

ВИПРОБУВАННЯ ЗБІРНОЇ БАЛКИ, АРМОВАНОЇ ОКРЕМИМИ СТЕРЖНЯМИ ТА ВИГОТОВЛЕНОЇ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

TESTING OF A PRECAST BEAM REINFORCED WITH INDIVIDUAL BARS AND MANUFACTURED BY 3D PRINTING

Бурак Д.Ю., аспірант, ORCID: 0009-0005-0507-5022, (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів) **Нурманов А.Н.,** магістр, ORCID: 0009-0006-9649-6072 (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів)

Burak D.Y., postgraduate student, ORCID: 0009-0005-0507-5022, (Lviv Polytechnic National University, Lviv) **Nurmanov A.N.,** master, ORCID: 0009-0006-9649-6072 (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

Публікація присвячена випробуванню балок, армованих окремими стержнями без поперечної арматури та виготовлених методом 3D друку. В результаті проведеного експерименту за розробленою методикою було досліджено характер руйнування балки та визначено значення критичного моменту, характер наростання прогинів та приросту деформацій арматури, стиснутого бетону та у похилих перерізах.

The publication is devoted to the testing of single-span beams reinforced with individual rebars without transverse reinforcement and manufactured by 3D printing. The purpose of the study is to test beams reinforced with individual longitudinal rebars without transverse reinforcement and manufactured by 3D printing according to the developed methodology. To accomplish this task, two samples of beams were designed and printed on a 3D construction printer. The article presents the design solutions and working drawings of the samples. The beams were 1700 mm long and 150x100 mm in cross-section. The scheme of the laboratory bench with the marked measuring instruments is presented in the paper. In total, sixteen clock-type micro-indicators with a division price of 0.001 mm were used to determine the deformations of concrete and reinforcement, three clock-type indicators with a division price of 0.01 mm to determine the deflection and settlement of the supports. As a result of the experiment, the fracture pattern of the beam was determined, the value of the critical breaking moment was determined, as well as the nature of the increase in deflections and the increase in deformations of reinforcement, compressed concrete, and in inclined sections.

Ключові слова: 3D друк, балка, конструювання, несуча здатність.
3D printing, beam, design, load-bearing capacity.

Вступ. Сьогодні бетон є найбільш широко використовуваним будівельним матеріалом у світі і є основою сучасної архітектури, містобудування та інфраструктури. Близько половини вартості виконання бетонних робіт витрачається на опалубочні роботи, особливо при виконанні складних за формою архітектурних конструкцій. Використання технології 3D друку у будівництві дозволяє відмовитись від дерев'яної опалубки, формуючи складні геометричні форми шляхом безпосереднього нанесення свіжого бетону шар за шаром. Також можливо друкувати незйомну опалубку, комбінуючи дану технологію з традиційним методом бетонування.

Технологія 3D друку дозволяє також скоротити вартість виконання бетонних робіт шляхом зменшення часу виконання будівельних робіт, високої точності, зменшенню кількості відходів будівництва, високим рівнем автоматизації процесу, зменшенням кількості кваліфікованих працівників, мінімальним використанням будівельної техніки.

Хоча у світі технологія 3D друку швидко розвивається і наближається до реальних ринкових умов, в Україні досі відсутні нормативні документи для проектування і застосування даної технології у реальному будівництві, не проведенні дослідження щодо несучої здатності та деформативності надрукованих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень. Головною проблемою застосування технології 3D друку для виготовлення несучих конструкцій є складність армування. Проводяться дослідження технології виготовлення збірних залізобетонних балок, армованих зварними каркасами [1]. Також розглядається можливість виготовлення залізобетонних балок шляхом комбінування технології 3D друку з традиційним методом бетонування [2].

Технологія 3D друку досліджується і використовується у будівництві для друку незйомної бетонної опалубки для несучих стін. Це дозволяє повністю відмовитись від використання опалубки – найдорожчого процесу традиційного бетонування, а також уникнути відходів пиломатеріалів[3].

Сьогодні активно розглядають можливість застосування технології 3D друку в космічній сфері для колонізації планет, із застосуванням місцевих ґрунтів та копалин як основних складових суміші для друку [4].

В Національному університеті "Львівська політехніка" було проведено випробування на дію навантаження купольних [5,6] та плитних [7] конструкцій, надрукованих на полімерному 3D принтері з PLA пластику.

