

DOI: 10.32347/2786-7269.2024.8.315-327

УДК 624.012.36

д-р техн. наук, доцент **Мельник І.В.**,
ihor.v.melnyk@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-7702-1083,
с.н.с. **Приставський Т.В.**,
taras.v.prystavskiy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5455-5157,
Партуга В.П., volodymyr.p.partuta@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-7406-3704,
Якимів Д.Ю.,
danylo.yakymiv.mbdmt.2022@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-3144-1891,
Національний університет «Львівська політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЕРЕХРЕСНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

Подано конструкцію дослідних зразків і результати дослідження напружено-деформованого стану бетону перехресних балок в зоні двовісного стиску. Показано, що двовісний стиск впливає на деформаційні характеристики бетону.

Ключові слова: залізобетонні балки; двовісно стиснутий бетон; напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. В останні роки все ширше використовують монолітні плоскі залізобетонні перекриття, особливо в будівлях цивільного призначення (житло, офіси тощо). Спостерігаємо також тенденцію до збільшення прольотів таких перекриттів і використання їх у торговельних і виставкових комплексах. Все ширше використовують монолітні залізобетонні плити у фундаментах, у прогонних будовах мостів та інших спорудах.

Для суттєвого зменшення ваги плоских монолітних залізобетонних перекриттів та інших плитних конструкцій доцільно використовувати ефективні вставки як окремі вироби з відносно легких і дешевих матеріалів, які розташовують в середній частині перерізу і залишають у плиті після її бетонування [1].

Модуль пружності і міцність матеріалу вставок є на порядок меншим від бетону, тому простір, який вони займають в тілі бетону в конструкційному відношенні слід вважати порожниною.

Конструктивні вирішення плитних конструкцій з такими вставками можна розділити загалом на два типи:

- з однонаправленим трубчастим розташуванням вставок;
- з двонаправленим розташуванням вставок.

За однонапрявленого розташування вставок отримуємо конструкцію монолітної плити з розташуванням проміжних балок-ребер в одному напрямі. Експериментальні і теоретичні дослідження таких плитних конструкцій є доволі обширним [1, 7-11].

Двонапрявлене розташування вставок формують іншу конструктивну систему, в якій проміжні балки-ребра мають, як правило, взаємоперпендикулярне розташування. Бетон верхньої зони балок зазнає двовісного стиску, який змінює його вихідні деформативні і міцнісні характеристики.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження двовісно стиснутого бетону проводилися в основному на кубових та призмових елементах [4] і відображені в нормативних документах. Рекомендації щодо врахування двовісного стиску бетону в плитних конструкціях не розроблені. В дисертаційній роботі [2] обґрунтовано розрахункові схеми розрахунку плитних конструкцій з двонапрявленим розташуванням вставок з використанням аналітичних залежностей, отриманих в дослідженнях [6] на бетонних призмах. Проте вони потребують експериментального підтвердження для залізобетонних конструкцій, бетон яких зазнає двовісного стиску.

Постановка завдання. Експериментальні дослідження перехресних залізобетонних балок і моделювання їх роботи в програмному комплексі ЛПРА з урахуванням роботи складних перехресних балок.

Викладення основного матеріалу. Для вирішення поставленої задачі були запроектовані, виготовлені і досліджені три основних типи дослідних зразків марки ПП, які мають перехресне розташування балок. Крім цього, виготовлено чотири типи звичайних балок марки ЛП, з яких складаються перехресні балки.

Таблиця 1.

Загальна характеристика дослідних зразків і мета досліджень

Марка (умовне позначення)	Загальна характеристика	Мета досліджень
К-1	Куби бетонні 10x10x10 см	Визначення міцності бетону
П-1	Призми бетонні 10x10x40 см	Визначення міцності бетону і деформативності
ЛП-1	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x0,1x1,4 м суцільного перерізу	Дослідження міцності, жорсткості, тріщиностійкості при випробуванні двома зосередженими силами
ЛП-2a	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x0,1x1,3 м суцільного перерізу	

Продовження таблиці 1.

Марка (умовне позначення)	Загальна характеристика	Мета досліджень
ЛП-2б	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x0,1x1,1 м суцільного перерізу	Дослідження міцності, жорсткості, тріщиностійкості при випробуванні чотирма зосередженими силами
ЛП-2в	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x0,1x0,9 м суцільного перерізу	
ПП-1	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x1,3x1,4 м суцільного перерізу	
ПП-2	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x1,1x1,4 м суцільного перерізу	
ПП-3	Дослідний залізобетонний зразок 0,16x0,9x1,4 м суцільного перерізу	

Конструкція і технологія виготовлення дослідних зразків. Фізико-механічні характеристики матеріалів

Конструкція лінійних балок марки ЛП і перехресних балок марки ПП подана нижче на прикладі дослідних зразків ЛП-2 і ПП-1.

В середній частині балок в зоні чистого згину лише нижня робоча арматура, яка прийнята за результатами перевірних розрахунків так, щоб руйнування відбулось по стиснутому бетону.

Поза зоною чистого згину передбачена верхня і поперечна арматура для упередження руйнування по похилих перерізах.

Геометричні розміри дослідних зразків прийняті з врахуванням конструкції наявного силового стенду та технічних характеристик випробувального устаткування.

