

3D ДРУК БАЛОК ІЗ МОЖЛИВІСТЮ ВЛАШТУВАННЯ ПОПЕРЕЧНОГО АРМУВАННЯ, ВРАХОВУЮЧИ ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРА

Богдан ДЕМЧИНА¹, Леонід ВОЗНЮК², Дмитро БУРАК³, Сергій ЩЕРБАКОВ⁴

^{1,2,3,4}Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів

¹Державна академія прикладних наук ім. Кс.Броніслава Маркевича в Ярославі (Польща)
вул. Чарнецького, Ярослав, Польща, 37-500

¹bogdan195809@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3498-1519>,

²leonid.i.vozniuk@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9512-8338>,

³dmytro.y.burak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0005-0507-5022>,

⁴serhii.o.shcherbakov@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3978-8600>

Анотація. 3D друк несучих конструкцій призводить до швидких змін у будівельній галузі. З'являються нові можливості для побудови складних архітектурних форм, а також збільшується швидкість та якість виконання робіт. Не потрібно забувати також про виробничі особливості цієї новітньої технології. Важлива особливість, про яку багато хто забуває - це те, що при 3D друку бетоном чи розчином необхідне застосування армування, і ще до тепер відсутні стандартні способи вирішення цього питання.

Застосування будівельних 3D принтерів дозволяє здійснювати складні операції, як на промислових підприємствах, так і безпосередньо на будівельному майданчику. Але, при всіх перевагах цієї технології, існує і ряд недоліків, обумовлених недостатньою оптимізацією нових систем.

Необхідна несуча здатність та жорсткість конструкцій досягається через застосування арматурних каркасів з поздовжнім та поперечним армуванням.

У статті описано, запропоноване та реалізоване авторами, вирішення проблеми по влаштуванню поперечного армування, при 3D друку несучих балок.

Для реалізації завдання були розроблені робочі креслення дослідних конструкцій балок. У статті представлено конструкції балок, а також послідовність їхнього виготовлення методом 3D друку.



Богдан ДЕМЧИНА

професор кафедри будівельних конструкцій та мостів, професор Державної академії прикладних наук, докт. техн. наук, професор



Леонід ВОЗНЮК

доцент кафедри архітектурного проектування та інженерії, канд. техн. наук



Дмитро БУРАК

аспірант кафедри будівельних конструкцій та мостів



Сергій ЩЕРБАКОВ

аспірант кафедри будівельних конструкцій та мостів

Конструкції виготовлялися за розробленою авторами статті послідовністю виконання робіт, з армуванням балок, українською компанією ТОВ "3D TECHNOLOGY UTU".

Авторами була розроблена технологія виготовлення балок із можливістю їхнього армування вертикальним зварним каркасом у проектному положенні.

Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів були виготовлені зразки кубиків та призм, а також арматури.

Запропонована технологія друку балок за допомогою будівельного 3D принтера дозволила виготовити конструкції, які відповідають попередньо розробленим проектним і технологічним рішенням та дала можливість влаштувати поперечні каркаси у проектному положенні, що дозволяє конструкції сприймати не лише згинальні моменти, але і поперечні сили.

Ключові слова. Будівельний 3D друк; балка; технологія; поперечне армування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Оскільки сьогодні в традиційному будівництві бетонні роботи є найдорожчою складовою будівельного виробництва, інтегрування технології 3D друку в будівельний процес дозволить суттєво здешевити виробництво і вирішити важливі завдання, а саме: нестачу кваліфікованих працівників; збільшення швидкості будівництва; через незначний вплив людського фактору збільшення якості будівництва; зменшення кількості будівельних відходів; зменшення вуглецевого сліду бетонних робіт; збільшення творчого потенціалу архітекторів у зв'язку з можливістю друку складних архітектурних форм; відмови від опалубки, як найбільш вартісної та трудо-місткої компоненти процесу бетонування; заміна традиційної опалубки незнімною – надрукованою будівельним 3D принтером.

Головною проблемою технології 3D друку є складність армування друківаних конструкцій, особливо встановлення традиційних вертикальних зварних арматурних каркасів. Сьогодні, якщо говорити про головне використання 3D друку у будівництві – для виготовлення незнімної опалубки та самонесучих стін, не стоїть гостре питання можливості армування. Проте, якщо розглядати 3D принтер як інструмент виготов-

лення несучих конструкцій, критично необхідною є потреба розробки відповідних технологічних та проектних рішень для встановлення арматури в такі конструкції.

