

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ БАЛКИ, ВИГОТОВЛЕНОЇ МЕТОДОМ 3D ДРУКУ БЕЗ ПОПЕРЕЧНОГО АРМУВАННЯ.**

**TEST RESULTS FOR A BEAM MANUFACTURED USING 3D PRINTING WITHOUT TRANSVERSE REINFORCEMENT.**

**Вознюк Л.І., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-9512-8338, Бурак Д.Ю., аспірант, ORCID: 0009-0005-0507-5022, Демчина Х.Б., к.т.н., ст. викладач, ORCID: 0000-0001-6063-5575, Говоруха Ю.Ю., ORCID: 0009-0006-5754-6751(Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів)**

**Vozniuk L.I., Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0001-9512-8338, Burak D.Y., postgraduate student, ORCID: 0009-0005-0507-5022, Demchyna K.B, Ph.D., senior lecturer, ORCID: 0000-0001-6063-5575, Hovorukha Yu.Yu., ORCID: 0009-0006-5754-6751(Lviv Polytechnic National University, Lviv)**

**В статті описано методику і результати випробування балок, виготовлених методом 3D друку без поперечного армування. В результаті експерименту було досліджено характер руйнування, визначено руйнівне зусилля, представлено характер наростання прогинів та деформацій балки. Було проведено теоретичний розрахунок балок і його порівняння з експериментальними результатами**

**The article presents the methodology and results of testing beams manufactured using 3D printing without transverse reinforcement, as well as the comparison of the obtained experimental findings with theoretical calculations. To achieve this, two experimental samples of beams with longitudinal reinforcement in lower tensile zone of the cross-section were manufactured using a construction 3D printer. The article describes the manufacturing methodology and presents the technological and design drawings. The beams had a total length of 1700 mm, an effective span of 1440 mm, and a cross-section 100 mm wide and 160 mm high. The methodology of beam testing is described, and the layout and image of the laboratory test stand are presented. A total of fourteen clock-type microindicators measured concrete deformation: six in the inclined section and eight in the normal section. Two microindicators measured reinforcement deformation by attaching directly to the bars. The deflection of the beams was measured using three clock-type indicators located at midspan and above the supports. As a result of the experiment, the failure mode of the beams and the ultimate load were determined, and the graphs of deflections and strains in the normal and inclined sections were presented. In accordance with the Ukrainian building**

**codes, a theoretical calculation of the beams was performed and compared with the experimental results.**

**Ключові слова:** 3D друк, балка, конструювання, несуча здатність, поперечна сила.

3D printing, beam, design, load-bearing capacity, shear force.

**Вступ.** Сьогодні будівельна галузь є однією з найбільш ресурсозатратних галузей у світі. Для зменшення споживання ресурсів та вуглецевого сліду необхідні нові ефективні будівельні технології. Однією з потенційних ключових технологій для цього є технологія 3D друку.

Використання 3D друку у будівництві дозволяє значно скоротити трудовитрати та час виконання будівельних робіт, мінімалізувати використання будівельної техніки, а також завдяки високій точності зменшити кількість будівельних відходів.

Незважаючи на переваги даної технології сьогодні в Україні відсутні нормативні документи для проектування і застосування даної технології у реальному будівництві. Це ускладнює експериментальні дослідження та розробку методичних рекомендацій, адаптованих до національних умов.

**Аналіз останніх досліджень.** Найбільшим викликом використання технології 3D друку у масовому будівництві є складність армування конструкцій, особливо вертикальними стержнями. Для вирішення цього завдання розробляється технологія виготовлення залізобетонних балок, армованих зварними каркасами [1]. Також розроблена технологія армування «шип і паз» (mortise-and-tenon), яка дозволяє армувати балки об'ємними каркасами в процесі друку [2]. Щоб обійти вертикальні елементи армування розроблені спеціальні насадки на сопло 3D принтера [3].

Сталева фібра додана до бетонного розчину значно підвищує несучу здатність та тріщиностійкість бетону [4]. Також розглядається можливість армування надрукованих конструкцій сталевими сітками. [5] і вуглецевими волокнами [6].

