

УДК 691.335

## НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ РЕБРИСТОЇ ПЛИТИ, ВИГОТОВЛЕНОЇ ІЗ PLA ПЛАСТИКУ ЗА 3D ТЕХНОЛОГІЄЮ

Б. Г. ДЕМЧИНА<sup>1</sup>, Л. І. ВОЗНЮК<sup>1</sup>, М. І. СУРМАЙ<sup>1</sup>, Т. Ю. ОСАДЧУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>2</sup> Львівський національний університет природокористування, Дубляни

Подано результати скінченно-елементного моделювання та експериментального дослідження під навантаженням штампом ребристої плити перекриття із PLA пластику, виготовленої із використанням технології 3D друку. Визначено її максимальні значення прогинів та напружень, а також граничні навантаження. Порівняно експериментальні та теоретичні результати досліджень ребристої плити.

**Ключові слова:** *плита, пластик, 3D друк, випробування, міцність, прогини.*

The results of finite-element modeling and experimental research under the load of a stamp of a ribbed floor slab made of PLA plastic, manufactured using 3D printing technology, are presented. The maximum values of the plate deflections and stresses, as well as the value of the limit load, were determined. The experimental and theoretical research results of the ribbed plate were compared.

**Keywords:** *plate, plastic, 3D printing, testing, strength, deflections.*

**Вступ.** З кожним роком у будівництві зростає використання виробів із пластику [1, 2], а розвиток 3D друку дає змогу отримати високоякісні конструкції [3], зокрема з PLA пластику, які є екологічними [4], економічними [5], мають хороші фізико-механічні характеристики [6–8] і можуть бути будь-якої геометричної форми залежно від технологічного завдання.

Науковці порівнювали [9, 10] механічні властивості пластиків та встановили, що PLA пластик має кращу міцність на розрив порівняно із ABS пластиком і його можна застосовувати для виготовлення конструкцій.

Але, незважаючи на широке застосування 3D друку у різних галузях промисловості, недостатньо даних щодо механічних характеристик конструкцій із пластику [11, 12] та, зокрема, про їхню поведінку за згину під час навантаження.

Подано [13, 14] випробування куполів із PLA пластику та отримано хорошу збіжність експериментальних та теоретичних результатів досліджень. Але куполи є криволінійними елементами і їх не часто застосовують у будівництві. Частіше для перекриття використовують плити, а результатів випробування плит перекриття із PLA пластику недостатньо для їх впровадження.

Мета роботи – визначити несучу здатність та деформативність моделі ребристої плити, виготовленої методом 3D друку з PLA пластику, та порівняти результати експериментальних та теоретичних досліджень.

Для цього спочатку виконано модель ребристої плити в програмі AutoCAD, після чого сформовано файл для 3D друку у форматі STL, який імпортовано у слайс-програму для підготовки до друку. У результаті отримано дослідний зразок, зображений на рис. 1.

Розміри плити у плані становили 175×175 mm, товщина її полиці 5 mm, ширина ребра 5 mm, висота ребра разом з полицею 10 mm.

*Контактна особа:* Л. І. ВОЗНЮК, e-mail: leonid.i.vozniuk@lpnu.ua

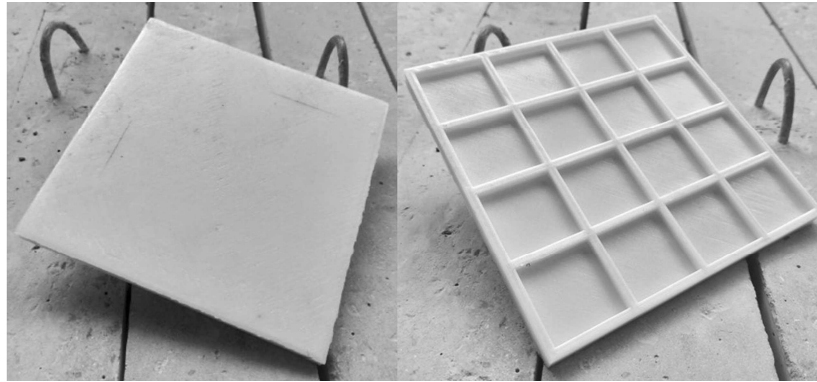


Рис. 1. Дослідний зразок ребристої плити, виготовленої методом 3D друку.

Fig. 1. Experimental sample of a ribbed plate made by 3D printing.

