

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ ПОШКОДЖЕННЯМ У ЗОНІ ЧИСТОГО
ЗГИНУ ПІД ДІЄЮ НАВАНТАЖЕННЯ 30% ВІД ГРАНИЧНОЇ
ЗДАТНОСТІ**

**RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS WITH DAMAGE IN THE PURE BENDING ZONE UNDER A LOAD
OF 30% OF THE ULTIMATE CAPACITY**

**Михалевський Н.А., аспірант, ORCID: 0009-0007-8107-7892, Вегера П.І.,
к.т.н. доцент, ORCID: 0000-0002-3437-1825, Бліхарський З.Я., д.т.н.
професор, ORCID: 0000-0002-4823-6405 (Національний університет
“Львівська політехніка”, м. Львів)**

**Mykhalevskiy N.A., postgraduate student, ORCID: 0009-0007-8107-7892,
Vegera P.I., Associate Professor, ORCID: 0000- 0002- 3437 - 1825, Blikharskyi
Z.Y., Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID:0000-0002-4823-
6405(Lviv Polytechnic National University, Lviv)**

**Публікація присвячена дослідженню залізобетонних балок з
несиметричними пошкодженнями, що виникли при дії навантаження. У
ході експерименту за розробленою методикою досліджено роботу балки з
пошкодженням у зоні чистого згину, що виникло внаслідок однобічного
зволоження поверхні (глибина 30 мм, ширина 200 мм). Встановлено, що
наявність такого пошкодження спричиняє значне горизонтальне
переміщення та впливає на напружено-деформований стан конструкції.**

**This research focuses on reinforced concrete beams that exhibit asymmetric
damage when subjected to external loading. The beams were designed and
manufactured at a precast concrete plant. Comprehensive design solutions and
detailed working drawings of the specimens are provided, showing the exact
dimensions and reinforcement arrangements. The experimental setup is
depicted, illustrating the placement of all measurement instruments, supports,
and loading points. Strains of compressed concrete zone and tensile
reinforcement were measured using high-precision dial gauges with a
resolution of 0.001 mm, while three additional dial indicators with a resolution
of 0.01 mm recorded support displacements and settlements. The experimental
protocol followed a structured methodology to study the behavior of beams
with partial damage. Damage was applied at a load corresponding to 30% of
the beam's ultimate capacity. The dimensions of the damage were as follows:
width 200 mm, height 100 mm, and depth 30 mm, chosen to realistic structural**

defects. The influence of the introduced damage on the beams' load-bearing performance was examined, including vertical and horizontal deflections and the evolution of strains in both the reinforcement and the compressed concrete zone. Experimental observations revealed that after the reinforcement reached its yield point, the beams continued to deform mainly through plastic elongation in the tensile region and increased compression in the concrete. These results provide critical insights into the response of reinforced concrete members with damage. Furthermore, the findings enhance understanding of deformation localization in beams with asymmetric damage, which is essential for predicting structural performance and ensuring safety under actual service conditions.

Ключові слова: залізобетонна балка, пошкодження, несуча здатність, дефекти
reinforced concrete beam, damage, load-bearing capacity, defects

Вступ. Залізобетон є одним із найпоширеніших та найбільш надійних конструкційних матеріалів у сучасному будівництві завдяки поєднанню високої міцності, жорсткості та довговічності. Його застосування охоплює різні види будівель і споруд, від житлових і громадських будівель до інженерних споруд, мостів та промислових об'єктів. Водночас, незважаючи на високу міцність, залізобетонні конструкції з часом зазнають негативного впливу зовнішніх факторів: впливу вологи, агресивного середовища, температурних коливань, корозії арматури та дії навантажень. Ці чинники призводять до виникнення тріщин, відшарування захисного шару бетону та порушення зчеплення між арматурою і бетоном, що значно впливає на несучу здатність і безпеку конструкцій.