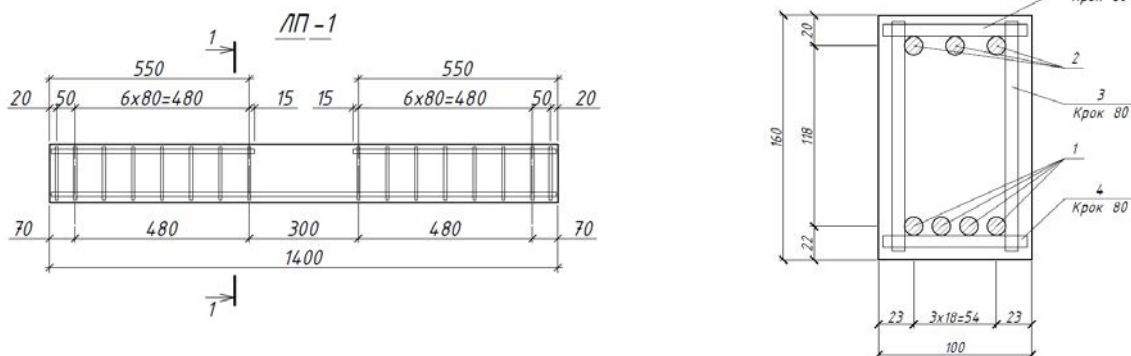


Рис. 1. Конструкція дослідних зразків марки ЛП-1.

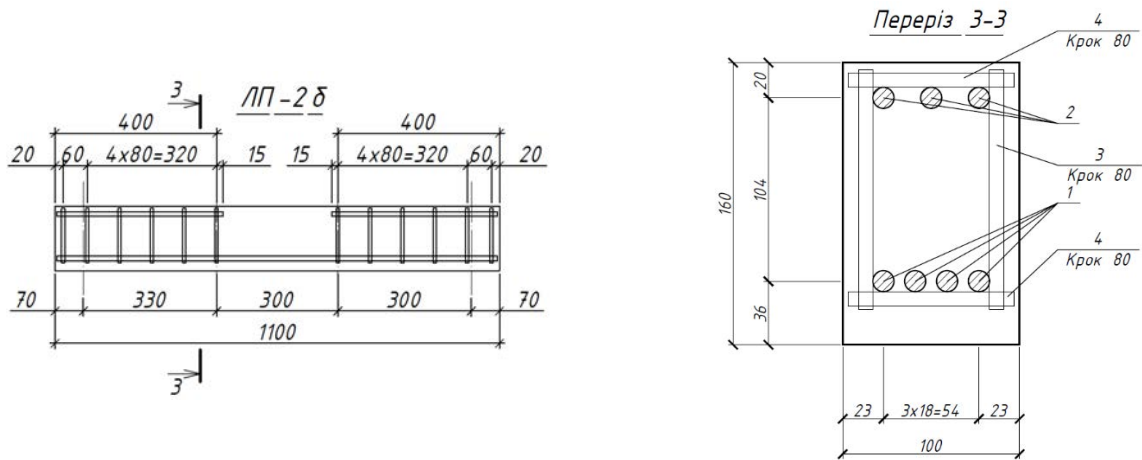


Рис. 2. Конструкція дослідних зразків ЛП-26.

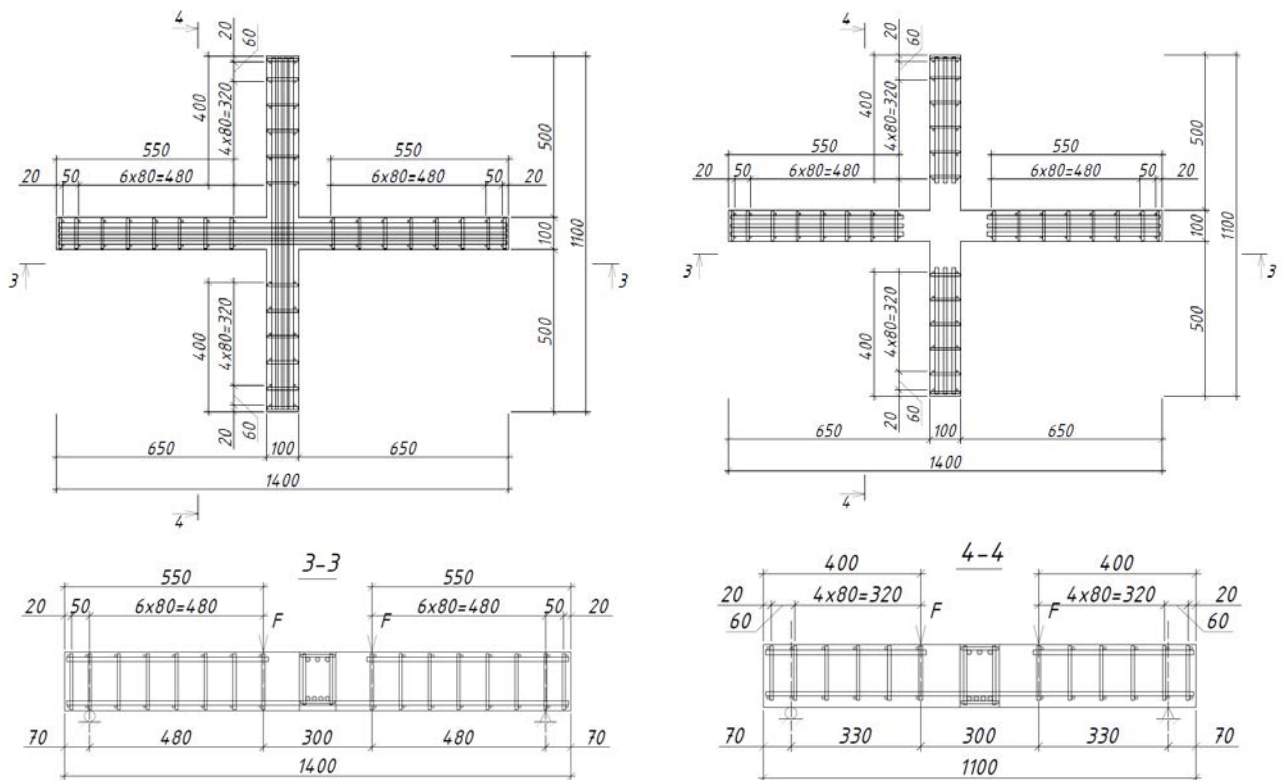


Рис. 3. Конструкція дослідних зразків ПП-2.

