечний розріз

Моделювання та розрахунок проводилися в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Для побудови кінцево-елементної моделі використано об'ємні кінцеві елементи (КЕ) № 236, які імітують нелінійну роботу бетону. Прийнятий клас бетону С30/35 для усіх моделей. Його характеристики були прийняті з нормативних даних. Для моделювання нелінійної роботи бетону використано 25 експоненціальний закон деформації (рис. 2).

Для моделювання роботи арматурного каркасу використано скінченні елементи № 210 – фізично-нелінійні універсальні просторові КЕ. Фізична нелінійність матеріалу арматури була задана 14-тою кусково-лінійною

функцією деформацій (рис. 3). Характеристики деформування, граничні значення, модуль пружності та межа текучості для арматури були прийняті з будівельних норм для арматури класу А500С, яка була прийнята як робоча (стиснута та розтягнута) арматура та А240С, що була поперечною (рис.1.)

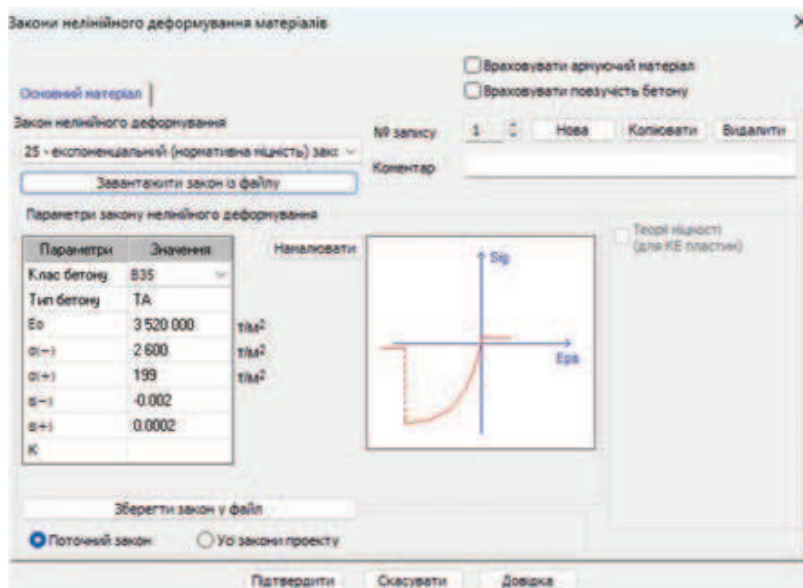


Рис. 2. Закон нелінійного деформування для бетону

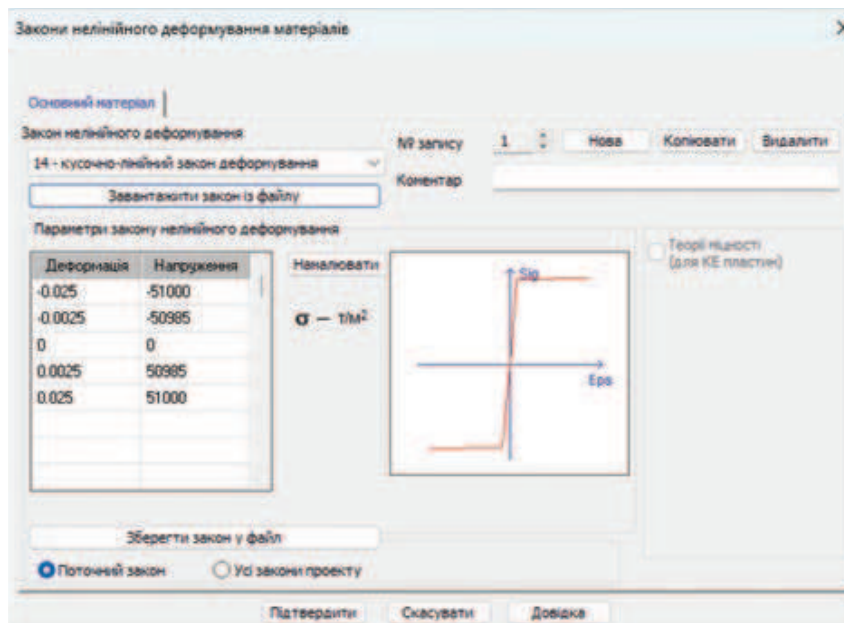


Рис. 3. Закон нелінійного деформування для арматури

Поперечний переріз балки розбивається на кінцеві елементи з розмірами згідно з рис. 4. У поздовжньому напрямку балка розбивається на KE з кроком 25 мм. Такий поділ балки на кубики пов'язано з розміщенням поздовжньої арматури і кроком поперечної арматури.