Дослідження таких пошкоджень є актуальним, оскільки під час експлуатації можуть виникати локальні концентрації напружень, асиметричні деформації та нелінійні зміни напружено-деформованого стану, які не враховуються в стандартних проектних розрахунках.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика оцінювання роботи пошкоджених залізобетонних конструкцій у сучасних умовах експлуатації залишається однією з ключових у галузі будівельної механіки та реконструкції споруд. У численних працях вітчизняних і зарубіжних учених наведено результати досліджень впливу різних типів пошкоджень залізобетонних конструкцій, зокрема у статті [1] провели аналіз та класифікували основні типи та дефекти, які знижують несучу здатність. Автори у праці [2] встановили експериментальним шляхом, що виникає косий згин у балках внаслідок неточності монтажу робочої арматури внаслідок чого змінюється напружено-деформований стан залізобетонної балки. У статті [3] досліджували роботу залізобетонної балки із пошкодженням стиснутої зони бетону, встановлено зміну нахилу нейтральної осі та розроблені пропозиції щодо розрахунку пошкоджених балок. Також науковцями [4] проведено аналіз впливу агресивного середовища, що призводить до пошкодження залізобетонних

конструкцій та класифіковано за ознаками пошкодження бетону та арматури.

Наукові роботи [5] демонструють застосування сучасних підходів аналізу конструкцій методом скінченних елементів, автори моделювали тріщиноутворення захисного шару бетону внаслідок корозії арматури, отримані результати чітко продемонстрували місця початку тріщини. Метою дослідження роботи [6] було проведення порівняльного аналізу нелінійної роботи пошкодженої залізобетонної балки, що дало змогу оцінити як пошкодження впливає на поведінку та міцність конструкції проаналізувати відповідність граничних деформацій, переміщень відповідно до випробувань. Одним із сучасних підходів є метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Автори [7] зазначають, що цей метод дозволяє простежити більш детально розвиток деформацій, експериментально випробовувались залізобетонні балки, отримані результати були використані для верифікації чисельної методології. Метод ЦКЗ використовували [8] при проведенні дослідів контрольних та пошкоджених балок, наведено порівняльні значення граничних деформацій отриманих різними методами, автори зазначають велику збіжність результатів отриманих методом скінченних елементів та цифровою кореляцією зображень, оцінили вплив пошкодження на несучу здатність. Аналіз останніх публікацій підкреслює актуальність та потребу в подальших теоретичних та експериментальних дослідженнях у визначенні залишкової несучої здатності пошкоджених залізобетонних конструкцій.

Мета дослідження. Провести випробування залізобетонних балок без пошкодження та із пошкодженням при дії навантаження, що імітує власну вагу та навантаження, вплив якого майже неможливо прибрати (різні типи постійного навантаження: наприклад від вище лежачих конструкцій каркасу).

Задачею дослідження є експериментальне визначення несучої здатності та деформативності залізобетонних балок при несиметричному пошкодженні за низького рівня діючого навантаження.

Методика дослідження. Для виконання експерименту були запроектовані та залізобетонні балки. Проектні розміри каркасу зображені на (рис.1)

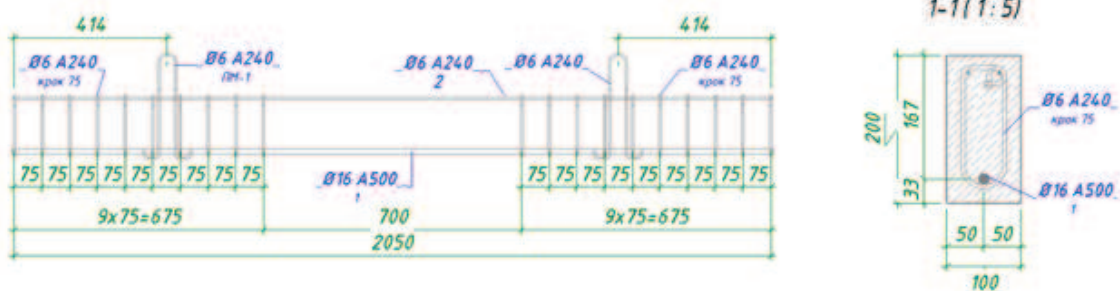


Рис. 1. Проектні креслення балок серії КБ-1

Довжина балок 2100 мм. Висота перерізу балок 200 мм, ширина 100 мм. Нижня робоча прийнята діаметром 16, класу А500С, та верхня арматура діаметром 6А240. Для аналізу впливу нерівномірного пошкодження

попередньо було проаналізовано та змодельовано низку варіацій пошкоджень за допомогою методу скінченних елементів [9]. Після виконаного аналізу визначили тип пошкодження (рис.2), який буде мати вплив на зміну напружено-деформованого стану (НДС).