Виготовлення дослідних зразків.

Дослідні зразки виготовляли у виробничому цеху ТЗОВ «Трамбетон» (м. Львів). Для цього використали металевий піддон, який формував нижню частину лінійних і перехресних дослідних зразків. Вертикальні елементи опалубки з тирсоплити з'єднували між собою і фіксували металевими стержнями, привареними до піддону. Металеві каркаси дослідних зразків після

виставлення у проектне положення також фіксували при бетонуванні та ущільненні бетонної суміші на вібростолі.

До укладання в опалубку до повздовжніх стержнів дослідних зразків в зоні чистого згину знизу приварювали металеві коротуни з різьбою для подальшого кріплення механічних приладів для вимірювання деформацій.

Моделювання роботи дослідних зразків в програмному комплексі «ЛІРА»

Для моделювання НДС всіх дослідних зразків були використані закони нелінійного деформування матеріалів з такими характеристиками:

- бетону $E_b = 0,352$ МПа, $f_{bu} = 265$ МПа, $\varepsilon_{bu} = 0,002$ МПа, $\varepsilon_{bt,u} = 0,0002$ МПа;
- арматури $E_s = 2,06 \times 10^5$ МПа, $f_{su} = 520$ МПа.

Вибіркові результати моделювання (ізополя напружень і прогини) подані нижче на прикладі дослідних зразків марок ПЛ-1, ПЛ-2б, ПП-2 (рис. 4-8).

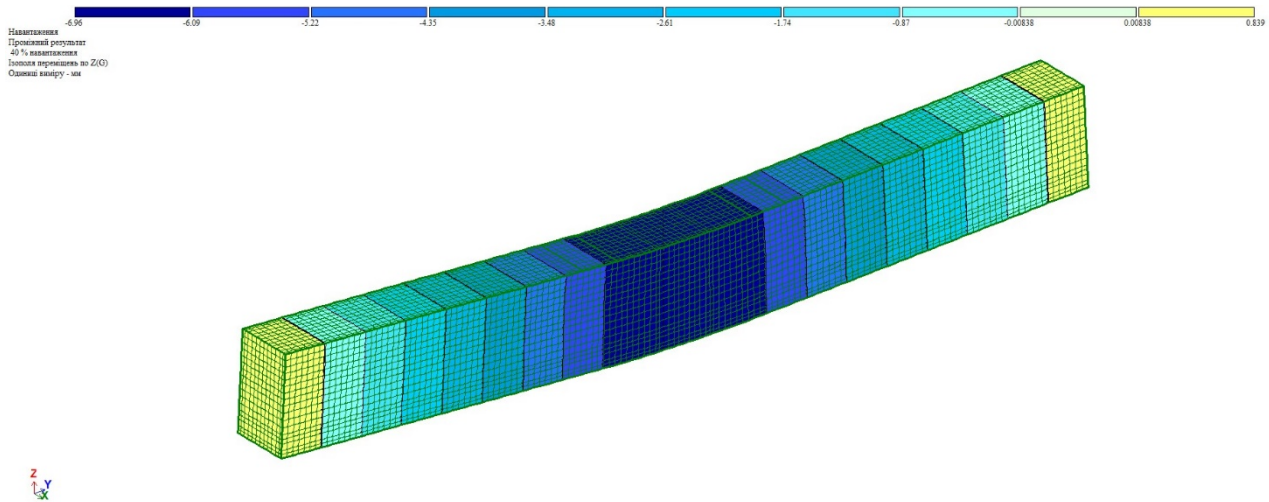


Рис. 4. Схема прогинів дослідного зразка ПЛ-1.