По всій ширині балки на відстані 100 мм від його краю створюються опори. З одного боку знаходиться шарнірно-нерухома опора, з іншого –

шарнірно-рухома опора. Розрахунковий проліт балки становить 1900 мм. Навантаження F (кН) прикладається в $1/3$ прольоту (рис. 5), щоб забезпечити зону чистого згину. Прикладене навантаження $F = 35,3$ кН, що еквівалентно прикладається у вигляді рівномірно-розподіленого по грані об'ємних КЕ балки.

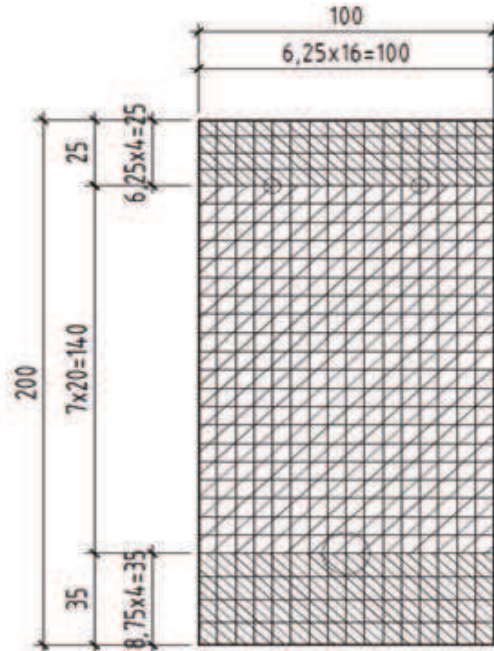


Рис. 4. Сітка кінцевих елементів в поперечному перерізі балки



Рис. 5. Схема прикладання навантаження

Для подальшого детального вивчення та аналізу залізобетонних балок з нерівномірним пошкодженням було змодельовано 9 варіантів пошкодження зі змінними значеннями висоти та ширини пошкодження. (Рис.6). Ці варіації охоплюють низку різних сценаріїв пошкодження від меншого до більшого що дозволяє встановити момент виходу балки з площини при згині.

Модельовання пошкодження розрахункової моделі в програмі ЛІРА-САПР виконано шляхом видалення кінцевих елементів залізобетонної балки. Після видалення для запобігання помилок використовувалася команда `Mask Model`. Передбачається, що це пошкодження може викликати зміну напружено-деформованого стану залізобетонного елемента.