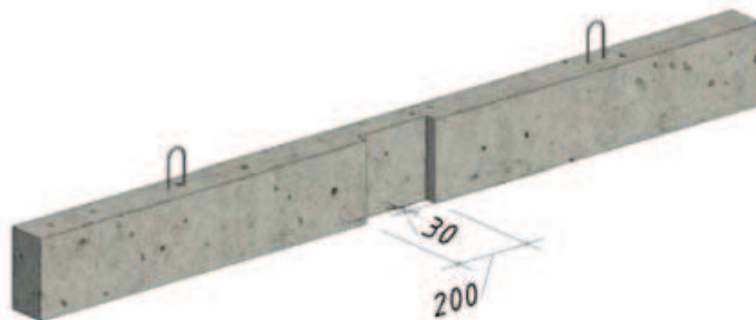


Рис. 2. Загальний вигляд та параметри пошкодження.

Для реалізації поставленого завдання пошкодження в зоні чистого згину експериментального зразка здійснювалось поетапно за допомогою кутової шліфувальної машинки (рис.3). Конструкція складається з кожуха та двох дисків, який закріплюється на інструменті та дозволяє контролювати глибину різку для дотримання потрібного пошкодження. Параметри пошкодження наступні: ширина пошкодження 200 мм, висота 100мм, глибина пошкодження 30 мм. Здійснення пошкодження відбувалось при навантаженні 30% від несучої здатності контрольних балок, що були випробувані без пошкоджень.



Рис. 3. Поетапне пошкодження експериментальної балки.

Навантаження експериментального зразка здійснювалось в 1/3 прольоту двома прикладеними силами, із кроком навантаження 10% від несучої здатності балки з витримкою 10 хвилин. Прикладання сили здійснювалось за допомогою розподільчої траверси та домкрата, величина прикладеного навантаження контролювались за допомогою динамометрів Д10, Д11. Вертикальні прогини вимірювались індикаторами годинникового типу ПВ-11, ПВ-12, ПВ-13. Горизонтальні прогини фіксувались індикаторами ПГ-14, ПГ-15, ПГ-16 із ціною поділки 0.01мм Вимірювання прогинів здійснювалось у 3-х

точках: по центрі експериментального зразка та в 1/3 прольоту в зоні прикладання сили (див рис.4). Дослід проводився у науково-дослідній лабораторії кафедри «Будівельних конструкцій та мостів» Національного університету «Львівська політехніка».