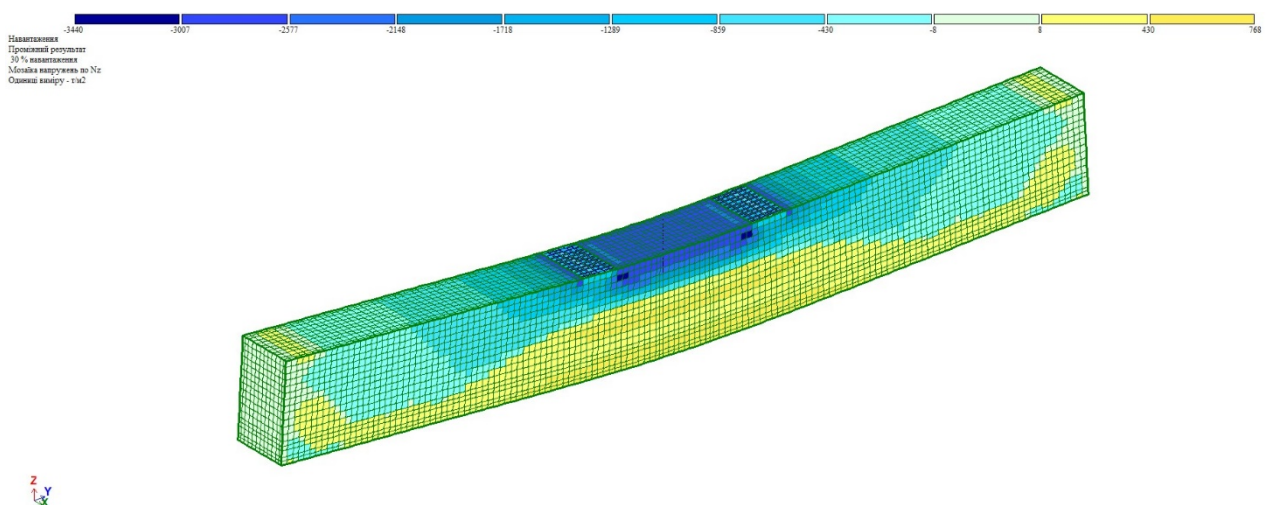


Рис. 5. Мозаїка напружень дослідного зразка ПЛ-1 по N_z .

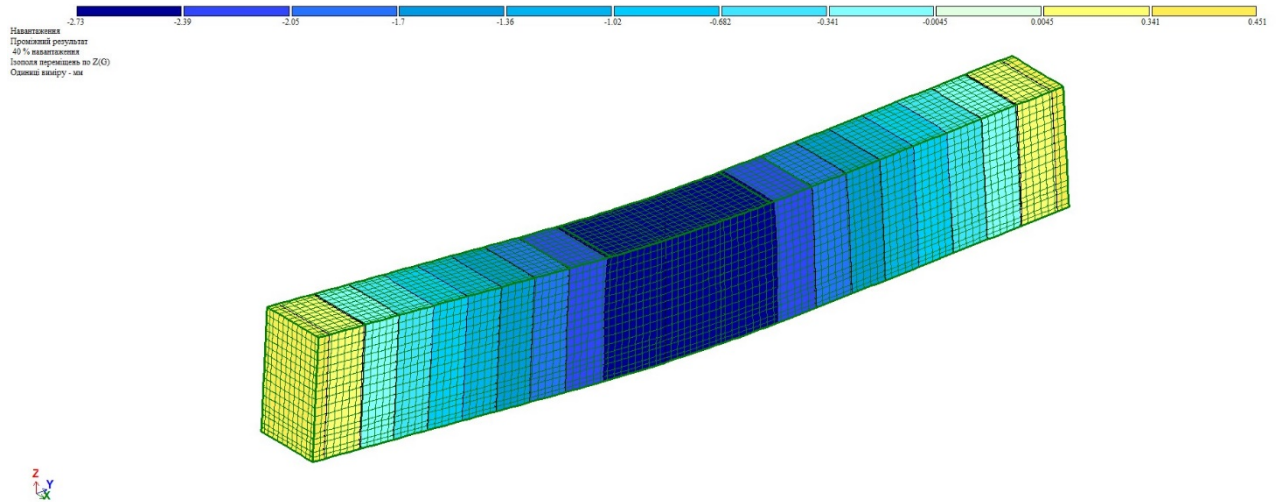


Рис. 6. Схема прогинів дослідного зразка ПЛ-2б.

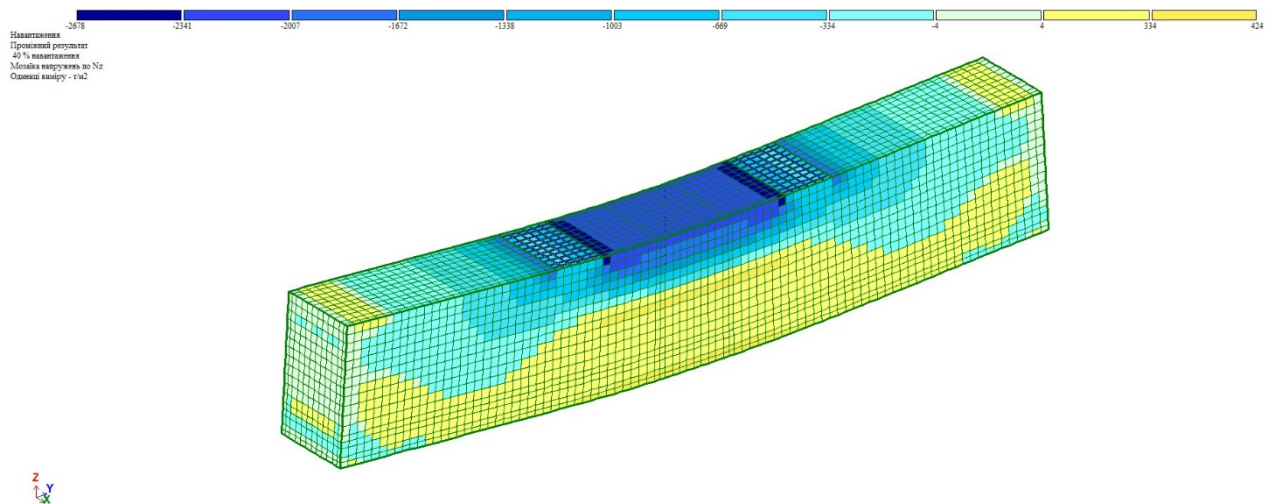
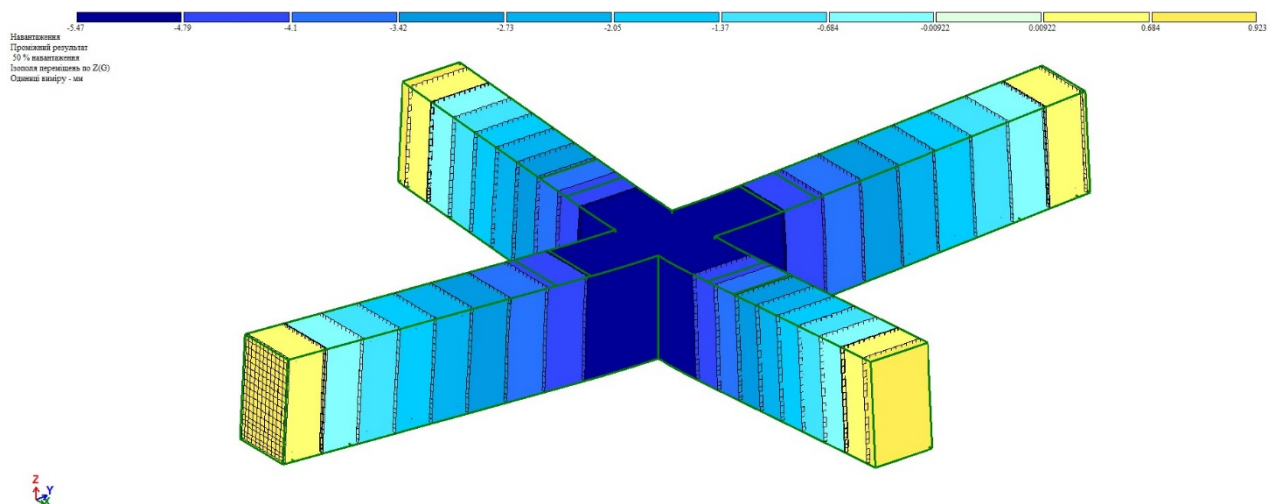
Рис. 7. Мозаїка напружень дослідного зразка ПЛ-2б по N_z .