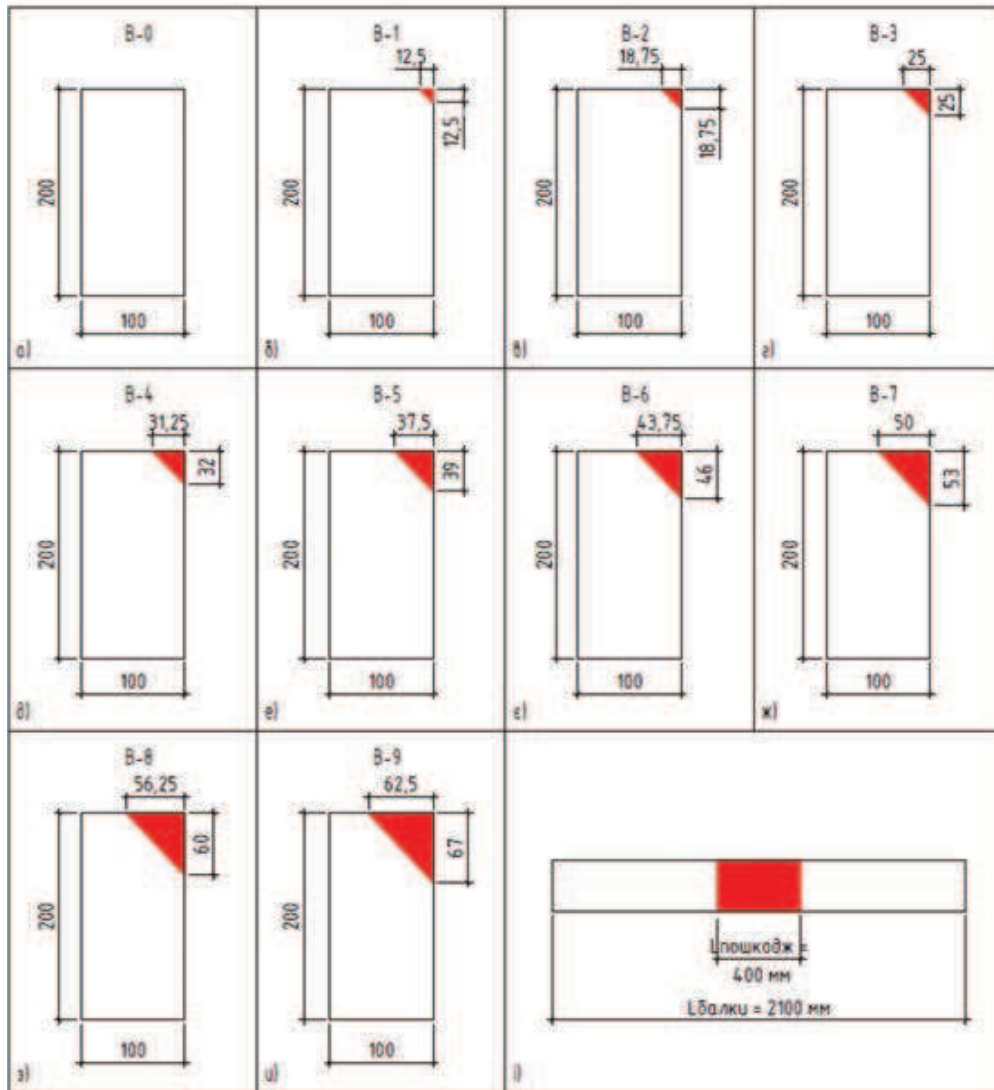


Рис. 6. Параметри пошкодження поперечного перерізу дослідних моделей балок: а) непошкоджена балка В-0; б) В-1; в) В-2; г) В-3; д) В-4; е) В-5; є) В-6; ж) В-7; з) В-8; и)В-9; і) розміри зони пошкодження балки по довжині.

Результати дослідження В результаті моделювання та статичного розрахунку за програмою ЛІРА-САПР отримано цифрові моделі залізобетонних балок з пошкодженнями. Загальний вигляд контрольної балки В-0 (без пошкодження) зображено на рис.7. Модель арматурного каркасу відображено на рис.8.