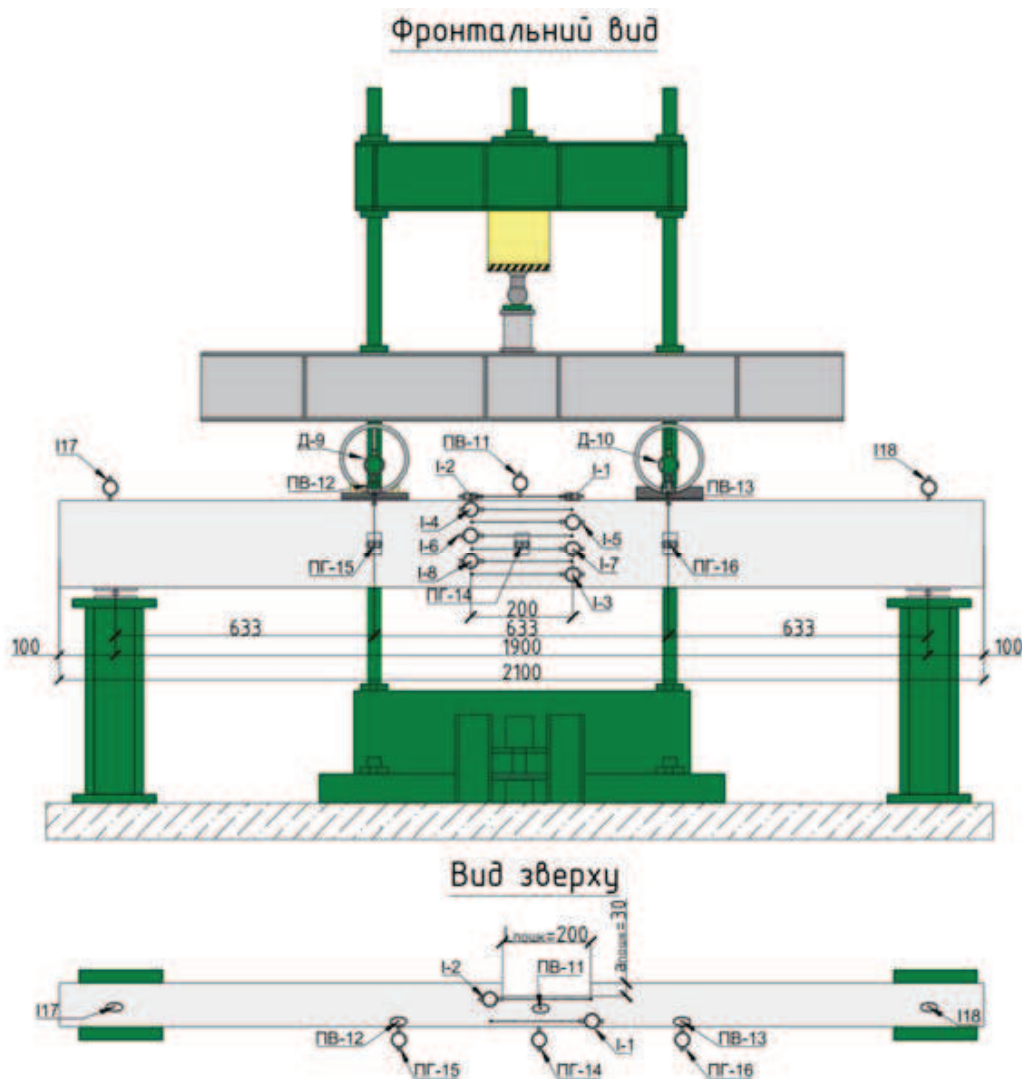


Рис. 4. Схема прикладення навантаження та розміщення вимірювальних приладів.

Деформації бетону вимірювались за допомогою 7 мікроіндикаторів годинникового типу із ціною поділки 0,001 мм з базою в 200 мм. Деформації арматури здійснювалось 1 мікроіндикатором. базою 200мм. Прилади розташовувались по висоті балки, перший прилад від верхньої грані бетону 20, усі решта з інтервалом в 30мм. Мікроіндикатори закріплювались за допомогою металевих тримачів попередньо приклеєних до поверхні залізобетонної балки.



Рис.5. Вигляд експериментального стану

Результати дослідження. Для порівняння впливу пошкодження наведено характер руйнування контрольних балок та пошкоджених балок на рис 6.