Запропоновану технологію можна використати для стін та балочних перекриттів житлових та адміністративних будівель, помешкань тимчасово переміщених людей, або людей чиє помешкання було зруйновано в результаті військових дій (такий будинок був збудований і зданий в експлуатацію українською компанією ТОВ “3D TECHNOLOGY UTU” у місті Ірпінь), військових ангарів, складів та багато інших споруд. Проте в Україні сьогодні відсутні норми для проектування і виготовлення конструкцій за допомогою технології 3D друку. Також відсутня достатня експериментальна інформація щодо несучої здатності та деформативності таких конструкцій для створення таких норм.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В Національному університеті "Львівська політехніка" були досліджені купольні конструкції надруковані на полімерному 3D принтері з пластика PLA. [1, 2].

Сьогодні активно розглядають можливість використання технології 3D друку у космічній сфері, зокрема при колонізації планет, з використанням місцевих ґрунтів, в якості складових суміші для друку [3,4 ,5].

Сучасні технології вимагають великої точності. Важливим першим кроком друку є коректно сформоване робоче завдання для будівельного 3D принтера. [6].

Оскільки головними перевагами технології 3D друку є відмова від опалубки і можливість друку складних архітектурних форм, проводяться дослідження бетонної опалубки надрукованої за допомогою будівельного 3D принтера [7, 8].

Сьогодні технологія 3D друку дозволяє зводити нетипові будівлі зі складною архітектурою безпосередньо на будівельному майданчику, або окремі збірні конструкції в цеху, для подальшого їх монтування на об'єкті [9].

Важливим питанням в технології 3D друку являється вибір матеріалів, та оптимальний підбір складових бетонної суміші. Оптимізація суміші позитивно впливає на підвищення зчеплення між нанесеними шарами [10]. Можливість масового впровадження технології 3D друку залежить від наявності матеріалів які можливо ефективно використати особливо при друці складних архітектурних форм [11,12]. На сьогодні розробляється також методика друку надвисокоміцним бетоном (УНПС) [13,14].

Проблемою технології 3D друку є складність армування конструкцій. Сьогодні проводяться дослідження можливості армування надрукованих бетонних конструкцій шляхом встановлення сталевих сіток з розміром вічка 6x6 мм, діаметром дроту 0,6 мм [15], а також можливість використання технології автоматизації вкладання несучих арматурних стержнів роботом [16]. Стальна фібра додана до суміші також здатна збільшити несучу здатність і тріщиностійкість бетону [17, 18, 19].

У Нідерландах за допомогою будівельного 3D принтера надрукований і випробуваний велосипедний міст. Проліт мосту складає 6,5 м, а ширина 3,5 м. Висота перерізу мосту 0,92 м. Розрахункове навантаження на міст 5 кН/м^2 [20].

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Завдання дослідження полягає у розробці технології виготовлення балок з можливістю встановлення вертикальних арматурних каркасів у їх проектному положенні при використанні технології будівельного 3D друку.

Для реалізації завдання були розроблені робочі креслення та моделі дослідних балок для їх імпорту у графічні програмні комплекси у вигляді завдання для 3D принтера. Запроектовані балки включали у себе окремі арматурні стержні у нижній розтягнутій та верхній стиснутій зонах, а також попередньо виготовлений арматурний каркас (рис 1)