**Метод досліджень.** Виготовлено установку для експериментальних досліджень (рис. 2а). Навантажували ребристу плиту, використовуючи брусок для передачі навантаження на штамп розміром 125×125 mm у плані та гідравлічний домкрат. Схема установки для випробування ребристої плити показана на рис. 2б.

Прогиноміри Аістова кріпили на контурі та в центрі плити і вимірювали прогини на кожному етапі навантаження дослідного зразка. Ціна поділки прогиноміра 0,01 mm.

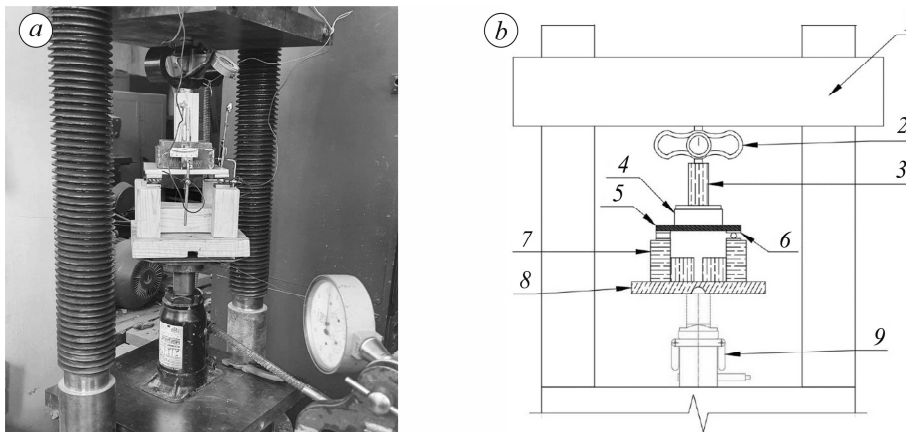


Рис. 2. Зображення (а) та схема дослідної установки для випробування ребристої плити (б): 1 – прес, 2 – динамометр, 3 – брусок для передачі навантаження, 4 – штамп для розподілення навантаження, 5 – модель ребристої плити, 6 – шарнірні опори, 7 – опори для розміщення плити, 8 – основа для кріплення прогиномірів Аістова, 9 – домкрат.

Fig. 2. A view (a) and scheme of the installation for testing ribbed plate (b): 1 – press, 2 – dynamometer, 3 – bar for load transfer, 4 – stamp for load distribution, 5 – model of experimental ribbed plate, 6 – hinged supports, 7 – supports for placing the plate, 8 – base for mounting of Aistov deflection gauges, 9 – jack.

Для обчислення значень прогинів та напружень створено скінченно-елементну модель ребристої плити у PC LIRA-SAPR (рис. 3). Розрахункова модель плити складалася із 1394 кінцевих елементів та 2892 вузлів. Жорсткість плити моделювали, використовуючи об'ємні CE-36. Під час розрахунку використовували фізико-механічні характеристики PLA пластику, з якого виготовлено зразок.

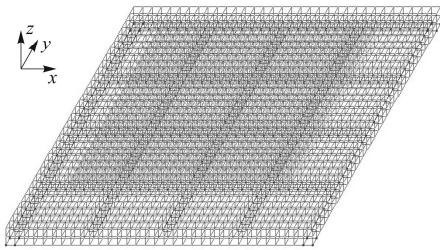


Рис. 3. Розрахункова схема ребристої плити у PC LIRA-SAPR.

Fig. 3. A calculation scheme of the ribbed slab in PC LIRA-SAPR.

### Результати та їх обговорення.

У результаті експерименту встановлено характер руйнування моделі ребристої плити перекриття із PLA пластику. Руйнування відбулося за навантаження на штамп  $N = 127,617 \text{ kN/m}^2$ . Під час експерименту зразок навантажували етапами і на кожному заміряли прогини ребристої плити в центрі та посередині зовнішнього контуру. Графіки порівняння експериментальних та розрахункових прогинів показано на рис. 4.