**Мета дослідження.** Провести випробування балок, виготовлених методом 3D друку без поперечного армування, виконати теоретичний розрахунок балок.

**Задачею дослідження** є експериментальне визначення міцності та деформативності балок, виготовлених методом 3D друку без поперечного армування та здійснити порівняння отриманих експериментальних результатів із результатами теоретичного розрахунку.

**Методика дослідження.**

Для реалізації поставленого завдання було виготовлено на будівельному 3D принтері два дослідних зразки балок з поздовжнім армуванням у нижній робочій зоні перерізу.

Зразки були виготовлені українською компанією виробником 3D принтерів – ТОВ “3D TECHNOLOGY UTU”.

Балки друкувалася вісьмома проходками сопла, кожен з яких складався з двох шарів. Висота одного шару – 20 мм, ширина – 50 мм. Проектні розміри та армування зразків наведені на рис. 1.

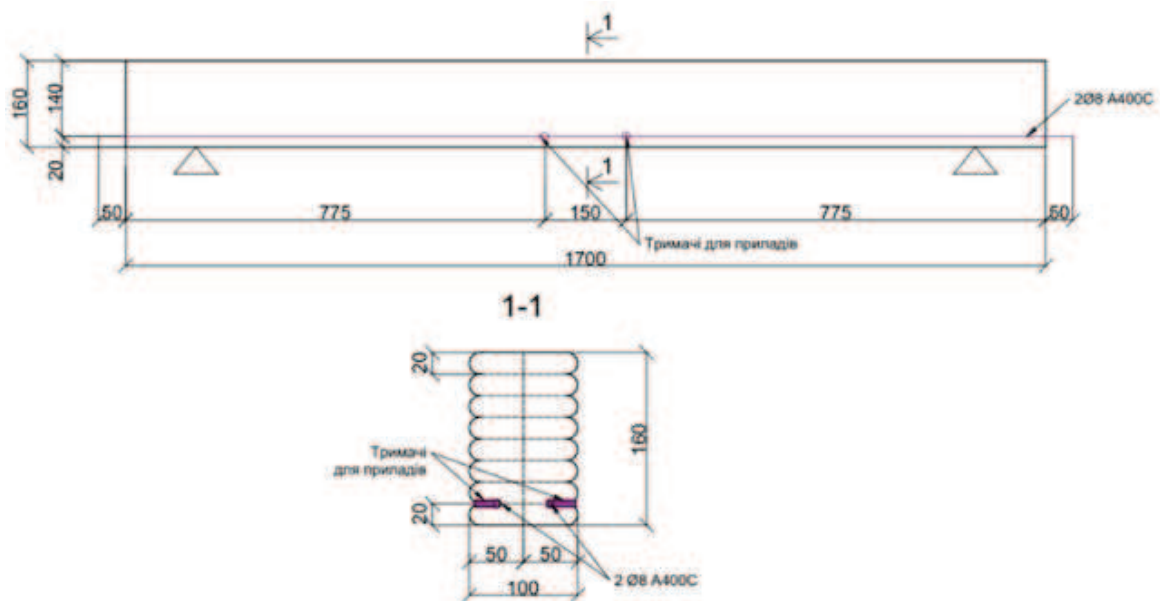


Рис. 1. Проектні креслення балок

Нижня робоча арматура прийнята діаметром 8 мм, класу А400С. Захисний шар арматури був прийнятий відповідно висоті першого шару друку – 20мм. Для забезпечення можливості кріплення вимірювальних приладів до нижньої робочої арматури, були приварені спеціальні тримачі на відстані 75мм від середини прольоту з базою 150 мм.

Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів були випробувані контрольні зразки бетонних кубиків та призм. Також були випробувані арматурні стержні на розривне зусилля.