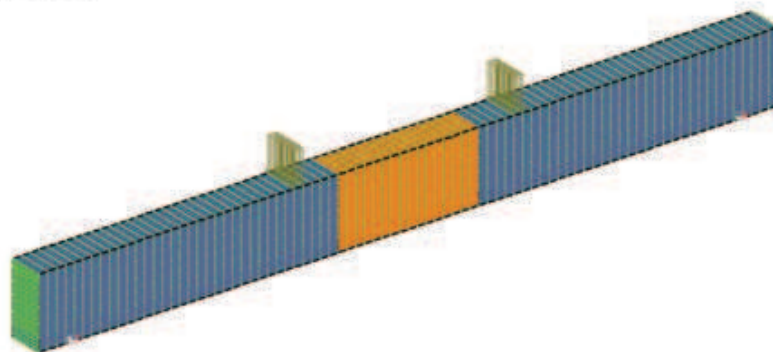


Рис. 7. Загальний вигляд розрахункової моделі контрольної балки

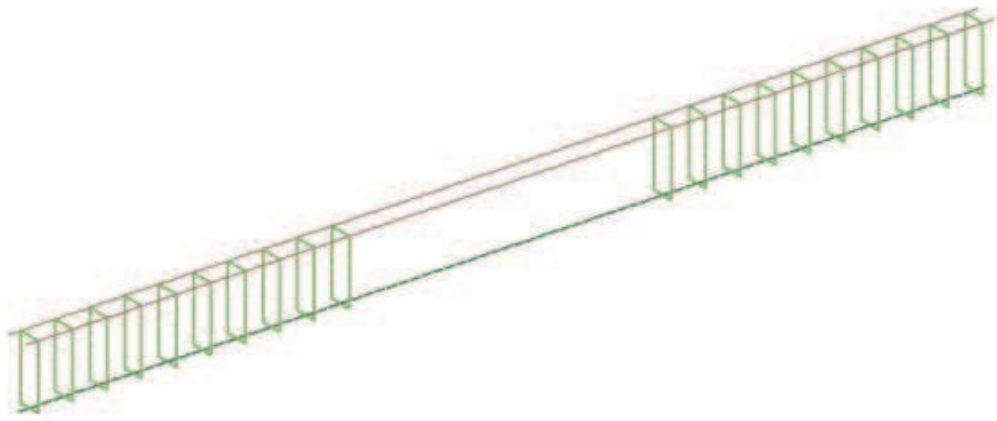
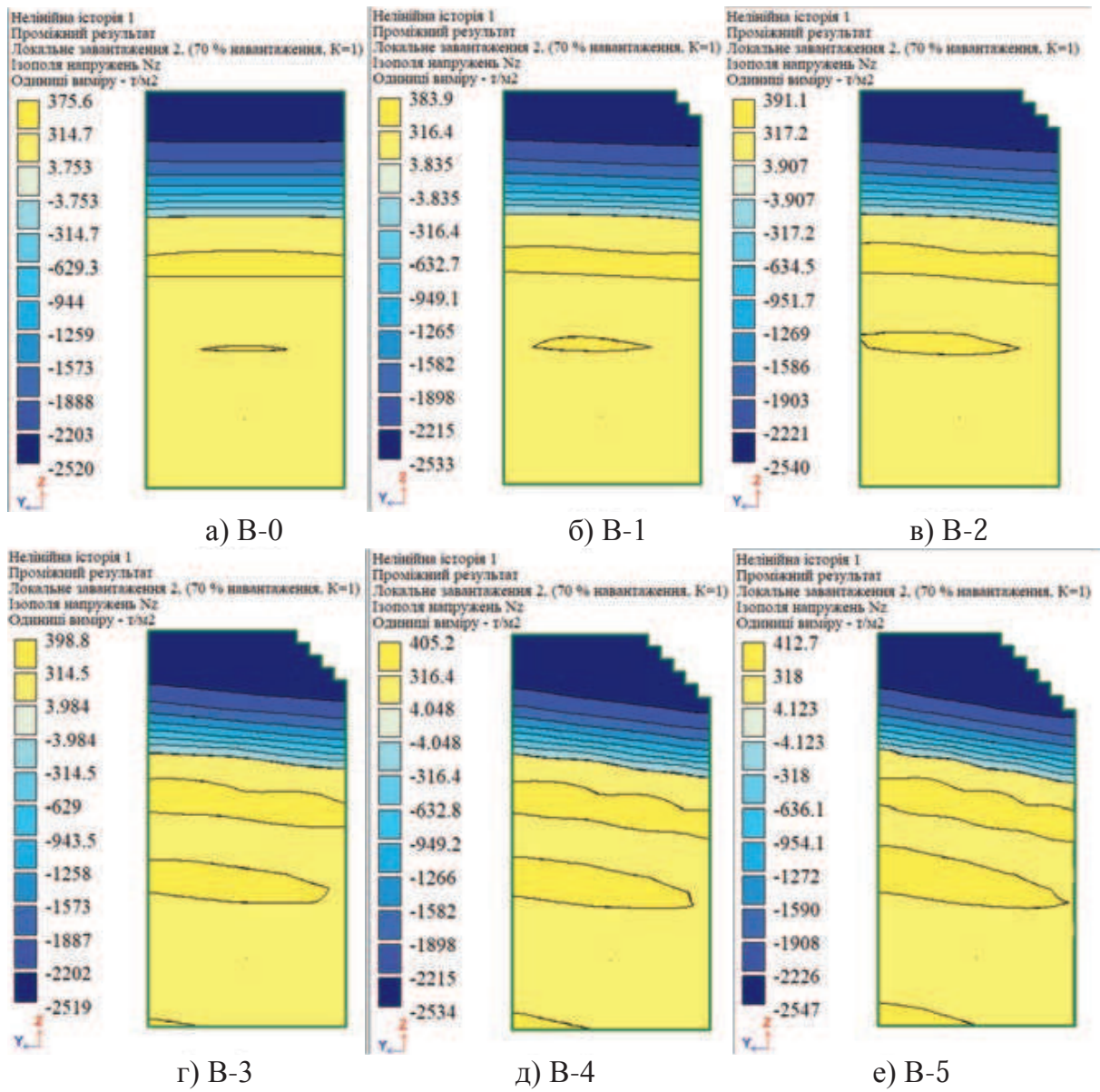