Рис. 8. Схема прогину дослідного зразка ПП-2 з 50 % завантаження.

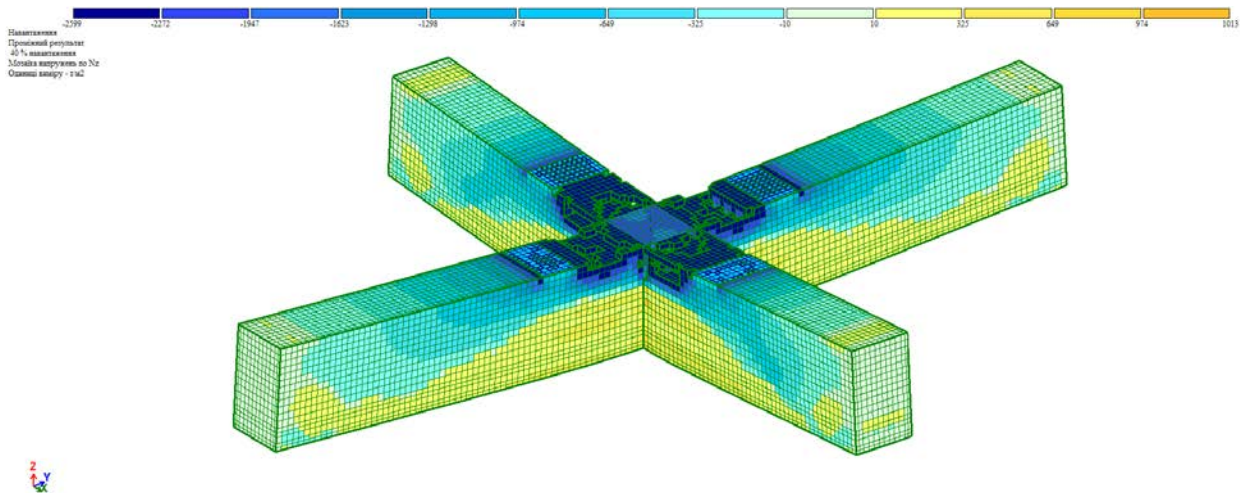


Рис. 9. Мозаїка напружень дослідного зразка ПЛ-2 по N_z .

Експериментальні значення прогинів були співставлені з прогинами у відсотковому діапазоні навантажень, отриманими в ПК «ЛІРА».

З співставлення бачимо задовільну збіжність експериментальних величин прогинів і прогинів, отриманих в ПК «ЛІРА».

Висновки:

1. Вперше проведені експериментальні дослідження перехресних залізобетонних балок.
2. Отримано експериментальні значення прогинів (як інтегральної величини деформацій) лінійних і перехресних балок.
3. Змодельовано НДС дослідних зразків з використанням об'ємних елементів і фактичних механічних характеристик бетону і арматури.
4. ПК «ЛІРА» дає задовільну збіжність з експериментальними значеннями прогинів як з важливою інтегральною величиною загальних деформацій згинаних залізобетонних зразків.