В Україні розробкою та виготовленням будівельних принтерів, та впровадженням технології 3D друку у будівництво займається компанія ТОВ "3D TECHNOLOGY UTU"[8] яка виготовила досліджувані балки.

Мета дослідження. Провести випробування балок, армованих окремими поздовжніми стержнями без поперечної арматури та виготовлених методом 3D друку.

Задачею дослідження є експериментальне визначення міцності та

деформативності збірних балок, армованих окремими стержнями та виготовлених методом 3D друку.

Методика дослідження. Для реалізації поставленого завдання було запроєктовано і надруковано на будівельному 3D принтері два дослідних зразки балок, армованих поздовжніми стержнями без поперечної арматури. Зразки були виготовлені українською компанією ТОВ “3D TECHNOLOGY UTU”.

Проектні розміри та армування зразків показані на рис. 1.

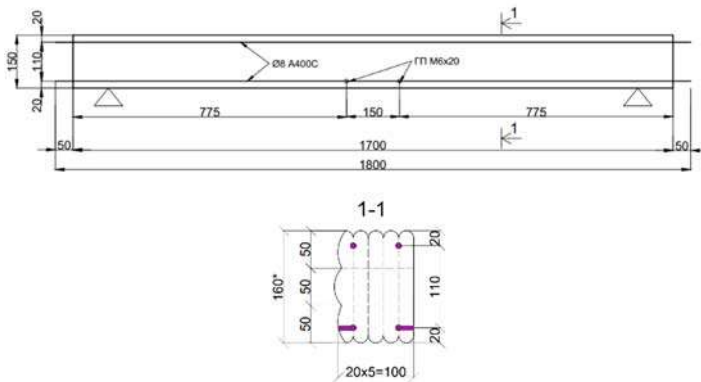


Рис. 1. Проектні креслення балок серії 1.

Довжина надрукованих зразків балок 1700 мм. Висота перерізу балок 160 мм, ширина 100 мм. Згідно технології виготовлення зразки виготовлялися горизонтально в п'ять шарів екструзії, а після набору достатньої міцності бетону балки переверталися на 90 градусів у проектне положення. Розмір шарів екструзії 20х50мм. Оскільки зразки друкувалися повернутими на 90 градусів від проектного положення, одна грань балки, яку формував перший шар була гладкою, а протилежна з яскраво видимими шарами екструзії.

Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів були випробувані зразки бетонних кубиків та призм. На розтяг були випробувані арматурні стержні.

Нижня робоча та верхня арматура прийнята діаметром 8, класу А400С, віддаль між центрами стержнів повздовжньої верхньої та нижньої арматури складала 110 мм. Конструювання виконано із урахуванням вимог до влаштування захисних шарів арматури. Для можливості кріплення приладів для вимірювання деформації нижньої робочої арматури, були приварені подовжені гайки з базою 150 мм по середині прольоту.

Балки завантажувалися двома силами прикладеними в 1/3 прольоту. Навантаження прикладали кроками по 1 кН з витримкою після кожного ступеня 10 хв. З них 5 хв – до знімання показів приладів і 5 хв – під час знімання показів. Прикладання зовнішнього навантаження відбувалося за допомогою гідравлічного домкрату та розподільчої траверси. Значення

зусилля контролювалося пружинним динамометрами ДЗ, а реакції опор кільцевими динамометрами Д1 та Д2 розташованими на опорах балок .

Розміщення вимірювальних приладів відбувалося на трьох гранях балки, а саме спереду, ззаду та зверху балки (див.рис.2).