Балки завантажувалися двома силами прикладеними в 1/3 прольоту за допомогою гідравлічного домкрату та розподільчої траверси. Навантаження прикладали кроками по 0,5 кН з витримкою після кожного ступеня 10 хв. Значення зусилля контролювалося динамометром ДЗ, рівномірність розподілу зусилля у балці контролювалося двома динамометрами Д1, Д2, розташованими під опорами балки.

Деформації у балках вимірювалися за допомогою 16 мікроіндикаторів годинникового типу із ціною поділки 0,001 мм. Схему розміщення приладів для випробування балок представлено на рис. 2.

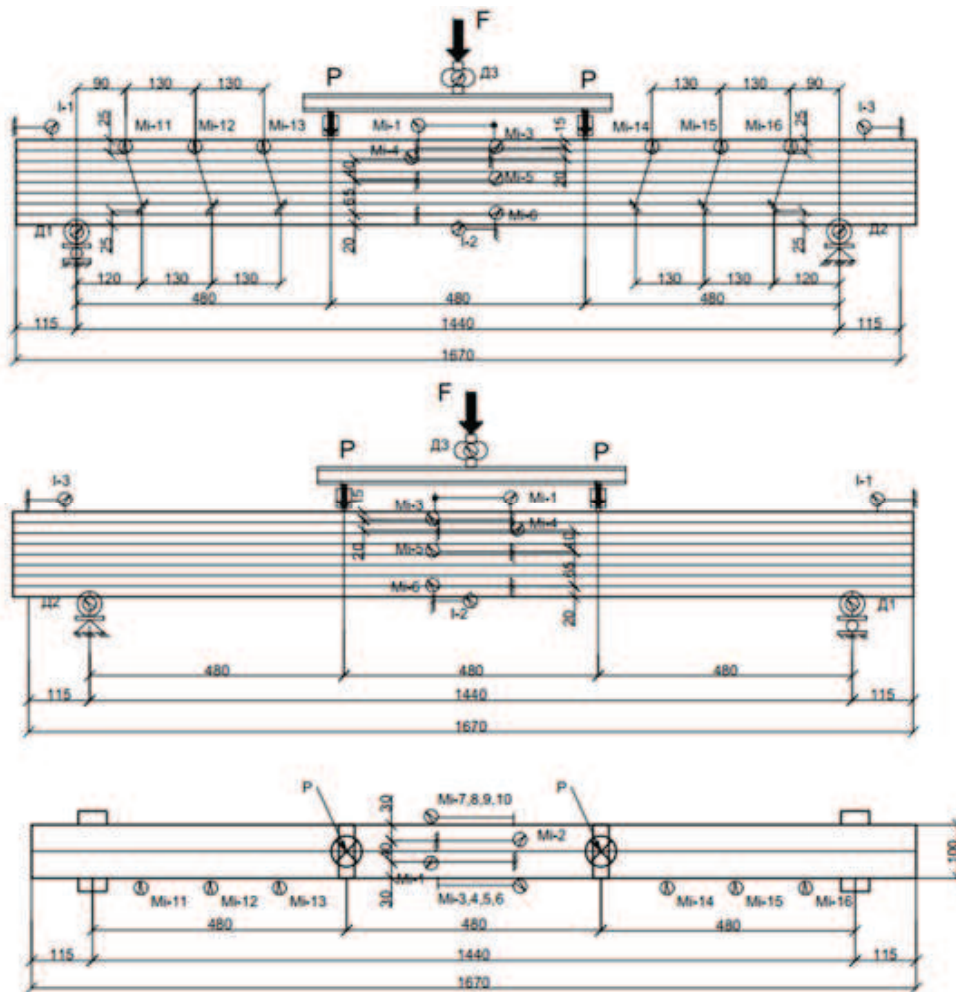


Рис. 2. Схема лабораторного стенду

Шість мікроіндикаторів розміщувались в зоні дії максимальної поперечної сили, відповідно по три біля кожної опори на одній грані балок перпендикулярно до лінії, що з'єднувала точку прикладання навантаження та точку опорної реакції. База індикаторів, які визначали деформації в похилому перерізі балок становила 100 мм.