Рис. 8. Загальний вигляд арматурного каркасу балки



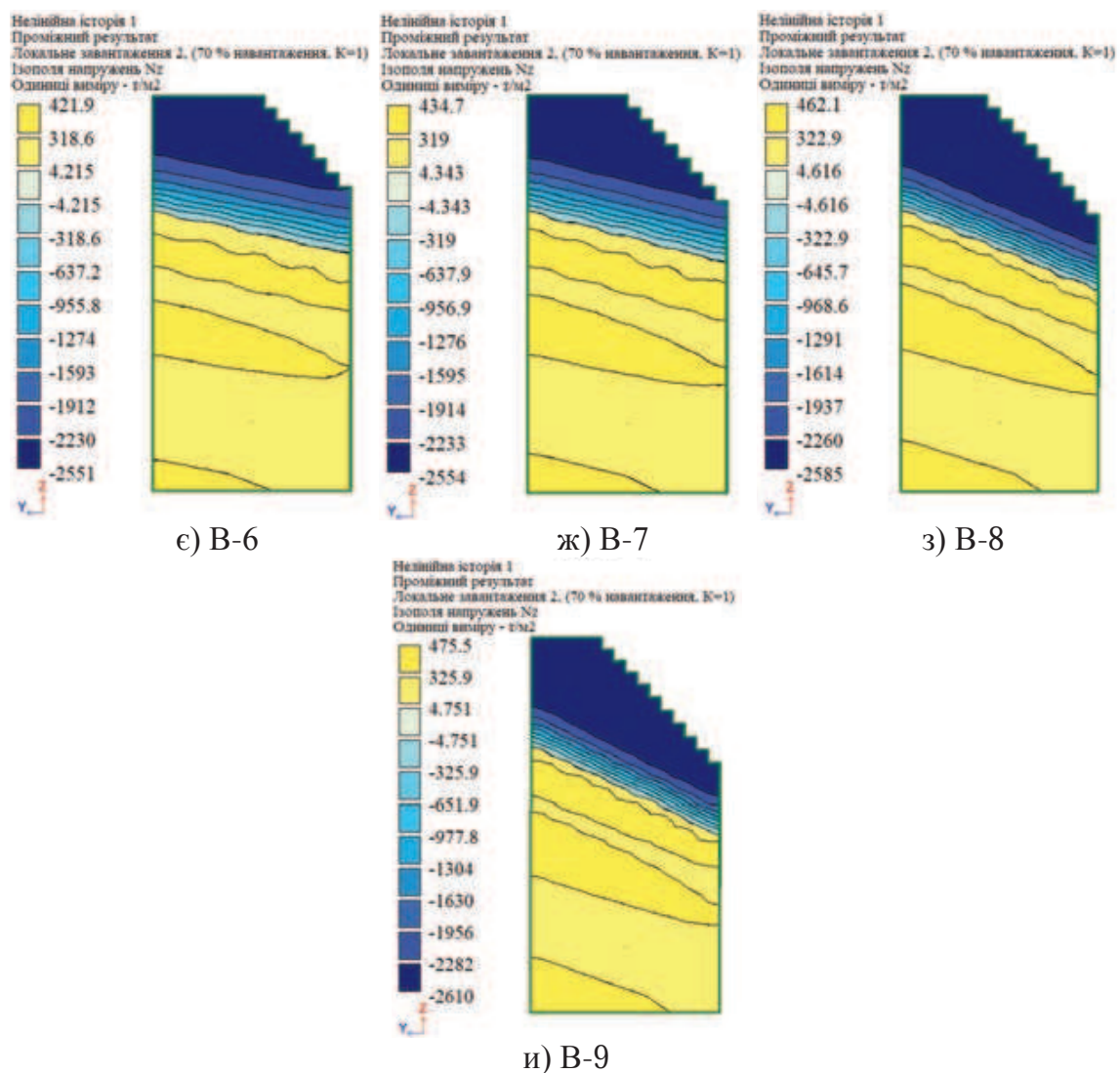


Рис.9 Мозаїка напружень дослідних балок в середині прольоту при 70% проектного навантаження: а) непошкоджена балка В-0; б) В-1; в) В-2; г) В-3; д) В-4; е) В-5; е) В-6; ж) В-7; з) В-8; и) В-9

Проаналізувавши розподіл нормальних напружень в перерізі залізобетонних балок на основі даних показаних на рисунку 9 можна зауважити, що у балках В-1 та В-2 положення нейтральної лінії фактично не змінюється, а форма стиснутої зони відповідає контрольні балці В-0. При пошкодженні більше 18,75 мм. (балка В-2б рис. 6в) вже починається зміщення положення нейтральної осі. Фактично при втраті захисного шару, вже відбувається зміна напружено деформованого стану. Починаючи з балки В-3 нейтральна вісь остаточно втратила свою горизонтальність, та форма стиснутої зони перестала бути прямокутна.

За результатами нелінійного розрахунку дослідних цифрових моделей залізобетонних балок було визначено прогин балки та її вигин з площини, при різних рівнях навантаження. Значення прогинів подано у таблиці 1.

На підставі даних, представлених у табл. 1, можна зауважити, що бічні пошкодження суттєво впливають на несучу здатність і деформативність (прогин) досліджуваних зразків.

Результати розрахунку залізобетонних балок

Номер балки	Переміщення вздовж осі Z, мм			Переміщення вздовж осі Y, мм			Мін. Напруження в бетоні, т/м ²			Макс. Напруження в бетоні, т/м ²		