Список використаних джерел

1. Мельник І.В., Сорохтей В.М., Приставський Т.В. Плоскі залізобетонні плитні конструкції з ефективними вставками: монографія. Львів: Вид-во Львів. політехніки. 2018. 272 с.
2. Мельник І.В. Напружено-деформований стан та експериментальне впровадження порожнистих бетонних і залізобетонних конструкцій: дис. докт. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди». Львів, 2021. 473 с. <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/9388/disertaciya-melnik-iv.pdf>.
3. Бамбура А.М., Мельник І.В., Білозір В.В., Сорохтей В.М. Розрахунок несучої здатності фрагментів монолітного залізобетонного

перекриття з трубчастими вставками за деформаційним методом. *Наука та будівництво*. 2018. Вип. 2018'1. С. 4–11.

4. Бамбура А.Н., Давиденко А.И. (1989) Экспериментальные исследования закономерности деформирования бетона при двухосном сжатии. *Строительные конструкции*. Вып. 42. С. 95-98.

5. Барашиков А.Я., Журавський О.Д. Дослідження прогинів залізобетонних плит з урахуванням одноосного та двоосного попереднього обтиску. *Бетон и железобетон в Украине*. 2000. № 3. С. 2–8.

6. Давыденко А.И. Влияние сложного напряженного состояния на параметры диаграммы сжатия бетона и его учет при расчете железобетонных балок на деформируемом основании: дис. кандидата техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции». Киев, 1988. 154 с.

7. Журавський О.Д., Мельник І.В. Робота монолітних залізобетонних плит з постнапруженою арматурою. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». *Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 135–138.

8. Кріпак В.Д., Адаменко В.М. Несуча здатність та деформативність залізобетонних плит при чистому згині моментами різних знаків. *Современные проблемы строительства: Ежегодный научно-технический сборник*. 2005. С. 269–275.

9. Кріпак В.Д., Антонов Р.Є. Монолітні плоскі перекриття з порожнистими вкладишами. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. Вип. 8. С. 135-145.

10. Мельник І.В. Плоскі залізобетонні монолітні перекриття з ефективними вставками. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». *Теорія і практика будівництва*. 2000. № 409. С. 141–145.

11. Мельник І.В., Сорохтей В.М. Конструювання і дослідження плоских монолітних залізобетонних перекриттів з ефективними вставками. *Budownictwo i inzynieria srodowiska. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 2009. z. 55. S. 27–36.

12. Мельник І.В., Бачкай О.С. Принципові конструктивні вирішення монолітних плоских залізобетонних прогонових будов мостів з полегшуючими вставками. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». *Теорія і практика будівництва*. 2015. № 823 [56]. С. 229–235.

13. A. Bambura, I. Mel'nyk, V. Bilozir, V. Sorokhtey, T. Prystavskyi, V. Partuta. The stressed-deformed state of slab reinforced concrete hollow structures considering the biaxial compression of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 1/7(103) (2020). P. 34-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194145.

14. Kupfer H., Gerstle K. (1973) Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the Engineering Mechanics Division. Proceeding amark. Soc. Civ. Eng.* Vol. 99. №4. 853-866 p.
15. Kupfer H.B., Hilsdorf H.K. Rűch H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *ASI Journal, Proceedings.* 1969. Vol. 66. P. 656-666.
16. Laurent Charpin, YannLe Pape, Éric Coustabeau, Éric Toppani, Grégory Heinfling, CarolineLe Bellego, Benoît Masson, José Montalvo, Alexis Courtois, Julien Sanahuja, Nanthilde Reviron (2018) A 12 year EDF study of concrete creep under uniaxial and biaxial loading. *Cement and Concrete Research.* Vol. 103. P. 140-159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.009>.
17. Matthias Quast, Manfred Curbach (2015) Behaviour of concrete under biaxial dynamic loading. *Proceeding of Fifth International Workshop on Perfomance. Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading – PROTECT 2015*, pp.3-10. URL:
[https://books.google.com.ua/books?id=9c4OCgAAQBAJ&pg=PA10&lpg=PA10&dq=M.+Curbach,+M.+Quast,+Concrete+under+biaxial+impact+loading,+in:+S.+Hiern aier+\(ed.\)&source=bl&ots=e-R5fj6aOH&sig=ACfU3U170x4D0YgUj13CF3tRP3yadvuI4A&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwi8itTu8NLIhVrwsKHZ__B7cQ6AEwAnoECAkQAQ#v=onepage&q=M.%20Curbach %2C %20M. %20Quast %2C %20Concrete %20under %20biaxial %20impact %20loading %2C %20in %3A %20S. %20Hiermaier %20\(ed.\)&f=true](https://books.google.com.ua/books?id=9c4OCgAAQBAJ&pg=PA10&lpg=PA10&dq=M.+Curbach,+M.+Quast,+Concrete+under+biaxial+impact+loading,+in:+S.+Hiern aier+(ed.)&source=bl&ots=e-R5fj6aOH&sig=ACfU3U170x4D0YgUj13CF3tRP3yadvuI4A&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwi8itTu8NLIhVrwsKHZ__B7cQ6AEwAnoECAkQAQ#v=onepage&q=M.%20Curbach %2C %20M. %20Quast %2C %20Concrete %20under %20biaxial %20impact %20loading %2C %20in %3A %20S. %20Hiermaier %20(ed.)&f=true).
18. Matthias Quast, Manfred Curbach (2017) Concrete under biaxial dynamic compressive loading. *Procedia Engineering.* Vol. 210. P. 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.044>.
19. Mel'nyk I.V. (2014) Analysis of the Stiffnesses of Reinforced-Concrete Plane Monolithic Floors with Tubular Inserts. *Materials Science*, 50(4), 564-570. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9754-7>.
20. Murray D. Concrete Plasticity Theory for Biaxial Stress Analysis. *Journal Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* 1979. Vol. 105. P. 989-1006.
21. Rong C., Shi Q., Zhang T., Zhao H. (2018) New failure criterion models for concrete under multiaxial stress in compression. *Construction and Building Materials.* Vol. 161. P. 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.106>.
22. SKYRAIL – надежная и экономичная альтернатива традиционным перекрытиям. URL:
http://tskdom.ru/apps/tsknew/add_files/files/tskdom_skyrail.pdf.
23. T. Hampel, K. Speck, S. Scheerer, R. Ritter, M. Curbach (2009) High-Performance Concrete under Biaxial and Triaxial Loads. *Journal of Engineering Mechanics.* Vol. 135, Issue 11. P. 1274-1280. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2009\)135:11\(1274\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:11(1274)).