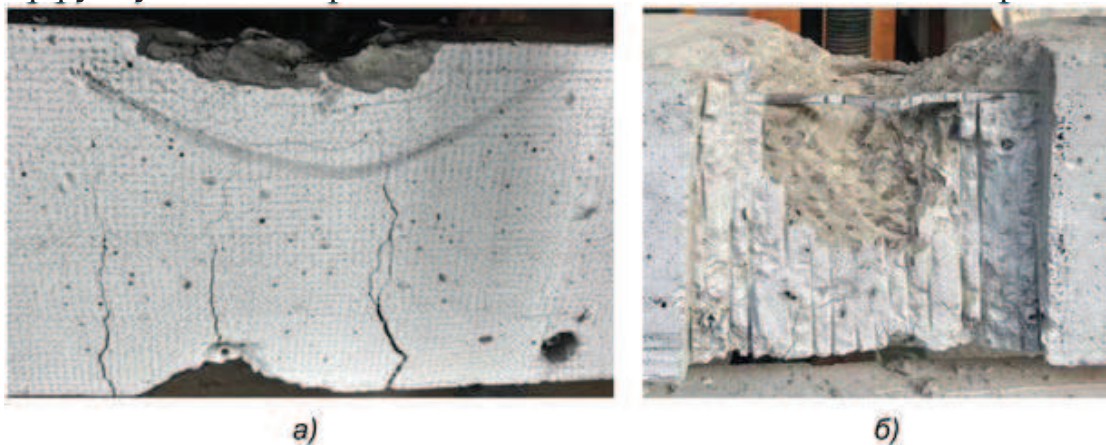
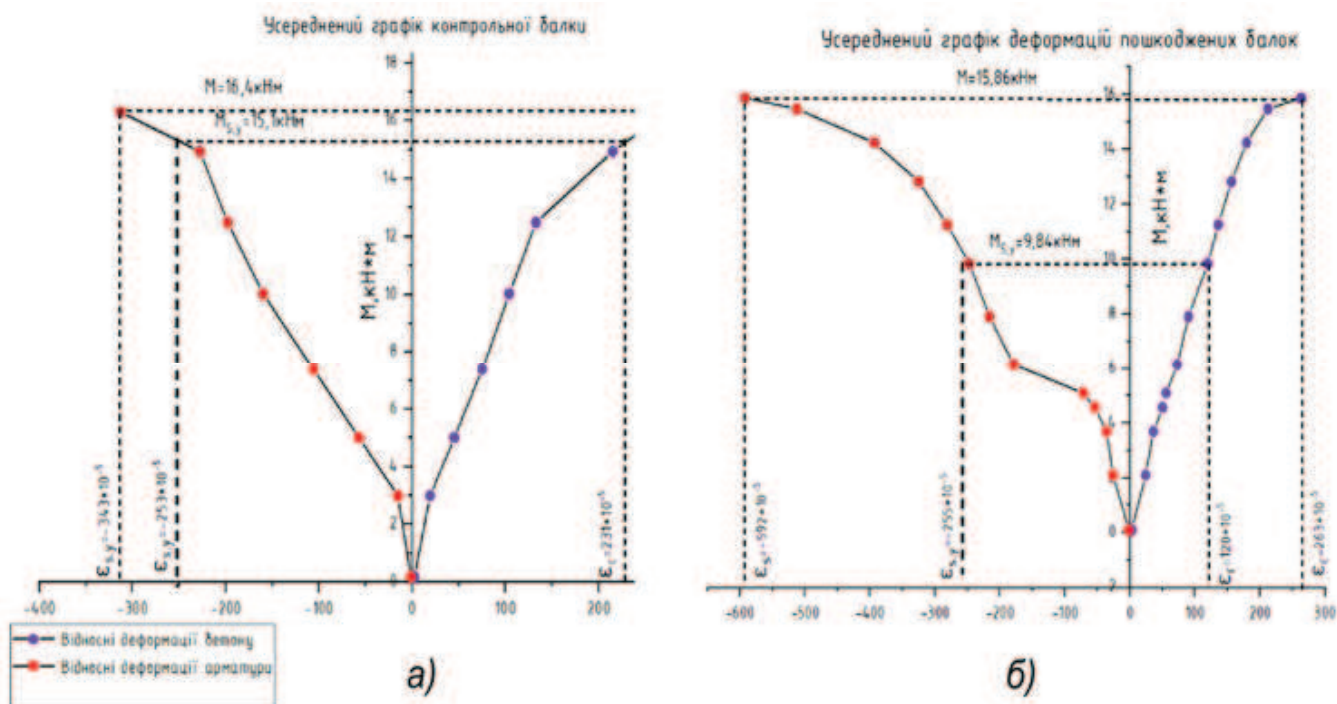


Рис.6. а) характер руйнування контрольної балки. б) характер руйнування пошкодженої балки.