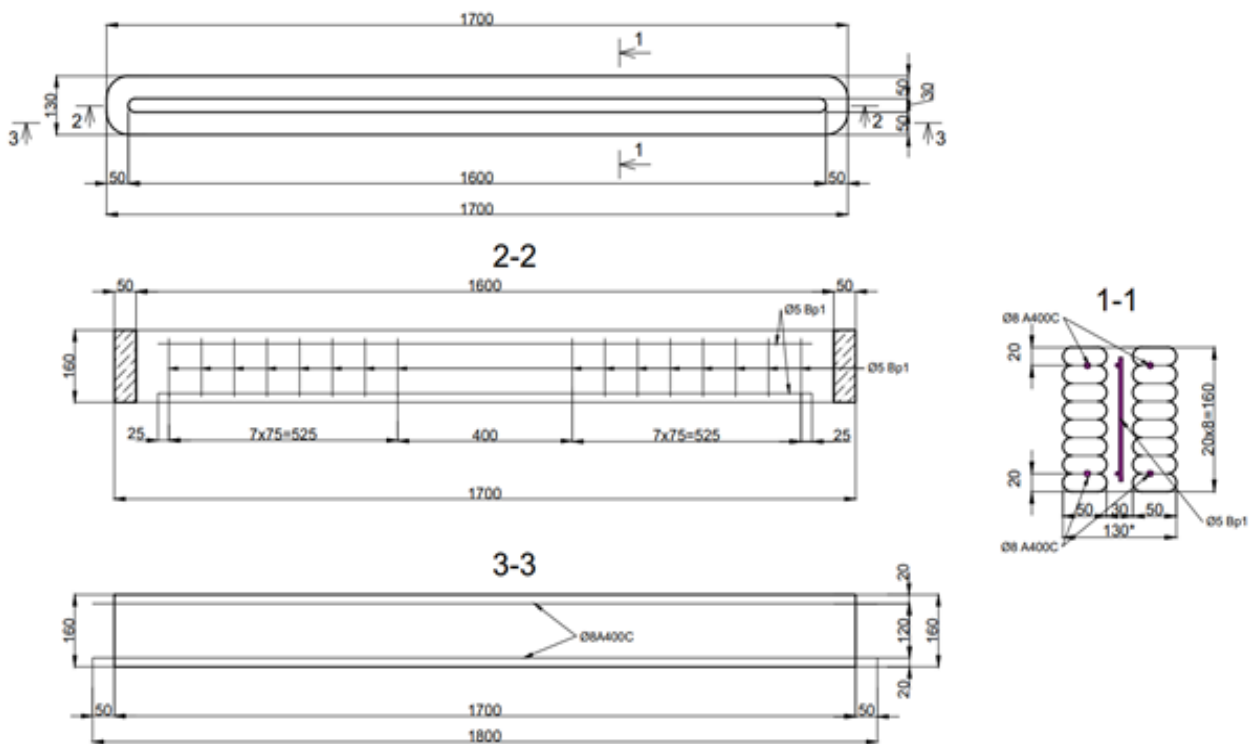


Рис. 1. Проект балки з внутрішнім простором для встановлення вертикального армування виготовленої за допомогою 3D друку.

Fig.1. Design of a beam with internal space for installing vertical reinforcement made using 3D printing

Технологічна послідовність проектування та виготовлення дослідних балок була наступною: розрахунок та конструювання балок із урахуванням особливостей їхньої роботи із визначенням їхніх габаритних розмірів та армування, підготовка завдання для друку на 3D принтері (рис. 1); виготовлення арматурних каркасів; виготовлення окремих арматурних стержнів із приваркою до них тримачів для вимірювального обладнання; розбивка із визначенням місця розташування зразків на робочому столі для друку; визначення порядку друку між суміжними дослідними зразками; задавання напрямку руху сопла 3D принтера, визначення кількості та порядку проходів (рис. 2); перший прохід сопла – друк нижнього шару (рис. 3); технологічна перерва до 5 хв для тужавіння розчину; вкладання окремих арматурних стержнів в проектне положення по нижньому шару у проектованій розтягнутій зоні (рис. 3); технологічна перерва до 5 хв для твердіння розчину; шість наступних проходів сопла 3D принтера з технологічними перервами між кожним проходом – 3...5 хв для тужавіння розчину; влаштування арматурних стержнів в проектне положення у верхній стиснутій зоні після сьомого про-

ходу; технологічна перерва до 5 хв для тужавіння розчину; восьмий - завершальний прохід сопла 3D принтера (рис. 5); очікування до набору міцності розчину; влаштування поперечного арматурного каркасу у наперед передбачений отвір всередині балки; заливка середньої зони із каркасом жорстким цементно-піщаним розчином; очікування до набору міцності розчину.

Габаритні розміри балки - довжина 1700 мм, в перерізі – загальна ширина 130 мм, висота 160 мм. В центрі балки було передбачено отвір у вигляді щілини, на всю висоту конструкції, для вкладання поперечного арматурного каркасу.