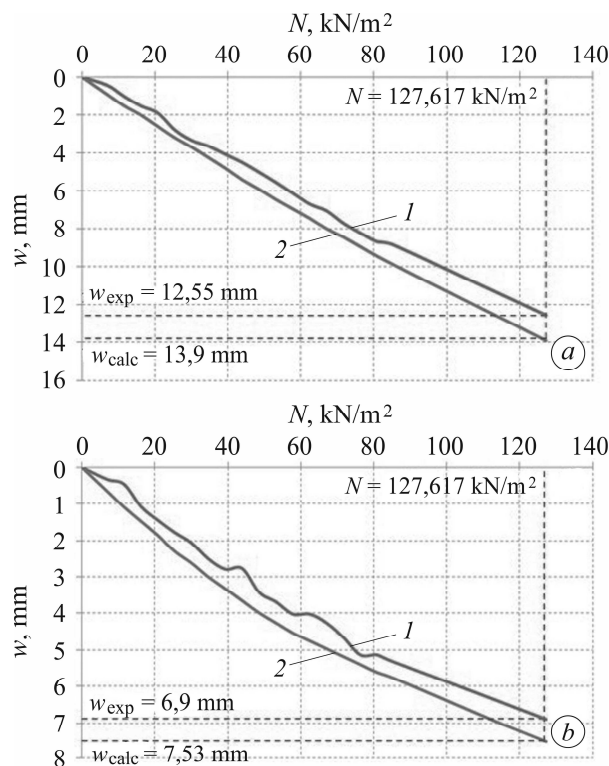


Рис. 4. Графіки порівняння експериментальних (1) та розрахункових (2) прогинів в центрі (a) та посередині зовнішнього контуру плити (b).

Fig. 4. Comparison graphs of experimental (1) and calculated (2) deflections in the center (a) and in the middle of the outer contour of the plate (b).

Під час експерименту досягнули прогинів 12,55 mm в центрі плити та 6,9 mm посередині зовнішнього контуру, що становило відповідно 1/10 та 1/18 від довжини прольоту за максимального навантаження на штамп  $N = 127,617 \text{ kN/m}^2$ , а розрахункові прогини становили відповідно 13,9 та 7,53 mm. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить 9,7 та 8,6%, відповідно.

Внаслідок випробувань отримано руйнування дослідного зразка (рис. 5), а на основі розрахунків – рівень та характер напружень у скінченних елементах моделі ребристої плити (рис. 6).

Рис. 5. Характер руйнування дослідного зразка ребристої плити.

Fig. 5. Character of fracture of the experimental sample of the ribbed plate.

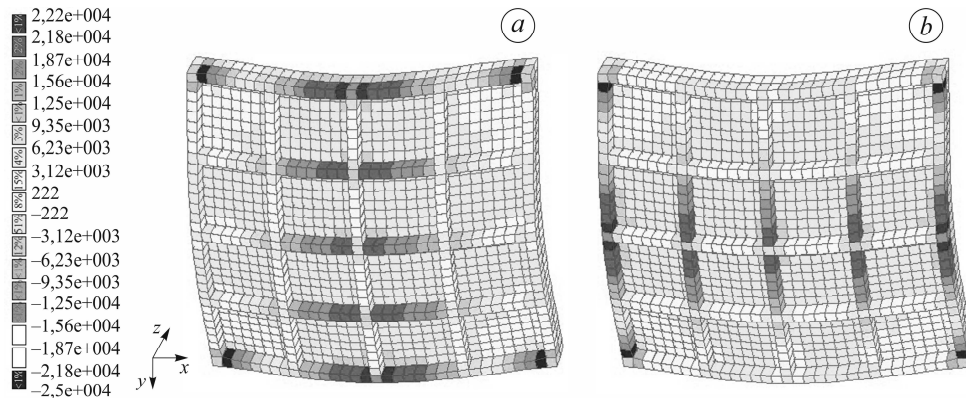
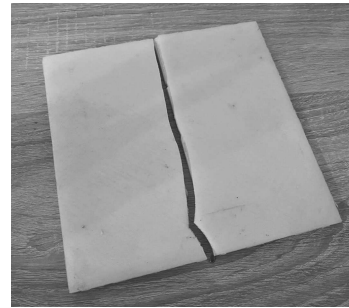


Рис. 6. Ізополя напружень  $\sigma_x$  (a) та  $\sigma_y$  (b) ( $\text{kN/m}^2$ ) за критичного навантаження.

Fig. 6. Isofield of stresses  $\sigma_x$  (a) and  $\sigma_y$  (b) ( $\text{kN/m}^2$ ) under critical load.

Проаналізувавши отримані результати, встановили, що зони розташування найбільших напружень у модельній ребристій плиті (рис. 6) збігаються з ділянкою руйнування плити, яку досліджували експериментально (рис. 5). Згідно з розрахунком у PC LIRA-SAPR, за навантаження  $N = 127,617 \text{ kN/m}^2$ , що відповідає руйнівному, максимальні напруження в крайньому ребрі плити становили 22,22 МПа, що на 11,6% більше значення нормативного опору PLA пластику, а саме 19,65 МПа, яке визначено експериментально.