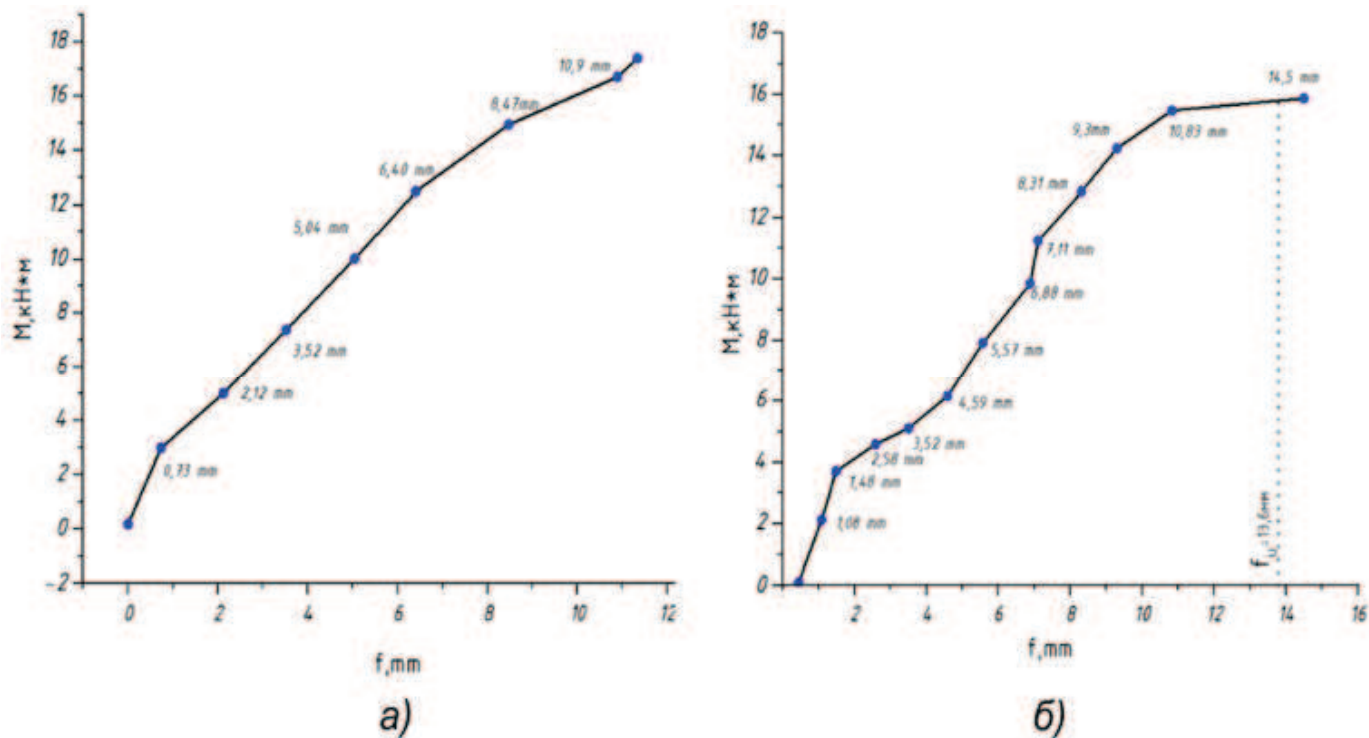
Усереднений графік приросту деформації стиснутої зони бетону, та розтягнутої арматури для контрольних та пошкоджених балок зображений на рис.7. Для пошкоджених балок при досягненні $M_{s,y} = 9.84 \text{ кН}\cdot\text{м}$, відбулось вичерпання несучої здатності залізобетонної балки через досягнення межі текучості робочої арматури, для контрольних балок при $M_{s,y} = 15.1 \text{ кН}\cdot\text{м}$. При $M = 15.86 \text{ кН}\cdot\text{м}$ для пошкодженої балки максимальні значення відносних деформацій стиснутого бетону становили $263 \cdot 10^{-5}$, максимальні значення відносних деформацій розтягнутої арматури становили $592 \cdot 10^{-5}$. Подальше зростання відносних деформацій відбувалось переважно внаслідок розвитку пластичних деформацій у розтягнутій зоні та інтенсивнішого стиснення бетону в зоні згину. Отримані граничні значення деформацій стиснутого бетону та арматури свідчать про повне вичерпання несучої здатності балки й перехід конструкції до стадії остаточного руйнування, фізичне руйнування пошкодженої балки відбулось при $M_{\max} = 16,45 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а контрольної балки досягло при $M_{\max} = 20,1 \text{ кН}\cdot\text{м}$. На рис.8 показано графік вертикальних прогинів для контрольної та пошкодженої балки, максимальний зафіксований прогин контрольної балки становив $f_{\max} = 11,7 \text{ мм}$. Після досягнення граничних