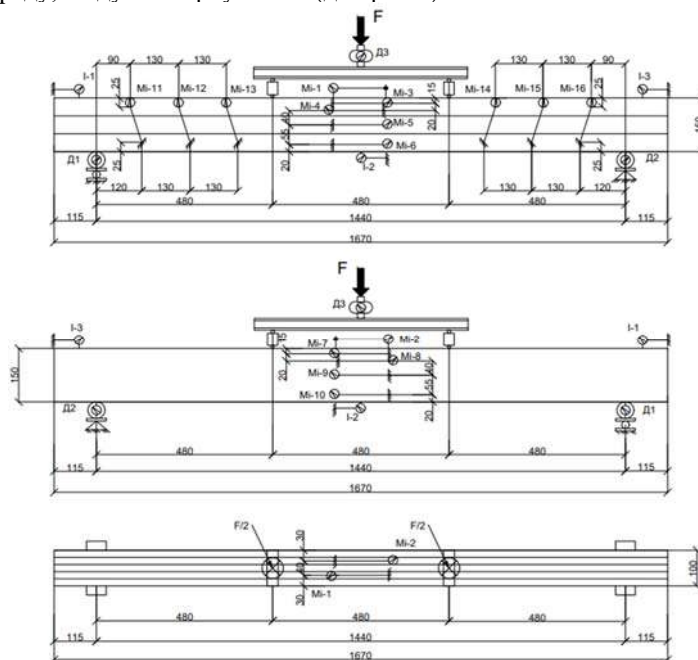


Рис. 2. Схема лабораторного стенду

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 балки (I-1 та I-3), а третій кріпився до нижньої грані, посередині прольоту (I-2). Для більшої точності замірів між індикаторами і балкою наклеювались скляні пластини. Індикатори були закріплені на металевих штативах.

Деформації бетону вимірювалися за допомогою 16 мікроіндикаторів годинникового типу із ціною поділки 0,001 мм. Шість мікроіндикаторів розміщувались на приопорних ділянках балки з базою 100 мм, в зоні дії поперечної сили, відповідно по три біля кожної опори на одній грані балки перпендикулярно до лінії що з'єднувала точку прикладання навантаження та точку опорної реакції.

Вісім мікроіндикаторів розміщувались посередині прольоту, по всій висоті бічних граней балки в зоні дії максимального згинального моменту на кожному із шарів друк з базою 150 мм, що дозволяло замірювати

деформації бетону крайніх стиснутих волокон. Два мікроіндикатори розмішувалися на верхній грані посередині балки із базою 150 мм. Усі індикатори кріпились металевими тримачами, приклеєними до тіла балки.

Деформації арматури визначалися за допомогою двох мікроіндикаторів, які кріпилися до тримачів – подовжених гайок, що були приварені до арматури з базою 150 мм перед бетонуванням балок і випущені за тіло бетону.

Вигляд дослідного стенду представлено на рис. 3.



Рис. 3. Вигляд дослідного стенду

Дослід проводився у лабораторії кафедри «Будівельних конструкцій та мостів» національного університету «Львівська політехніка» під керівництвом професора Демчини Богдана Григоровича.

Результати дослідження. Характер руйнування балок представлено для зразка марки Б-1.1 показаний на рис. 4. Руйнування балки відбулося при навантаженні $F = 14$ кН по похилому перерізі. Цифрами позначено номер завантаження, при якому розвивалися тріщини. Крок прикладання навантаження був рівний 1 кН.



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

Усереднений графік приросту деформації стиснутої зони бетону, та розтягнутої арматури показаний на рис. 5. При досягненні критичного (руйнуючого) моменту $M_{кр} = 3,36 \text{ кН}\cdot\text{м}$, максимальні значення деформацій стиснутого бетону становили $235 \cdot 10^{-5}$, максимальні значення деформацій розтягнутої арматури становили $132 \cdot 10^{-5}$.

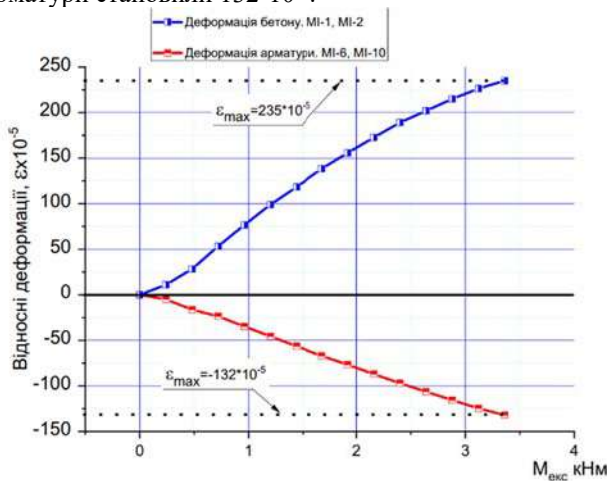


Рис. 5. Графік відносних деформацій стиснутої зони бетону та розтягнутої арматури

Графіки приросту деформації бетону у похилому перерізі показаний на рис. 6. Критичне значення відносних деформацій бетону склали $77 \cdot 10^{-5}$.