24. Tasuji N.E. Slate F.O., Filson A.H. Stress-strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading. ASI Journal. 1978. Vol. 75. №7. P. 306-312.

25. Zhiheng Deng, Jun Sheng, Yumei Wang (2019) Strength and Constitutive Model of Recycled Concrete under Biaxial Compression. KSCE Journal of Civil Engineering. Vol. 23, Issue 2. P. 699-710. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0575-8>.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor **Ihor Melnyk**,
Senior researcher **Taras Prystavskiy**,
Ph.D student **Volodymyr Partuta**, **Danylo Yakymiv**,
Lviv Polytechnic National University

FEATURES OF THE CONSTRUCTION AND STRESS-STRAIN STATE OF CROSS REINFORCED CONCRETE BEAMS

The article substantiates the relevance and necessity of experimental and theoretical studies of reinforced concrete structures under biaxial compression.

To address this task, three main types of test specimens with intersecting beam arrangements were designed, manufactured, and studied. Additionally, four types of regular beams, which make up the intersecting beams, as well as cubes and prisms for determining the actual deformation and strength characteristics of concrete, were produced.

In the central part of the beams in the pure bending zone, only the lower working reinforcement was provided, which was determined based on verification calculations to ensure failure occurs in the compressed concrete. Outside the pure bending zone, upper and transverse reinforcement was provided to prevent failure in inclined sections.

The geometric dimensions of the test specimens were determined considering the design of the existing power stand and the technical characteristics of the testing equipment.

The behavior of the test specimens was also modeled using the "LIRA" software suite. The experimental deflection values were compared with the deflections in the percentage load range obtained in the "LIRA" software suite. The comparison shows satisfactory convergence between the experimental deflection values and those obtained in the "LIRA" software suite.

The main results of the research are as follows:

For the first time, experimental studies of intersecting reinforced concrete beams were conducted. Experimental deflection values (as an integral measure of deformations) of linear and intersecting beams were obtained. The stress-strain state

of the test specimens was modeled using volumetric elements and the actual mechanical characteristics of concrete and reinforcement. The "LIRA" software suite provides satisfactory convergence with the experimental deflection values, which is an important integral measure of the overall deformations of bent reinforced concrete specimens. Biaxial compression affects the deformation characteristics of concrete.

Keywords: reinforced concrete beams; biaxially compressed concrete; stress-strain state.

REFERENCES

1. Melnyk I.V., Sorokhitei V.M., Prystavskiy T.V. Ploski zalizobetonni plytni konstruktsii z efektyvnymy vstavkamy: monohrafiia. Lviv: Vyd-vo Lviv. politekhniki. 2018. 272 s. {in Ukrainian}
2. Melnyk I.V. Napruzhenno-deformovanyi stan ta eksperymentalne vprovadzhennia porozhnystykh betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsii: dys. dokt. tekhn. nauk: spets. 05.23.01 «Budivelni konstruktsii, budivli ta sporudy». Lviv, 2021. 473 s. <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/9388/disertaciya-melnik-iv.pdf>. {in Ukrainian}
3. Bambura A.M., Melnyk I.V., Bilozir V.V., Sorokhitei V.M. Rozrakhunok nesuchoi zdatnosti frahmentiv monolitnoho zalizobetonnoho perekryttia z trubchastymy vstavkamy za deformatsiynym metodom. Nauka ta budivnytstvo. 2018. Vyp. 20181. S. 4–11. {in Ukrainian}
4. Bambura A.N., Davydenko A.Y. (1989) Экспериментальные исследования закономерности деформирования бетона при двукосном сжатии. Строительные конструкции. Вып. 42. S. 95-98. {in Russian}
5. Barashykov A.Ia., Zhuravskiy O.D. Doslidzhennia prohyniv zalizobetonnykh plyt z urakhuvanniam jednoosnoho ta dvoosnoho poperednoho obtysku. Beton y zhelezobeton v Ukrayne. 2000. № 3. S. 2–8. {in Ukrainian}
6. Давыденко А.У. Влияние сложного напряженного состояния на параметры диаграммы сжатия бетона и его учет при расчете железобетонных балок на деформируемом основании: дис. кандидата техн. наук: спets. 05.23.01 «Строительные конструкции». Киев, 1988. 154 s. {in Russian}
7. Zhuravskiy O.D., Melnyk I.V. Robota monolitnykh zalizobetonnykh plyt z postnapruzhenoiu armaturoiu. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Teoriia i praktyka budivnytstva. 2013. № 755. S. 135–138. {in Ukrainian}
8. Kripak V.D., Adamenko V.M. Nesucha zdatnist ta deformatyvnist zalizobetonnykh plyt pry chystomu zghyni momentamy riznykh znakov. Современные проблемы строительства: Ежегодный научно-технический сборник. 2005. S. 269–275. {in Ukrainian}