	Рівень навантаження			Рівень навантаження			Рівень навантаження			Рівень навантаження		
	30%	50%	70%	30%	50%	70%	30%	50%	70%	30%	50%	70%
В-0	-2,64	-6,36	-10,8	0,01	0,02	0,03	-1525	-2358	-2567	427,5	427,5	427,5
В-1	-2,66	-6,43	-10,9	0,04	0,1	0,15	-1614	-2424	-2590	422,3	422,3	422,3
В-2	-2,69	-6,5	-11	0,08	0,18	0,27	-1688	-2485	-2600	423	423	423
В-3	2,72	-6,59	-11,2	0,125	0,29	0,43	-1767	-2534	-2596	432,8	432,8	432,8
В-4	-2,77	-6,7	-11,5	0,182	0,43	0,65	-1849	-2571	-2613	445,5	445,5	445,5
В-5	-2,82	-6,85	-11,74	0,25	0,61	0,93	-1926	-2597	-2612	462	462	462
В-6	-2,89	-7,03	-12,08	0,34	0,83	1,23	-1999	-2606	-2616	484,9	484,9	484,9
В-7	-2,97	-7,24	-12,48	0,44	1,09	1,69	-2072	-2625	-2630	511,9	511,9	511,9
В-8	-3,16	-7,96	-14,65	0,67	1,94	4,43	-2261	-2707	-2782	579	579	579,1
В-9	-3,31	-8,45	-15,85	0,84	2,50	6,33	-2352	-2725	-2981	639,3	639,3	639,3

Варто сказати, що в залежності від глибини та висоти пошкодження максимальний прогин зростає від 10,8 мм (контрольна балка В-0) до 15,85 мм - для пошкодженого зразка В-9. Було встановлено, що в залежності від глибини одностороннього пошкодження балки можуть виходити від площини. За даними, отриманими з моделей, зразки В-0...В-5 фактично не відхилялися від проектних положень. У той час як зразки з більшими пошкодженнями (В-6...В-9) вже показали вихід з площини: максимальне значення досягнуто для зразка В-9 – 6,33 мм. при 70% проектного навантаження.

