DOI: 10.32347/2786-7269.2025.14.67-76
УДК 691.32/34:004.94

Бабін В.І.,
vlad_babin@i.ua**,** ORCID: 0009-0008-4210-7603,
к.т.н. **Самченко Р.В.,**
sektor3@ukr.net**,** ORCID: 0000-0003-1013-0047,
к.т.н. **Юхименко А.І.,**
winner.wcar@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4231-9602,
Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСОБЛИВОСТІ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ У БУДІВНИЦТВІ

Розглянуто сучасні тенденції застосування технології 3D-друку в будівельній галузі, яка стрімко розвивається як у наукових дослідженнях, так і в практичній площині. Проведено комплексний аналіз технологічного процесу 3D-друку, що охоплює ключові етапи: створення цифрової інформаційної моделі, геодезичну підготовку будівельного майданчика, налаштування обладнання та безпосереднє зведення конструкцій шляхом пошарового екструдування будівельної суміші.

Окрему увагу приділено необхідності високоточного позиціювання та попереднього створення геодезичної основи, що забезпечує сумісність параметрів моделі з реальними умовами місцевості. Показано значення топографічної зйомки, 3D-сканування основи та встановлення реперних точок для забезпечення точності друку на всіх етапах.

Розглянуто розробку складів бетонних сумішей, адаптованих до умов тривимірного друку, з урахуванням їх реологічних характеристик, часу тужавлення, швидкості тверднення та адгезії між шарами. Проаналізовано конструктивні обмеження технології, пов'язані з геометрією друку, потребою в підтримувальних елементах, обмеженнями у висоті споруд і важливістю точного контролю параметрів процесу.

Окремий розділ присвячено застосуванню штучного інтелекту для автоматизації ключових операцій - від параметричного проєктування та управління рухом друкувальної головки до контролю якості зведених елементів у реальному часі.

Здійснено порівняльну оцінку переваг і недоліків 3D-будівництва відносно традиційних методів із урахуванням економічних, екологічних та соціальних факторів. Окреслено перспективи подальшого розвитку технології, включаючи її потенціал у складних умовах експлуатації або на позаземних об'єктах.

Ключові слова: 3D-друк у будівництві; геодезична підготовка; інформаційне моделювання (BIM); бетонні суміші; екструзія; штучний інтелект; автоматизація; адитивні технології; контроль якості; тривимірне проєктування.

Постановка проблеми. Сучасне будівництво все гостріше відчуває потребу у підвищенні продуктивності, зниженні собівартості робіт та ефективному вирішенні житлової кризи. У цьому контексті технологія 3D-друку будівель виступає одним із найперспективніших напрямів автоматизації будівельного виробництва. Її основою є пошарове нанесення будівельної суміші - переважно модифікованого бетону- за допомогою роботизованих екструдерів відповідно до цифрової інформаційної моделі.

Однак ефективне впровадження цієї технології потребує не лише автоматизації самого процесу зведення конструкцій, але й точного просторового узгодження цифрової моделі з реальними умовами будівельного майданчика. У зв’язку з цим важливим аспектом стає геодезична підготовка, яка забезпечує високу точність позиціювання, вирівнювання основи під друк, встановлення контрольних реперів і інтеграцію просторових даних у BIM-модель.

Традиційне будівництво характеризується високою залежністю від ручної праці, нестабільною якістю та складністю масштабування унаслідок індивідуальності кожного проєкту. На відміну від цього, 3D-друк дозволяє стандартизувати архітектурні та інженерні рішення, скорочуючи терміни будівництва, знижуючи витрати та підвищуючи відтворюваність процесів. При цьому зберігається висока гнучкість у проєктуванні завдяки використанню параметричних цифрових моделей та їх точному геоприв’язуванню до реального середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У 2024-2025 роках міжнародна наукова спільнота продовжує активно досліджувати технологію 3D-друку бетону (3DCP), зосереджуючись на оптимізації складу сумішей, підвищенні якості друку та впровадженні штучного інтелекту для автоматизації процесів. Одним із ключових напрямів є застосування машинного навчання для прогнозування властивостей бетонних сумішей. Дослідження, опубліковане в журналі AI in Civil Engineering (2025), продемонструвало ефективність моделей, таких як XGBoost та AdaBoost, у передбаченні міцності на стиск, швидкості подачі суміші та вуглецевого сліду. Використання SHAP-аналізу дозволило виявити вплив окремих компонентів суміші на її властивості, що сприяє точнішому налаштуванню складу для досягнення бажаних характеристик.