### ВИСНОВКИ

Розроблено та апробовано методику для випробування моделі ребристої плити із PLA пластику, яка виготовлена методом 3D друку. Під час експерименту досягнуто максимальних прогинів 12,55 mm в центрі плити та 6,9 mm посередині її зовнішнього контуру, що становило відповідно 1/10 та 1/18 від довжини прольоту. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить 9,7 та 8,6%, відповідно. Згідно з розрахунком у PC LIRA-SAPR, за навантаження  $N = 127,617 \text{ kN/m}^2$ , що відповідає руйнівному, максимальні напруження в крайньому ребрі плити становили 22,22 МПа, що на 11,6% більше значення нормативного опору PLA пластику, а саме 19,65 МПа, яке визначено експериментально. Отримані розбіжності не перевищують 15%, що свідчить про можливість використання методу скінченних елементів для розрахунку ребристих плит із PLA пластику, виготовлених 3D друком.

1. Bakar M. B. A., Hermawan A., and Mohd S. H. Plastic in Home Building and Construction Applications // Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers / Ed. by M. S. J. Hashmi. – Elsevier, 2022. – 4. – P. 58–67. DOI: 10.1016/B978-0-12-820352-1.00195-4
2. Perkins I. and Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review // Int. J. of Construction Management. – 2015. – 15, № 1. – P. 1–9. DOI: 10.1080/15623599.2015.1012136

3. *3D printing for energy optimization of building envelope – Experimental results* / T. de Ru-beis, A. Ciccozzi, D. Paoletti, and D. Ambrosini // *Heliyon*. – 2024. – **10**, № 10. – e31107. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31107
4. *Potential of recycled PLA in 3D printing: A review* / M. R. Hasan, I. J. Davies, A. Pramanik, M. John, and W. K. Biswas // *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. – 2024. – **3**. – 100020. DOI: 10.1016/j.smse.2024.100020
5. *Stansbury J. W. and Idacavage M. J.* 3D printing with polymers challenges among expan-ding options and opportunities // *Dental Materials*. – 2016. – **32**, № 1. – P. 54–64. DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018
6. *3D comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding* / M. Lay, N. L. N. Thajudin, Z. A. A. Hamid, A. Rusli, M. K. Abdullah, and R. K. Shuib // *Composites Part B: Eng.* – 2019. – **176**. – 107341. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107341
7. *Experimental study on mechanical properties of single- and dual-material 3D printed pro-ducts* / H. Kim, E. Park, S. Kim, B. Park, N. Kim, and S. Lee // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – **10**. – P. 887–897. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.076
8. *An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites* / L. Blok, M. Longana, H. Yu, and B. Woods // *Additive Manufacturing*. – 2018. – **22**. – P. 176–186. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.039
9. *Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials* / S. K. Dhinesh, P. S. Arun, K. K. L. Senthil, and A. Megalingam // *Mater. Today: Proc.* – 2021. – **45**, № 2. – P. 1175–1180. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.546
10. *Algarni M. and Ghazali S.* Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG’s mechanical properties to FDM printing process parameters // *Crystals*. – 2021. – **11**, № 8. – 995. DOI: 10.3390/cryst11080995
11. *Influence of structure on mechanical properties of 3D printed objects* / T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, and I. Pakši // *Procedia Eng.* – 2016. – **149**. – P. 100–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.644
12. *Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation* / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, and T. Letcher // *J. of Failure Analysis and Prevention*. – 2016. – **16**. – P. 467–481. DOI: 10.1007/s11668-016-0113-2
13. *Experimental study of the dome model made using a 3D printer from PLA plastic* / B. Dem-chyna, L. Vozniuk, M. Surmai, S. Havryliak, and Y. Famulyak // *AIP Conf. Proc. Int. Scientific Session on Applied Mechanics XI (Bydgoszcz, Poland, 18 November 2022)*. – AIP Publishing, 2023. – **2949**, Is. 1. – Article number 020025. DOI: 10.1063/5.0165270
14. *Demchyna B., Vozniuk L., and Surmai M.* Testing of the ribbed dome which is manufactured by 3D printing // *Proc. of CEE 2023: Civil and Environmental Engineering and Architecture (Rzeszów, Poland, 6–8 September 2023); Lecture Notes in Civil Engineering*. – Cham: Springer, 2024. – **438**. – P. 70–77. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0\_8

Одержано 29.06.2024