деформацій бетону без збільшення навантаження, візуально спостерігалось збільшення прогину яке перевищило граничний прогин, який становить $f_u=12.6$ мм, максимальні зафіксовані прогини пошкодженої балки становлять



$f=14,5$ мм.

Рис. 7. Графік відносних деформацій стиснутої зони бетону та арматури для



а) контрольних б) пошкоджених балок.

Рис. 8. Графік приросту прогинів а) контрольної; б) пошкодженої балки

Після виконання пошкодження розмірами 200х200х30 мм в зоні чистого згину спостерігався приріст горизонтальних переміщень із збільшенням навантаження. На рис.9 зображено графік горизонтальних переміщень вздовж поверхні балки в залежності від навантаження.

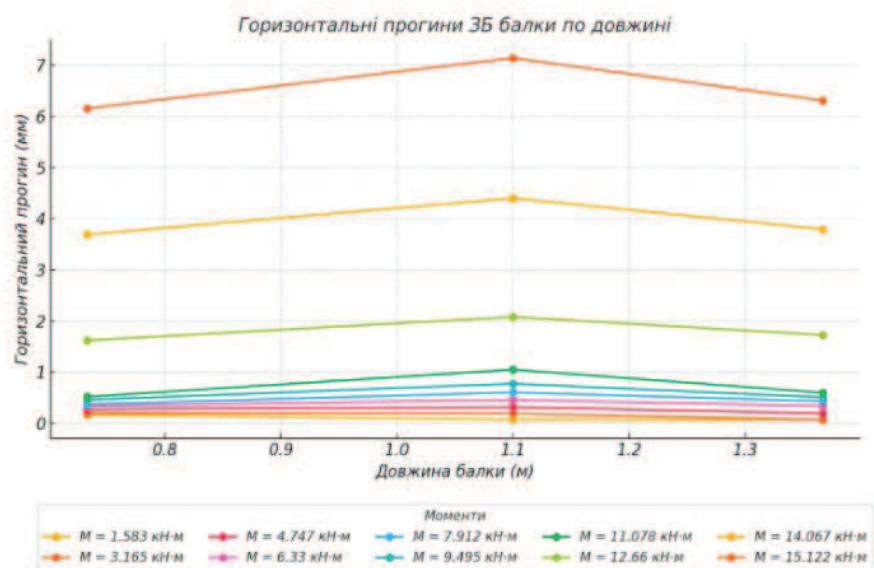


Рис. 9. Графік приросту горизонтального вигину

При досягненні арматурою межі текучості горизонтальні прогини складали усереднено $f=1,4$ мм, при досягненні межі міцності арматури та відносних граничних деформацій бетону горизонтальні прогини складали $f=7,2$ мм. У табл.1. наведені порівняльні значення між контрольними та пошкодженими балками

Таблиця 1.