Інше дослідження, опубліковане в Case Studies in Construction Materials (2024), застосувало моделі машинного навчання, включаючи Gaussian Process Regression (GPR), для прогнозування анізотропної міцності на стиск та консистенції суміші (slump flow). GPR показала високу точність для різних напрямків друку, що підкреслює потенціал машинного навчання в оптимізації складу бетонних сумішей.

Штучний інтелект також знаходить застосування в контролі якості та управлінні процесом 3D-друку. Дослідження, представлене на arXiv (2024), описує використання глибокого навчання для прогнозування властивостей свіжого бетону на основі стереоскопічних зображень під час змішування. Цей підхід дозволяє в реальному часі оцінювати консистенцію та в'язкість суміші, що сприяє своєчасному коригуванню параметрів друку .

Крім того, дослідження, опубліковане на arXiv (2025), розглядає цифровий ланцюг у 3D-друку бетону, включаючи проєктування, генерацію траєкторій друку та симуляцію процесу. Використання платформи 3Dexperience забезпечує безперервний потік даних між етапами, що підвищує ефективність та точність будівництва.

У практичній площині 3D-друк бетону вже знаходить застосування в будівництві житла (Рис. 1). В Ірландії три родини заселилися в перші 3D-друковані будинки, побудовані за 12 днів друку та 18 днів загальних робіт. Проєкт демонструє потенціал технології в швидкому та ефективному зведенні житла.

Рис. 1. Будівельний майданчик з 3D-друку житлової будівлі

Сучасні дослідження в галузі 3D-друку бетону демонструють значний прогрес у використанні машинного навчання для оптимізації складу сумішей та

впровадженні цифрових технологій для управління процесом будівництва. Практичні приклади впровадження технології в різних країнах підтверджують її потенціал у вирішенні житлових проблем. Однак залишаються виклики, пов'язані з матеріалами, умовами навколишнього середовища та інтеграцією нових технологій у традиційні будівельні процеси. Подальші дослідження та експериментальні впровадження необхідні для подолання цих перешкод та повноцінного використання потенціалу 3D-друку в будівництві.

Мета публікації полягає у комплексному аналізі сучасного стану, технологічних особливостей та перспектив застосування 3D-друку в будівництві з акцентом на розробку спеціалізованих бетонних сумішей, впровадження штучного інтелекту в автоматизацію процесів, порівняння з традиційними методами зведення конструкцій та визначення основних переваг і викликів при практичному впровадженні цієї інноваційної технології.

Основна частина. Геодезична підготовка майданчика для 3D-друку будівлі - один із ключових етапів, що визначає точність і якість подальшого будівництва.

Методи геодезичного забезпечення включають:

- топографічна зйомка майданчика з використанням сучасних безпілотних літальних апаратів (дронів), обладнаних високоточними фотокамерами та LiDAR-сканерами. Такі дрони, наприклад DJI Phantom 4 RTK або DJI M300 RTK, дозволяють швидко та детально отримувати цифрові моделі рельєфу з точністю до кількох сантиметрів;
- влаштування геодезичних реперів і контрольних точок із застосуванням автоматизованих тахеометрів, таких як Leica TS16 або Trimble S9. Ці прилади дозволяють встановити і контролювати базові координати з високою точністю, забезпечуючи надійне позиціювання обладнання принтера у тривимірному просторі;
- використання GPS-RTK систем, наприклад Trimble R10 або Leica GS18, які забезпечують точність позиціонування до 1-2 см або навіть менше. Завдяки цим системам можна безперервно контролювати положення екструдера в процесі друку, мінімізуючи похибки, пов'язані з переміщенням обладнання;
- лазерне сканування майданчика і базової платформи за допомогою портативних пристроїв, таких як FARO Focus або Leica BLK360. Ці сканери створюють хмари точок, що детально відображають стан поверхні, допомагаючи виявити нерівності чи дефекти, які можуть вплинути на якість друку;
- фотограмметрія - метод цифрової картографії, що дозволяє знімати майданчик з різних ракурсів за допомогою цифрових камер і потім обробляти

зображення спеціальним програмним забезпеченням (наприклад, Agisoft Metashape, Pix4D). Це дозволяє створити точні тривимірні моделі, корисні для планування робіт.