Вісім мікроіндикаторів розміщувались посередині прольоту по всій висоті нормального перерізу балок в зоні дії максимального згинального моменту. Два мікроіндикатори розміщувалися на верхній грані балок, решта по всій висоті двох бічних поверхнях балок.

Два мікроіндикатори вимірювали деформації робочої арматури в нормальному перерізі балок в зоні дії максимального згинального моменту. Вони кріпилися безпосередньо до робочих стержнів за допомогою спеціальних тримачів, приварених до арматури. База всіх індикаторів, які визначали деформації в нормальному перерізі становила 150 мм.

Прогини балок вимірювалися за допомогою трьох індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Два з них були встановлені на опорах по верхній грані балок (I-1 та I-3), а третій кріпився до нижньої грані, посередині прольоту (I-2).



Вигляд дослідного стенду представлено на рис. 3.

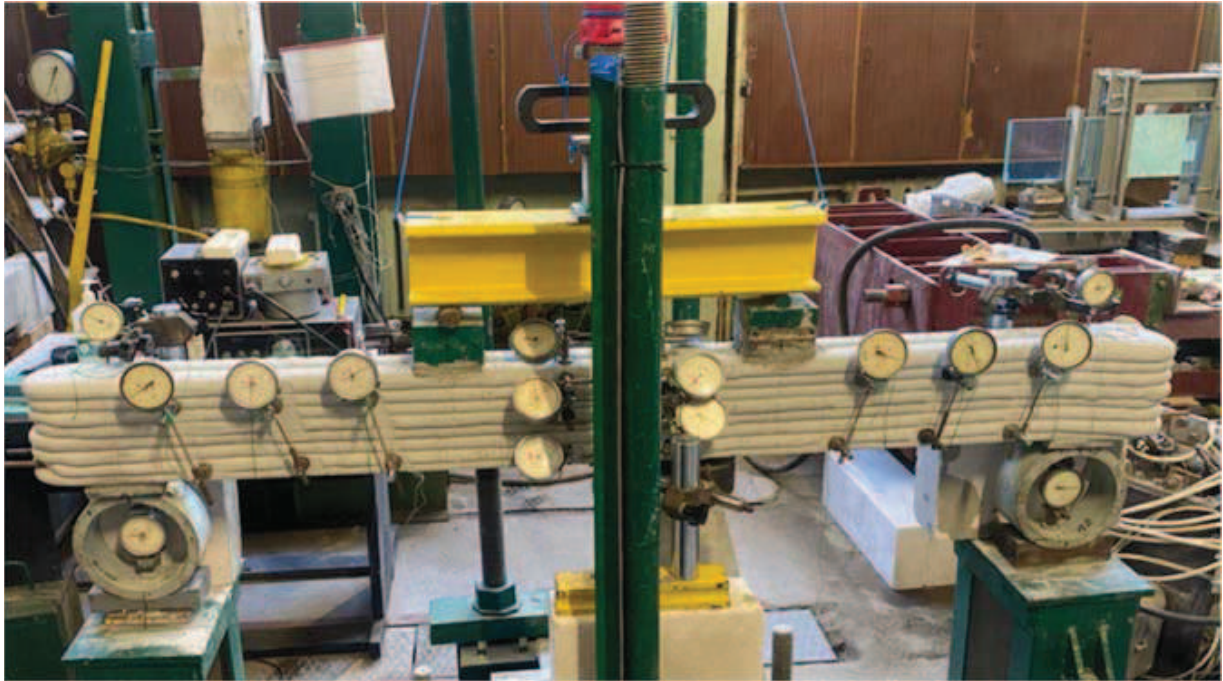


Рис. 3. Вигляд дослідного стенду

**Результати дослідження.** Проведений експеримент дозволив визначити характер руйнування балок, виконаної за допомогою 3D друку без поперечного армування, який представлений на рис. 4. Руйнування балки відбулося при загальному навантаженні  $F_{кр}=14$  кН по похилому перерізі у місці дії максимальної поперечної сили. Цифрами позначено номер завантаження, при якому розвивалася тріщина. Крок прикладання навантаження рівний 0,5 кН.