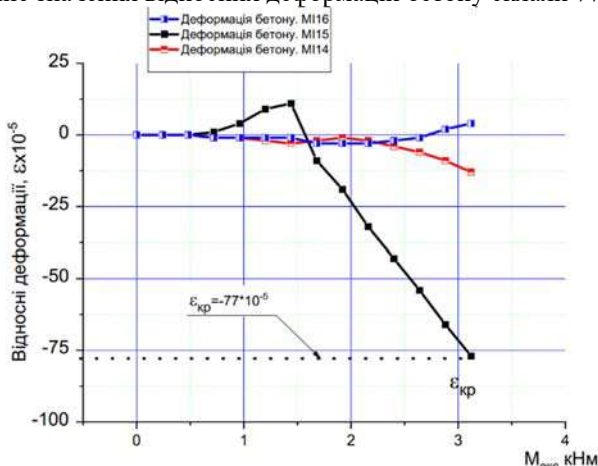


Рис. 6. Графік відносних деформацій бетону похилого перерізу

На рис.7 показано графік приросту прогину балки. Максимальний прогин балки згідно показів індикатора I-2 становив $f_{\max} = 5,41$ мм.

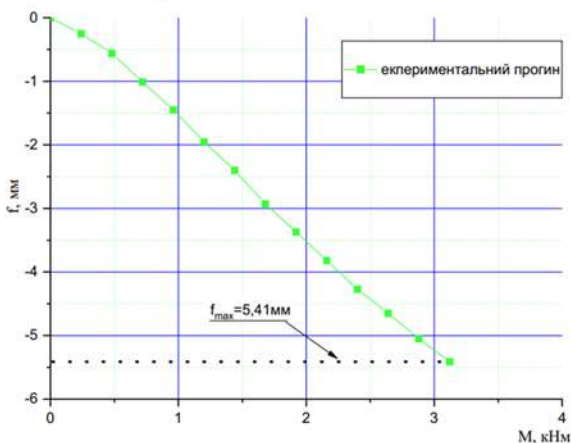


Рис. 7. Графік приросту прогину балки

Висновки. Були проведені випробування зразків балок, армованих окремими стержнями та виготовлених методом 3D друку згідно розробленої методики. Балки зруйнувалися по похилому перерізі оскільки була відсутня поперечна арматура, що для зразка марки Б-1.1 відбулося при максимальному моменті $M_{\text{кр}} = 3,36$ кН·м, а максимальний прогин балки $f_{\max} = 5,41$ мм.

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

2. Демчина Б.Г., Вознюк Л.І., Бурак Д.Ю., Щербаков С.О, 3D друк балок із можливістю влаштування поперечного армування, враховуючи особливості роботи будівельного принтера, Будівельні конструкції, Теорія і практика, (14), 2024. 57–66. DOI:10.32347/2522-4182.14.2024.57-66

3. A. Jipa, B. Dillenburger, 3d printed formwork for concrete: state-of-the-art, opportunities, challenges, and applications, 3d printing and additive manufacturing, 9(2), 2022 pp. 84–107. doi:10.1089/3dp.2021.0024

4. G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla and L. Pambaguian, Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology, Acta Astronaut., 93, 2014, pp. 430-450, DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.07.034

5. B.Demchyna, L.Vozniuk, M.Surmai, testing of the ribbed dome which is manufactured by 3d printing, Proceedings of CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, 438. Springer, Cham 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_8

6. B.Demchyna, L.Vozniuk, M. Surmai, S.Havryliak, Y.Y. Famulyak, Experimental study of the dome model made using a 3D printer from PLA plastic. AIP Conference Proceedings, 2949, Issue 1, 2023. Article number 020010. 11th International Conference on Applied Mechanics. 18 November 2022.(2023). DOI: 10.1063/5.0165270.

7. B. Demchyna, L. Vozniuk, M. Surmai, testing a flat plate of pla plastic made by 3d printing for deformability Proceedings of EcoComfort, Springer 2024 DOI:10.1007/978-3-031-67576-8_46

8. <https://utu.com.ua/>