Основні складнощі під час геодезичної підготовки пов'язані з необхідністю забезпечення стабільної, рівної і жорсткої основи, яка не деформуватиметься в процесі друку. Нерівності, просідання ґрунту або зміщення обладнання можуть призвести до накопичення похибок у ході побудови шарів і погіршення якості конструкції.

Практичні особливості включають:

– необхідність забезпечення постійного моніторингу положення та калібрування обладнання у ході друку. Для цього використовуються автоматизовані системи контролю позиції, що інтегрують GPS-RTK, лазерне сканування і камери машинного зору. Наприклад, системи Trimble SiteVision дозволяють у реальному часі візуалізувати і коригувати положення принтера;

– врахування кліматичних умов, зокрема вологи ґрунту і температури, які можуть впливати на стабільність основи. Для контролю стану ґрунту застосовують датчики вологості та температури, інтегровані в систему моніторингу майданчика;

– координацію з іншими підрядниками, наприклад, для організації подачі матеріалів та безпечного переміщення обладнання. Це часто здійснюється через цифрові платформи управління будівництвом (BIM-інтеграції, IoT-системи);

– урахування обмежень майданчика (площа, доступність, рельєф) при виборі типу принтера і схеми друку. При цьому геодезична інформація дозволяє оптимізувати маршрут руху екструдера та план розташування модулів для мінімізації переміщень і підвищення продуктивності.

Таким чином, геодезична підготовка - це фундаментальна складова технології 3D-друку будівель, без якої забезпечення точності, якості та безпеки процесу неможливе. Сучасне обладнання та методи геодезичного контролю дозволяють досягати високих стандартів точності і оптимізувати процес будівництва з урахуванням специфіки технології пошарового друку.

Впровадження методів геодезичної підготовки у практику будівництва будівель методом 3D-друку включають наступні етапи:

Етап 1. Підготовка майданчика. Виконати топографічну зйомку місцевості для оцінки рельєфу, розташування підземних і наземних комунікацій, а також суміжних споруд. Визначити необхідний об'єм зрізу або насипу ґрунту з метою вирівнювання території відповідно до проєктної позначки основи.

Етап 2. Створення геодезичної бази. Влаштувати мережу постійних

геодезичних реперів по периметру майданчика з фіксацією їхніх координат у локальній або глобальній системі (WGS84, УСК-2000). Застосувати прилади високої точності, зокрема тахеометри Leica TS16 або Trimble S9, для встановлення контрольних точок, які слугуватимуть орієнтирами для позиціонування принтера.

Етап 3. Моніторинг основи. Перед встановленням обладнання виконати лазерне сканування або цифрову нівеляцію для перевірки горизонтальності і жорсткості основи (Рис.2). Використовувати 3D-сканери (FARO Focus, Leica BLK360) для створення моделі фактичної основи та її порівняння з проєктом.

Рис. 2. Підготовка та моніторинг основи під 3D-будівництво

Етап 4. Позиціонування друкарського обладнання. Здійснити точне розміщення 3D-принтера (портального, роботизованого або канатного типу) згідно з закладеною координатною системою. Інтегрувати GPS-RTK приймачі (наприклад, Trimble R12, Leica GS18) у систему управління принтером для забезпечення постійного контролю за положенням екструдера в режимі реального часу (Рис. 3).

Етап 5. Поточний геодезичний супровід. У процесі друку виконувати періодичні заміри положення поточних шарів за допомогою тахеометрів або лазерного сканування. Для виявлення похибок в геометрії споруди застосовувати системи фотограмметричного моніторингу або машинного зору з автоматичним аналізом деформацій.

Рис. 3. Позиціонування друкарського обладнання та початок будівництва

Етап 6. Фінальний контроль. По завершенню друку провести порівняльний аналіз проєктної та фактичної 3D-моделі з використанням хмари точок (Point Cloud Comparison). Зафіксувати акти геодезичних вимірювань для подальшого введення об’єкта в експлуатацію.