Балка друкувалась горизонтально, в загальній кількості 8 шарів. Кожен шар виконувався одним проходом сопла принтера у формі «сплюсненого бублика». Балка друкувалась у робочому положенні.

Для визначення щеплення робочої арматури з розчином, в торцях арматура була випущена на 50 мм за тіло розчину.

Схема руху сопла 3D принтера показана на рис. 2. На рисунку, схематично вказано напрямки проходів сопла у другому шарі поверх арматурних стержнів, розміщених у розтягнутій зоні. Друк балки відбувався у 8 шарів.



Рис 2. Схема руху сопла 3D принтера
Fig.2. 3D printer nozzle movement diagram

На рис. 3 зображено влаштування окремих арматурних стержнів по першому шару у нижній розтягнутій зоні. На рисунку можна побачити контури проходу та вкладену арматуру.

Окремі арматурні стержні які вкладалися у нижній та верхній зоні були діаметром 8 мм, класу А400С. В зоні дії найбільших

моментів, по центру балки до стержня у нижній зоні перпендикулярно приварювалися гайки - фіксатори щоб забезпечити можливість кріплення приладів для вимірювання деформацій арматурних стержнів під час проведення експериментальних досліджень балок під навантаженням. Кріплення гайки - фіксатора до арматурного стержня на рис.4.



Рис. 3. Армуння окремими стержнями по першому шару.

Fig.3. Reinforcement with separate rods along the first layer.

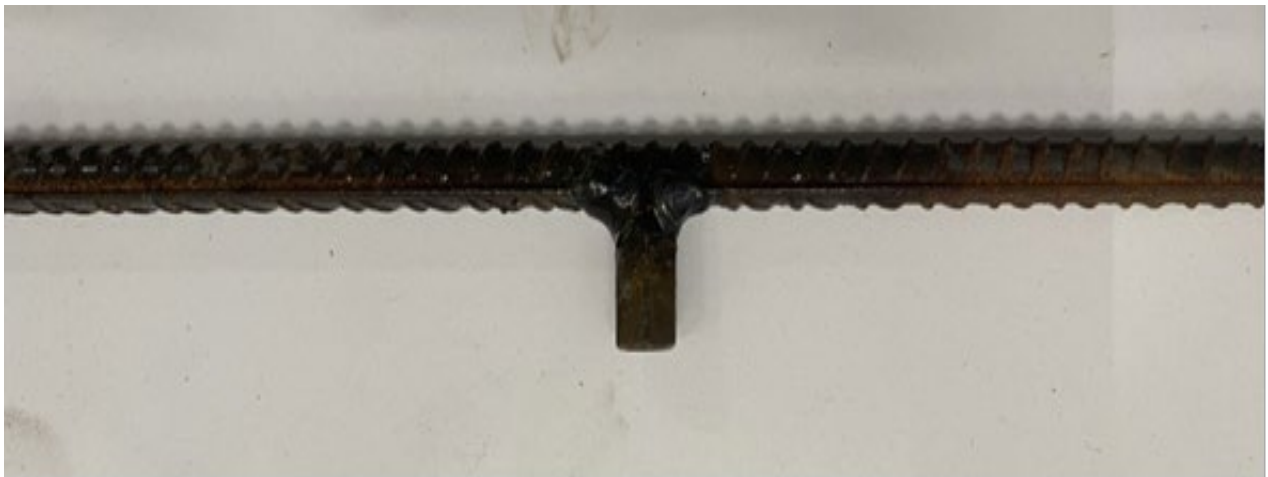


Рис. 4. Подовжена гайка-фіксатор для влаштування вимірювальних приладів.

Fig.4. Extended locking nut for measuring instruments.

Технологічна перерва між проходом сопла у 5 хв була оптимальною для достатнього тужавіння нижнього шару розчину щоб забезпечити проектну товщину захисного шару. В період технологічної перерви 3D принтер не простоював, а продовжував працювати, друкуючи інші дослідні зразки, які були розміщені на робочому столі. Вкладання верхньої робочої арматури відбувалося через 3-5 хвилин після проходу сопла

принтера над 7 шаром .

Після завершення восьмого проходу принтера друк балок завершувався. Вигляд виготовленої балки представлений на рис 5.