Рис. 4. Характер руйнування балки марки Б-1.1 з двох сторін

На рис. 5 показано приріст експериментального прогину балки. Максимальний прогин балки згідно показів індикатора І-2 становив  $f_{\max}=4,66$  мм.

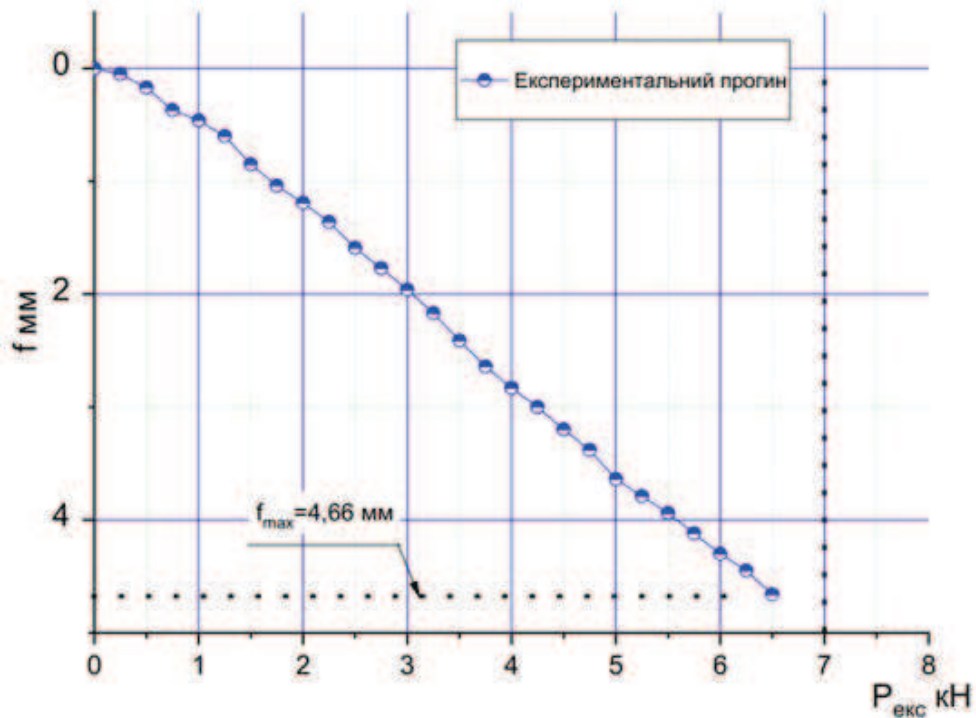


Рис. 5. Графік приросту прогину балки

Графік приросту деформації стиснутої зони бетону балки Б1-1, та розтягнутої арматури показаний на рис. 6.