9. Kripak V.D., Antonov R.Ie. Monolitni ploski perekryttia z porozhnystymy vkladyshamy. Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2017. Vyp. 8. S. 135-145. {in Ukrainian}
10. Melnyk I.V. Ploski zalizobetonni monolitni perekryttia z efektyvnymy vstavkamy. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekh–nika». Teoriia i praktyka budivnytstva. 2000. № 409. S. 141–145. {in Ukrainian}
11. Melnyk I.V., Sorokhetei V.M. Konstruiuvannia i doslidzhennia ploskykh monolitnykh zalizobetonnykh perekryttiv z efektyvnymy vstavkamy. Budownictwo i inzynieria srodowiska. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej 2009. z. 55. S. 27–36. {in Ukrainian}
12. Melnyk I.V., Bachkai O.S. Pryntsyповi konstruktyvni vyrishennia monolitnykh ploskykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv z polehshuiuchymy vstavkamy. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnikha». Teoriia i praktyka budivnytstva. 2015. № 823 [56]. S. 229–235. {in Ukrainian}
13. A. Bambura, I. Melnyk, V. Bilozir, V. Sorokhetei, T. Prystavskiyi, V. Partuta. The stressed-deformed state of slab reinforced concrete hollow structures considering the biaxial compression of concrete. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 1/7(103) (2020). P. 34-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194145. {in English}
14. Kupfer H., Gerstle K. (1973) Behavior of concrete under biaxial stresses. Journal of the Engineering Mechanics Division. Proceeding amark. Soc. Civ. Eng. Vol. 99. №4. 853-866 p. {in English}
15. Kupfer H.B., Hilsdorf H.K. Rűch H. Behavior of concrete under biaxial stresses. ASI Journal, Proceedings. 1969. Vol. 66. P. 656-666. {in English}
16. Laurent Charpin, YannLe Pape, Éric Coustabeau, Éric Toppani, Grégory Heinfling, CarolineLe Bellego, Benoît Masson, José Montalvo, Alexis Courtois, Julien Sanahuja, Nanthilde Reviron (2018) A 12 year EDF study of concrete creep under uniaxial and biaxial loading. Cement and Concrete Research. Vol. 103. P. 140-159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.009>. {in English}
17. Matthias Quast, Manfred Curbach (2015) Behaviour of concrete under biaxial dynamic loading. Proceeding of Fifth International Workshop on Performance. Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading – PROTECT 2015, pp.3-10. URL:
[https://books.google.com.ua/books?id=9c4OCgAAQBAJ&pg=PA10&lpg=PA10&dq=M.+Curbach,+M.+Quast,+Concrete+under+biaxial+impact+loading,+in:+S.+Hiern aier+\(ed.\)&source=bl&ots=e-R5fj6aOH&sig=ACfU3U170x4D0YgUj13CF3tRP3yadvuI4A&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwi8itTu8NLIahVrwsKHZ__B7cQ6AEwAnoECAkQAQ#v=onepage&q=M.](https://books.google.com.ua/books?id=9c4OCgAAQBAJ&pg=PA10&lpg=PA10&dq=M.+Curbach,+M.+Quast,+Concrete+under+biaxial+impact+loading,+in:+S.+Hiern aier+(ed.)&source=bl&ots=e-R5fj6aOH&sig=ACfU3U170x4D0YgUj13CF3tRP3yadvuI4A&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwi8itTu8NLIahVrwsKHZ__B7cQ6AEwAnoECAkQAQ#v=onepage&q=M.)

%20Curbach %2C %20M. %20Quast %2C %20Concrete %20under %20biaxial %20impact %20loading %2C %20in %3A %20S. %20Hiermaier %20(ed.)&f=true. {in English}

18. Matthias Quast, Manfred Curbach (2017) Concrete under biaxial dynamic compressive loading. *Procedia Engineering*. Vol. 210. P. 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.044>. {in English}

19. Melnyk I.V. (2014) Analysis of the Stiffnesses of Reinforced-Concrete Plane Monolithic Floors with Tubular Inserts. *Materials Science*, 50(4), 564-570. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9754-7>. {in English}

20. Murray D. Concrete Plasticity Theory for Biaxial Stress Analysis. *Journal Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* 1979. Vol. 105. P. 989-1006. {in English}

21. Rong C., Shi Q., Zhang T., Zhao H. (2018) New failure criterion models for concrete under multiaxial stress in compression. *Construction and Building Materials*. Vol. 161. P. 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.106>. {in English}

22. SKYRAIL – nadezhnaia y ekonomychnaia alternatyva tradytsyonnym perekrytiyam. URL: http://tskdom.ru/apps/tsknew/add_files/files/tskdom_skyrail.pdf. {in English}

23. T. Hampel, K. Speck, S. Scheerer, R. Ritter, M. Curbach (2009) High-Performance Concrete under Biaxial and Triaxial Loads. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 135, Issue 11. P. 1274-1280. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2009\)135:11\(1274\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:11(1274)). {in English}

24. Tasuji N.E. Slate F.O., Filson A.H. Stress-strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading. *ASI Journal*. 1978. Vol. 75. №7. P. 306-312. {in English}

25. Zhiheng Deng, Jun Sheng, Yumei Wang (2019) Strength and Constitutive Model of Recycled Concrete under Biaxial Compression. *KSCE Journal of Civil Engineering*. Vol. 23, Issue 2. P. 699-710. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0575-8>. {in English}