Через 30-40 хвилин після завершення друку, в наперед передбачену порожнину всередині балки вкладався вертикальний зварний арматурний каркас який забезпечував роботу балки на поперечну силу.

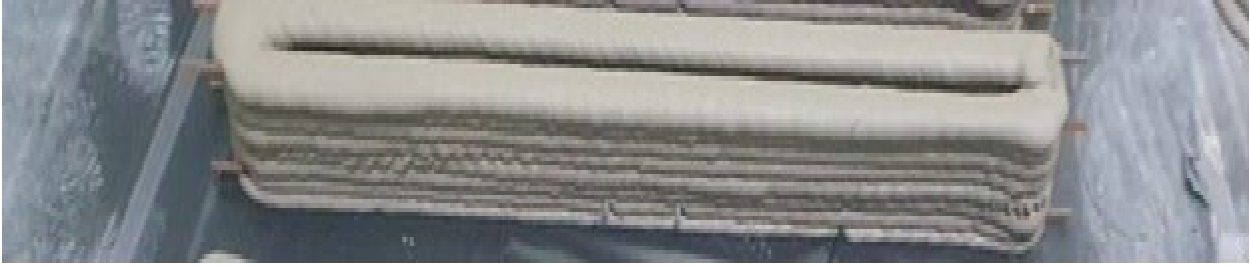


Рис. 5. Балка, надрукована методом 3D друку із можливістю вертикального армування.
Fig.5. The beam is 3D printed with the possibility of vertical reinforcement.

На рис. 6 показана схема влаштування вертикального арматурного каркасу. Каркас був виготовлений із використанням напівавтоматичного зварювання у заводських

умовах, з арматури $\text{Ø}5$ Вр1. Балка із влаштованим вертикальним каркасом представлена на рис. 7.

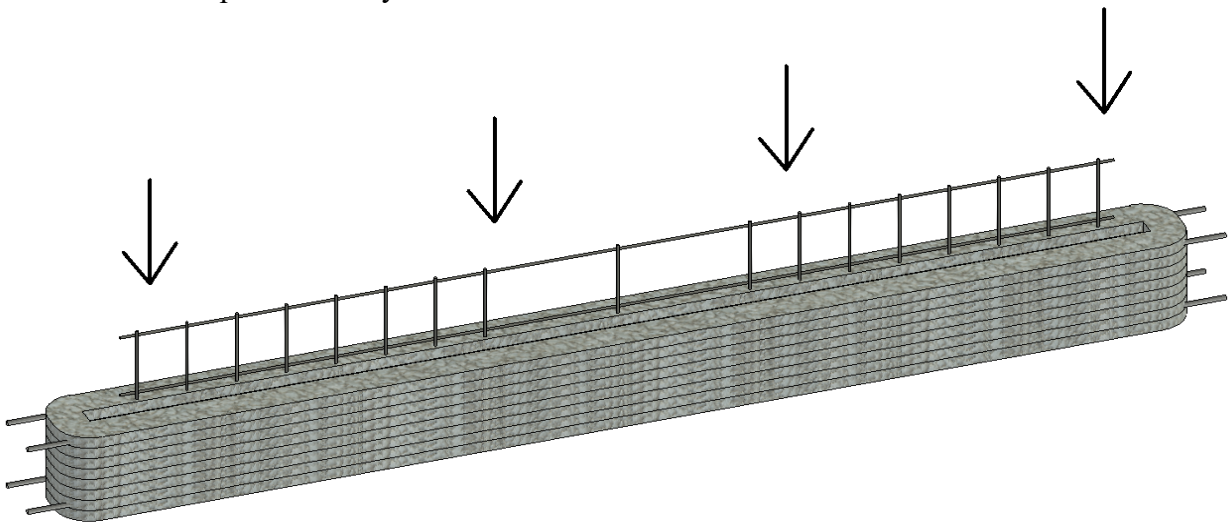


Рис. 6. Схема влаштування вертикального арматурного каркасу.
Fig.6. Diagram of a vertical reinforcement frame



Рис. 7. Балка зі встановленим вертикальним арматурним каркасом
Fig.7. Beam with installed vertical reinforcement cage

Після набору розчином міцності, порожнину всередині балки, разом з каркасом заповнили жорстким цементно-піщаним роз-

чином, для забезпечення спільної роботи вертикального каркасу з тілом балки.