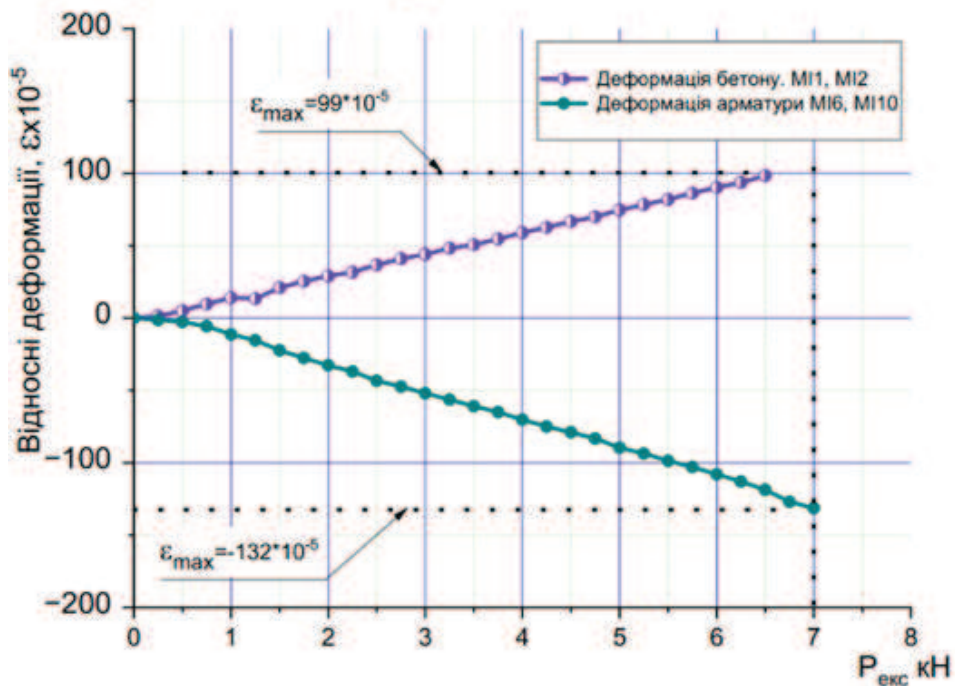


Рис. 6. Графік відносних деформацій стиснутої зони бетону та розтягнутої арматури

Індикатори, що фіксували деформації стиснутої зони бетону, були демонтовані перед очікуваним руйнуванням зразка, на етапі навантаження

$P=6,5\text{кН}$ . Максимальні експериментально зафіксовані значення деформацій бетону в стиснутій зоні на цьому етапі становили  $99 \cdot 10^{-5}$ . При досягненні критичної сили  $P_{кр}=F_{кр}/2=7\text{кН}$  максимальні значення деформацій розтягнутої арматури становили  $132 \cdot 10^{-5}$ .

На Рис. 7 показано усереднений графік приросту деформації бетону у похилому перерізі зі сторони руйнування балки. При досягненні поперечної сили  $P_{кр}=6,5\text{кН}$ , максимальні значення деформацій бетону склали  $\epsilon=58 \cdot 10^{-5}$ .