Висновки. 1. Виконано моделювання 10-ти дослідних балок за допомогою ПК ЛПА-САПР. Для дев'яти балок виконано несиметричне пошкодження стиснутої зони бетону.

2. Отримано напруження, що виникають в бетоні. Згідно з отриманими результатами, при збільшенні величини пошкодження зростають та перерозподіляються напруження в перерізі балки.

3. Згідно з моделюванням, при збільшенні пошкодження вертикальний прогин балок збільшується з 10,8 мм до 15,85мм, та розвивається вихід балки з площини : від 0,03мм для контрольної балки до максимально зафіксованого значення, досягнутого для зразка В-9 – 6,33 мм., при 70% проектного

навантаження.

4. Моделювання виявилось ефективним для оцінки впливу пошкоджень і дефектів на елементи існуючих будівельних конструкцій під навантаженням.

1. Voskobiinyk, O. P. Typological comparison of defects and damage of reinforced concrete, metal and steel-reinforced concrete beam structures. Theory and building practice. 2010. 662, 97 - 103. (in Ukrainian).

2. Lobodanov M., Vegera P., Blikharskyu Z. Influence analysis of the main types of defects and damages on bearing capacity in reinforced concrete elements and their research methods. PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES. 2019, 22, 24-29.

3. Mykhalevskyi N. A., Vegera P. I., Blikharskyi Z. Y., The influence of damage to reinforced concrete beams on strength and deformability: the review. Theory and Building Practice. 2023, 5(1), 112-119.

4. Golewski G.L. The phenomenon of cracking in cement concretes and reinforced concrete structures: the mechanism of cracks formation, causes of their initiation, types and places of occurrence, and methods of detection—a review. Buildings, 2023, 13(3):765

5. Лободанов М.М., Вегера П.І., Бліхарський З.Я. Визначення несучої здатності залізобетонних балок з пошкодженням за дії навантаження. Наука та будівництво 26(4):26-32

6. Клименко Є. В., Антонюк Н. Р., Полянський К. В. Моделювання роботи пошкоджених залізобетонних балок "ЛІРА-САПР". Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2019. № 77. С. 58–65.

7. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V., Andriiets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. Building construction: Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2019, 77, 84-92.

8. Mykhalevskyi N.A., Vegera P.I., Blikharskyu Z.Y. Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package. Modern construction and architecture, 2023, no. 6, page 54-61.

9. Klymenko Ye.V., Hlibotskyi R.V. Modeling of stress-strain state and strength of damaged concrete beams reinforced with carbon fiber fabric in PC "LIRA-SAPR". Modern construction and architecture, 2024, no. 7, page 73-82

10. Barabash M. Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete / M. Barabash // Опір матеріалів і теорія споруд. - 2018. - Вип. 100. - С. 164-171.

11. Shakhmov Z., Amir S. . Nonlinear calculation of beam reinforcement using the finite element method. Technobius, 2022, 2(1), 0011

12. Earij, A., Alfano, G., Cashell, K.A., Zhou, X. Nonlinear Three-Dimensional Finite-Element Modelling of Reinforced-Concrete Beams: Computational Challenges and Experimental Validation. Engineering Failure Analysis, 2017

13. Al-Farttoosi, M., Rafiq, Y., Summerscales, J. and Williams, C. Nonlinear Finite Element Analysis (FEA) of Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP. 6th International ACIC Conference held at the Queen's University Belfast on 10 - 12 September 2013

14. Сур'янінов, М., Неутов, С., Єсванджия, В. Несуча здатність балки, пошкодженої під час бойових дій, посиленої з використанням фібробетону. Просторовий розвиток, 2023, (5), 212–222.

15. Барабаш. М. С., Костиран. Н. О., Томашевський А.В. Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несучих конструкцій інструментами ПК «Ліра-САПР». Український журнал будівництва та архітектури, No 1 (007), 2022