Дані зразки були доставленні у лаборато-

рію НУ “Львівська політехніка” для подальшого проведення випробувань балок.

Для визначення фізико-механічних характеристик розчину були виготовлені зразки

кубиків та призм із того ж розчину, що й дослідні зразки балок (рис. 8). Також були відібрані зразки арматури, з тої самої арматури, яка застосовувалась при армуванні дослідних зразків балок.



Рис. 8. Дослідні зразки:

- a* - зразки куби і призми залиті в опалубці,
- б* - зразки призми надруковані на 3D принтері,
- в* - зразки кубів надруковані на 3D принтері

Fig.8. Prototypes:

- a* - cube and prism samples are poured into formwork,
- б* - samples of the prism are printed on a 3D printer,
- в* - samples of cubes printed on a 3D printer

Надруковані будівельним 3D принтером балки представлені на рис. 9.



Рис. 9. Балки із можливістю влаштування поперечного армування

Fig.9. Beams with the possibility of transverse reinforcement

На останньому етапі порожнини балки заповнювалися жорстким цементно-піщаним розчином. Після набору міцності, не менше як через 28 діб, будуть виконуватися випробування балок на згин на дію навантаження.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована технологія друку балок за допомогою будівельного 3D принтера

дозволила виготовити конструкції, які відповідають попередньо розробленим проектним і технологічним рішенням.

2. Розроблена технологія дає можливість влаштовувати поперечні каркаси у проектному положенні, що значно спрощує виготовлення балок на будівельному майданчику.

3. Запроектована та виготовлена конструкція може сприймати не лише згинальні моменти, але і поперечні сили, при її роботі на згин від дії навантаження.

4. Технологічна послідовність робіт, яка розроблена у публікації, може бути застосована у реальній практиці будівництва із використанням технології 3D друку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Demchyna B., Vozniuk L., Surmai M. Testing of the Ribbed Dome Which is Manufactured by 3D Printing. *Proceedings of CEE 2023. CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 438. Springer, Cham (2024).*
[DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_8).
2. Demchyna, B., Vozniuk, L., Surmai, M., Havryliak, S., Famulyak, Y. Experimental study of the dome model made using a 3D printer from PLA plastic. In: *AIP Conference Proceedings* 2949(1), 020010 (2023).
[doi:10.1063/5.0165270.2](https://doi.org/10.1063/5.0165270.2)
3. Cesaretti G. Dini E., De Kestelier X., Colla V. and Pambaguian L., Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology *Acta Astronaut., Vol.93. 2014. p. 430-450,*
[DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.07.034](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034)
4. Madhavan Nair G., Sridhara Murthi K.R., Prasad M.Y.S. Strategic, technological and ethical aspects of establishing colonies on Moon and Mars. *Acta Astronautica, Vol. 63, Issues 11–12. 2008. P 1337-1342.*
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.05.012.6>.
5. Tomaswick A. Mars and Moon Dust can be Turned Into Geopolymer Cement. Good Enough for Landing Pads and Other Structures. *Universe Today Space and astronomy news 2022.*
6. Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering, Vol. 151, 2016. P. 292–299.*
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
7. Jipa, A., Dillenburger B. 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing, Vol. 9(2). 2022.P.84–107.*
8. Yiquan Zou, Zexu Wang. The Application of 3D Printing Formwork Technology in Concrete Building Materials. *Journal of Electrical Systems, Vol. 20(2). 2024. P. 787–796.*
<https://doi.org/10.52783/jes.1235>
9. Gavrylyak S.A. , New technologies in the field of construction. Using 3d printers *Academic Journals and Conferences. JTBP.2021. p. 15-22.*
10. Hamidreza Gh.S., Corker J., Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an ecoinnovative solution. *Automation in Construction. Vol. 93. 2018. P. 1–11.*
[URL: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005)
11. Malaeb Z., Hachen H., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F. 3D concrete printing: Machine and mix design, *International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET), 2016. pp 14-22.*
12. Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: a review. *Int. J. Confl. Manag., 15 2015. p. 1-9.* DOI: 10.1080/15623599.2015.1012136
13. Bai G., Chen G., Li R., Wang L., Ma G. 3D printed Ultra-High Performance Concrete: Preparation, Application, and Challenges. *W. Duan, L. Zhang, & S. P. Shah (Eds.), Nanotechnology in Construction for Circular Economy Vol. 356, 2023 pp. 53–65. Springer Nature Singapore.*
https://doi.org/10.1007/978-981-99-3330-3_8
- 14 Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudillière N.e, Dirrenberger J., Morel P., Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials & Design Vol. 100. 2016. p. 102–109*
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
15. Miao Liu, Qiyun Zhang, Zhendong Tan, Li Wang, Zhijian Li, Guowei Ma. Investigation of steel wire mesh reinforcement method for 3D concrete printing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 21(1). 2021. P. 24.*
<https://doi.org/10.1007/s43452-021-00183-w>
16. Teng, F., Li, M., Zhang, D., Li, H., & Weng, Y. (2023). BIM-enabled collaborative-robots 3D concrete printing to construct MiC with reinforcement. *HKIE Transactions Vol 30(1), p. 106–115.*
<https://doi.org/10.33430/V30N1THIE-2022-0023>
17. Caron J. F. Ducoulombier, N., Demont L., De Bono V., Mesnil R. 3D Printing of Continuous-Fibers Cementitious Composites: Anisotropic 3D Mortar. *Open Conference Proceedings. 2023. P. 3.*
<https://doi.org/10.52825/ocp.v3i.193>
18. Reinold J., Gudžulić V., Meschke G. (2023). Computational modeling of fiber orientation during 3D-concrete-printing. *Computational*