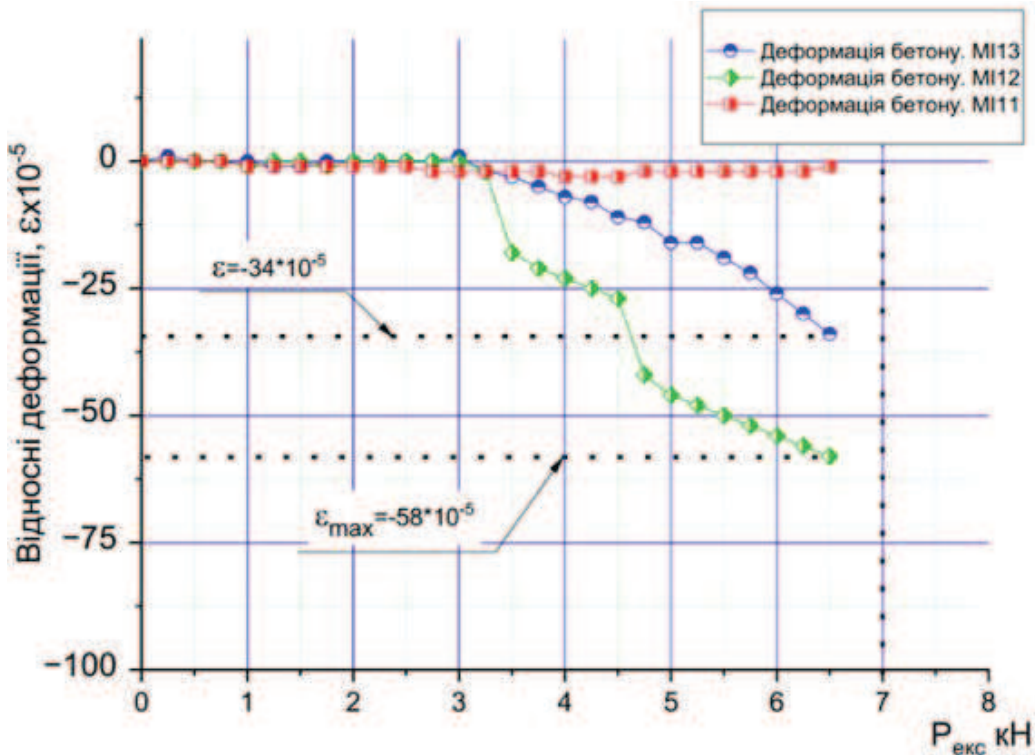


Рис. 7. Графік відносних деформацій бетону похилого перерізу

Розрахункове значення величини критичної поперечної сили визначалося згідно нормативних документів [7] за формулами (1,2)

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (1)$$

$$V_{Rd,c} = (V_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (2)$$

Згідно розрахунків за формулами (1,2) максимальна поперечна сила, яку здатний сприйняти похилий переріз балки  $V_{Rd,c}=8,06\text{кН}$ . При розрахунку була прийнята найменша ширина перерізу балки, згідно п.4.6.2.1 ДСТУ [7].

В таблиці 1 представлено порівняння експериментальних і теоретичних результатів критичної поперечної сили.



Таблиця 1

Порівняння експериментальних і теоретичних результатів

№	Експериментальна поперечна сила $P_{кр}$ , кН	Розрахункова поперечна сила $V_{Rd,c}$ , згідно методики [7], кН	$P_{кр}/V_{Rd,c}$
1	7	8,06	0,875

Як видно із таблиці експериментальне значення поперечної сили на 13,2% є меншим від розрахункового значення, що свідчить про необхідність введення додаткових коефіцієнтів у методику розрахунку на дію поперечної сили [7], при розрахунку балок, які виготовляються із використанням технології 3D-друку. Це пов'язано із особливостями технології та різною шириною балки по висоті.

**Висновки.** У результаті експериментального дослідження отримано прогини балки, деформації бетону та арматури, а також встановлено, що балка без поперечного армування зруйнувалася по похилому перерізу. Теоретично визначено, що експериментальне значення поперечної сили на 13,2% є меншим від розрахункового значення, згідно норм [7], що свідчить про необхідність удосконалення та доповнення цієї методики при розрахунку балок, які виготовляються із використанням технології 3D-друку.

1. Вознюк Л.І., Резнік П.А., Бурак Д.Ю., Володимиров А.В, технологія виготовлення балок армованих зварними каркасами методом 3d друку, Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, вип.45. 2024

Vozniuk L.I, Reznik P.A., Burak D.Iu., Volodymyrov A.V, tekhnolohiia vyhotovlennia balok armovanykh zvarnymy karkasamy metodom 3d druku, Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, vyp.45. 2024

2. Chen Y., Zhang W., Zhang Y., Liu Z., Liu C., Zhang Y., Quan H., Chen J., Chen M.A novel in-process rebar integration method for 3D printing reinforced concrete beams and performance evaluation. Virtual and Physical Prototyping. – 2025. – Vol. 20

3. Claßen M., Reisgen U., Zhang S. 3D-Druck von Stahlbeton – Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck des Verbundwerkstoffs Stahlbeton. Aachen : RWTH. Aachen University, 2024.

4. Reinold J., Gudžulić V., Meschke G. Computational modeling of fiber orientation during 3D-concrete-printing. Computational Mechanics. 2023. Vol. 71, No. 6. – P. 1205–1225. – DOI: 10.1007/s00466-023-02304-z.

5. Liu M., Zhang Q., Tan Z., Wang L., Li Z., Ma G. Investigation of steel wire mesh reinforcement method for 3D concrete printing. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2021. Vol. 21, No. 1. DOI: 10.1007/s43452-021-00183

6. Gantner S., Rothe T., Rennen P., Hack N. Reinforcement strategies for additive manufacturing in construction based on dynamic fibre winding: concepts and initial case studies. Open Conference Proceedings. 2022. Vol. 1. DOI: 10.52825/ocp.v1i.78

7. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції. Правила проектування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011.

DSTU B V.2.6-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Pravyla proektuvannia. – Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011.