Порівняльні значення контрольної та пошкодженої балки

Параметр	Контрольна балка	Пошкоджена балка	Відсоткове співвідношення
Фізичне руйнування M_{max} кН·м	20,1	16,45	22%
Основні характеристики дослідних зразків на момент вичерпання несучої здатності при досягненні арматурою межі текучості			
Момент межі текучості $M_{s,y}$ кН·м	15.1	9.84	34,83%
Деформація арматури $\epsilon_{s,y}$	$255 \cdot 10^{-5}$	$255 \cdot 10^{-5}$	-
Деформація бетону $\epsilon_{c,y}$	$231 \cdot 10^{-5}$	$120 \cdot 10^{-5}$	48,05%
Прогин	8.7 мм	4.8 мм	44,81%
Основні характеристики дослідних зразків на момент досягнення граничних деформацій стиснутого бетону			
Граничний Момент M кН·м	16.4	15.86	3,3%
Деформація бетону $\epsilon_{c,y}$	$263 \cdot 10^{-5}$	$263 \cdot 10^{-5}$	-
Деформація арматури $\epsilon_{s,y}$	$592 \cdot 10^{-5}$	$592 \cdot 10^{-5}$	-
Прогин	11.7 мм	14.5 мм	23,93%

Висновки. Було проведено випробування залізобетонних балок із пошкодженнями при дії навантаження. Наведений аналіз порівняльних значень контрольної та пошкодженої балки дозволяє зробити висновок, що пошкодження суттєво вплинуло на експлуатаційні характеристики. Момент у пошкодженій серії при якому настає текучість арматури $M_{s,y}$ знизився на 34,8%, при цьому граничний момент вичерпання експлуатаційної придатності знизився лише на 3,3%. При досягненні межі текучості вертикальний прогини пошкодженої балки зменшився на 44,8%. Можна стверджувати, що приріст горизонтального вигину спричинив зменшення вертикального прогину, незважаючи на зменшення моменту при якому настала текучість арматури. Це свідчить, що залізобетонна балка фактично працює в умовах складного напружено-деформованого стану.

1. M. Lobodanov, P. Vegera, and Z. Blikharskyi, "Influence analysis of the main types of defects and damages on bearing capacity in reinforced concrete elements and their research methods," *Production Engineering Archives*, vol. 22, no. 22, pp. 24–29, Mar. 2019, doi: 10.30657/pea.2019.22.05

2. Воскобійник, О.П., Кітаєв, О.О., Макаренко, Я.В., and Бугасенко, Є.С., "Експериментальні дослідження залізобетонних балок з дефектами та пошкодженнями, які викликають косий згин," *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)– Полтава : ПолтНТУ*, no. 1 (29), p. С. 87-92., 2011.

3. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок / Є. В. Клименко, К. В. Полянський // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. - 2019. - Вип. 76. - С. 24-30.

4. Z. Bonić, G. T. Ćurčić, N. Davidović, and J. Savić, "Damage of Concrete and Reinforcement of Reinforced-Concrete Foundations Caused by Environmental Effects," *Procedia Engineering*, vol. 117, pp. 411–418, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.187.

5. S. Shakib and A. Z. Morshed, "Modeling of Cover Concrete Cracking Due to Uniform Corrosion of Reinforcement," *J. of Eng. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 43–49, Apr. 2021, doi: 10.3329/jes.v12i1.53100.

6. Klymenko Ye.V., Antoniuk N.R., & Polianskyi K.V. (2019). Modeling the work of damaged reinforced concrete beams in the SC "LIRA-SAPR". *Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture*, 77, 58–65. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-58-65>.

7. Sanz-Diez de Ulzurrun Casals, Gonzalo & Zanuy, Carlos. (2023). Assessment of the Bending Behaviour of RC Beams Under Impact Loads with DIC. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9_22

8. Mykhalevskyi N. A., Vegera P. I., & Blikharskyi Z. Y., (2025). Investigation of stress-strain parameters in RC beams using DIC. *Theory and Building Practice*, 7(1), 31-41. <https://doi.org/10.23939/jtbp2025.01.031>

9. Mykhalevskyi, N.A., Vegera, P.I., & Blikharskyi, Z.Y. (2023). Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package. *Modern construction and architecture*, 6, 54-61. <http://visnyk-odaba.org.ua/2023-06/6-6.pdf>