Mechanics. Vol. 71 (6), 2023. P. 1205–1225.

<https://doi.org/10.1007/s00466-023-02304-z>

19. **Pham L., Tran P., Sanjayan J.** (2020) Steel fibres reinforced 3D printed concrete: influence of fibre sizes on mechanical performance. *Construction and Building Materials*. Vol.250 2020 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785>
20. **Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., Laagland, H. L. M.** Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*. Vol.13(3). 2018. P. 222–236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

REFERENCE

1. **Demchyna B., Vozniuk L., Surmai M.** Testing of the Ribbed Dome Which is Manufactured by 3D Printing. *Proceedings of CEE 2023. CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 438. Springer, Cham (2024). [DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_8).
2. **Demchyna, B., Vozniuk, L., Surmai, M., Havryliak, S., Famulyak, Y.** Experimental study of the dome model made using a 3D printer from PLA plastic. In: *AIP Conference Proceedings* 2949(1), 020010 (2023). [doi:10.1063/5.0165270.2](https://doi.org/10.1063/5.0165270.2)
3. **Cesaretti G. Dini E., De Kestelier X., Colla V. and Pambaguian L.,** Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology *Acta Astronaut.*, Vol.93. 2014. p. 430-450, [DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.07.034](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034)
4. **Madhavan Nair G. , Sridhara Murthi K.R., Prasad M.Y.S.** Strategic, technological and ethical aspects of establishing colonies on Moon and Mars. *Acta Astronautica*, Vol. 63, Issues 11–12. 2008. P 1337-1342. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.05.012.6>.
5. **Tomaswick A.** Mars and Moon Dust can be Turned Into Geopolymer Cement. Good Enough for Landing Pads and Other Structures. *Universe Today Space and astronomy news* 2022.
6. **Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R.** 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, Vol. 151, 2016. P. 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
7. **Jipa, A., Dillenburger B.** 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 9(2). 2022.P.84–107.
8. **Yiquan Zou, Zexu Wang.** The Application of 3D Printing Formwork Technology in Concrete Building Materials. *Journal of Electrical Systems*, Vol. 20(2). 2024. P. 787–796. <https://doi.org/10.52783/jes.1235>
9. **Gavrylyak S.A. ,** New technologies in the field of construction. Using 3d printers *Academic Journals and Conferences. JTBP*.2021. p. 15-22.
10. **Hamidreza Gh.S., Corker J., Fan M.** Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an ecoinnovative solution. *Automation in Construction*. Vol. 93. 2018. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>
11. **Malaeb Z., Hachen H., Tourbah A., Maalouf T., Zarwi N.E., Hamzeh F.** 3D concrete printing: Machine and mix design, *International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET)*, 2016. pp 14-22.
12. **Perkins I., Skitmore M.** Three-dimensional printing in the construction industry: a review. *Int. J. Confl. Manag.*, 15 2015. p. 1-9. DOI: 10.1080/15623599.2015.1012136
13. **Bai G., Chen G., Li R., Wang L., Ma G.** 3D printed Ultra-High Performance Concrete: Preparation, Application, and Challenges. *W. Duan, L. Zhang, & S. P. Shah (Eds.), Nanotechnology in Construction for Circular Economy Vol. 356, 2023 pp. 53–65. Springer Nature Singapore.* https://doi.org/10.1007/978-981-99-3330-3_8
14. **Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudillière N.e, Dirrenberger J., Morel P.,** Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials & Design* Vol. 100. 2016. p. 102–109 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>. S.
15. **Miao Liu, Qiyun Zhang, Zhendong Tan, Li Wang, Zhijian Li, Guowei Ma.** Investigation of steel wire mesh reinforcement method for 3D concrete printing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 21(1). 2021. P. 24. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00183-w>
16. **Teng, F., Li, M., Zhang, D., Li, H., & Weng, Y.** (2023). BIM-enabled collaborative-robots 3D concrete printing to construct MiC with reinforcement. *HKIE Transactions* Vol 30(1), p. 106–115. <https://doi.org/10.33430/V30N1THIE-2022-0023>
17. **Caron J. F. Ducoulombier, N., Demont L., De Bono V., Mesnil R.** 3D Printing of Continuous-Fibers Cementitious Composites: Anisotropic 3D Mortar. *Open Conference Proceedings*. 2023. P. 3.

<https://doi.org/10.52825/ocp.v3i.193>

18. Reinold J., Gudžulić V., Meschke G. (2023). Computational modeling of fiber orientation during 3D-concrete-printing. *Computational Mechanics*. Vol. 71 (6), 2023. P. 1205–1225. <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02304-z>
19. Pham L., Tran P., Sanjayan J. (2020) Steel fibres reinforced 3D printed concrete: influence of fibre sizes on mechanical performance. *Construction and Building Materials*. Vol.250 2020 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785>
20. Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., Laa-gland, H. L. M. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*. Vol.13(3). 2018. P. 222–236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

3D PRINTING OF BEAMS WITH THE POSSIBILITY OF TRANSVERSE REINFORCEMENT, CONSIDERING THE PECULIARITIES OF THE CONSTRUCTION PRINTER

*Bohdan DEMCHYNA
Leonid VOZNIUK
Dmytro BURAK
Serhii SHCHERBAKOV*

Summary: 3D printing of load-bearing structures is creating rapid changes in the construction industry. New opportunities for building complex architectural forms are emerging, and the speed and quality of work is accelerating. But don't forget about the production specifics of this latest technology. An important detail that many people forget about is that 3D printing with concrete or mortar requires the use of some kind of reinforcement, and there are still no

standards for solving this issue. This is ensured by the use of construction 3D printers, which allow for complex operations both at industrial factories and directly at the construction site. However, despite all the advantages of this technology, there are also a number of challenges due to insufficient optimisation of new systems.

The required stiffness of the structures is not achieved due to the absence of a spatial reinforcement structure, which should be provided by vertical reinforcement ties (transverse reinforcement).

The article presents a solution to the problem of transverse reinforcement in 3D printing of load-bearing beams, proposed and performed by the authors.

To implement the task, design drawings of test beam structures were developed. The article presents the design of the beams and the sequence of their production by 3D printing. The beams were manufactured, according to the sequence of work developed by the authors of the article, by the Ukrainian company 3D TECHNOLOGY UTU LLC. The work resulted in the development of a technology for manufacturing beams with the possibility of reinforcing them with a vertical welded cage in the design position.

To determine the physical and mechanical characteristics of the materials, samples of cubes and prisms, as well as reinforcement, were made.

The proposed technology of printing beams using a construction 3D printer made it possible to produce structures that meet the previously developed design and technological solutions and made it possible to place transverse frames in the design position, which allows the structure to take not only bending moments but also transverse forces.

Keywords. Construction 3D printing; beam; technology; transverse reinforcement.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2024 р.