Висновки. Ведуться дослідження щодо використання місцевих матеріалів для друку будівель на Місяці та Марсі (NASA, ESA). Також розвивається концепція друку тимчасових укриттів, мостів та інших інфраструктурних об’єктів у зоні стихійних лих. Розробляються гібридні принтери, здатні одночасно виконувати армування та укладання бетону.

Технологія 3D-друку демонструє значний потенціал у контексті сталого та швидкого будівництва. Незважаючи на існуючі обмеження, активні наукові дослідження та впровадження ШІ дозволяють говорити про формування нової парадигми у будівельній індустрії. Необхідна розробка нормативної бази, адаптація будівельних стандартів та підготовка фахівців, здатних проєктувати під особливості 3D-друку.

Список джерел:

1. Buswell R.A. et al. 3D Printing in Concrete Construction: Applications and Challenges. *International Journal of Multidisciplinary Research & Reviews.* 2023. Vol. 2, No. 4, P. 11-18.

2. Lim S. et al. Development of a viable 3D concrete printing system. *Automation in Construction*. 2012. Vol. 217(1), P. 665-670.

3. Dini E. D-Shape technology: Digital construction of buildings by additive fabrication. URL: http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf (дата звернення: 10.05.2025).

4. Khoshnevis B. Contour Crafting: A New Automated Construction Technology. *Automation in Construction.* Vol. 13 (2004), P. 5–19.

5. Tay Y.WD. et al. 3D Printing Trends in Building and Construction Industry. *Journal of Building Engineering*. 2017. Vol. 45, P. 263–268.

6. Interviewing XtreeE: 3D Printing Concrete to Push the limits of Construction. *Sculpteo Blog*. URL: https://www.sculpteo.com/blog/2023/08/18/interviewing-xtreee-3d-printing-concrete-to-push-the-limits-of-construction (дата звернення: 11.05.2025).

7. Weng, Y., Li, M., Ruan, S., Wong, T. N., Tan, M.J., Ow Yeong, K.L., & Qian, S. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261, P. 121245. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245.

8. 3D Printing Construction Market Size, Report, Forecast to 2030. *Straits Research.* URL: https://straitsresearch.com/report/3dprinting-construction-market (дата звернення:11.05.2025).

9. Batikha M., Jotangia R., Baaj M.Y., Mousleh I. 3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 134. P. 104087. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104087.

10. Reid R.L. 3D printing builds eco-friendly houses in Texas town // *ASCE American Society of Civil Engineers.* URL: https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/article/2023/09/3dprinting-builds-eco-friendly-houses-in-texas-town (дата звернення: 11.05.2025).

11. Gangotra A. та ін. 3D Printing Has Untapped Potential for Climate Mitigation in the Cement Sector. *Communications Engineering*. 2023. Vol. 2, № 1. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1038/s44172-023-00054-7.

12. Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z.Y., Salet T.A.M. 3D printing concrete with reinforcement. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 112. P. 103086. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.006.

13. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Wackrow R., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. P. 262–268. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010.

14. Maboudi M. та ін. Current Surveying Methods for the Integration of Additive Manufacturing in the Construction Process. *ISPRS Archives*. 2020. Vol. XLIII-B4-2020. P. 763–768. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-763-2020.

15. Mawas K., Maboudi M., Gerke M. Automatic Geometric Inspection in Digital Fabrication. *ISPRS Archives*. 2022. Vol. XLIII-B1-2022. P. 459–466. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-459-2022

Babin Vladyslav, Candidate of Technical Sciences **Samchenko Roman,**
Candidate of Technical Sciences **Yukhymenko Artem,**
Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhya

TECHNOLOGICAL FEATURES FOR THE USE OF 3D PRINTING IN CONSTRUCTION

This article explores current trends in the application of 3D printing technologies in the construction industry, which is rapidly developing both in scientific research and in practical implementation. A comprehensive analysis of the 3D printing process is provided, covering key stages: creation of a digital information model, geodetic preparation of the construction site, equipment setup, and direct erection of structures via layer-by-layer extrusion of the construction mixture.

Special attention is given to the necessity of precise positioning and preliminary creation of a geodetic base, which ensures compatibility between model parameters and the actual site conditions. The importance of topographic surveys, 3D surface scanning, and installation of control benchmarks is emphasized as essential for achieving accuracy throughout the printing process.

The article examines the development of concrete mix compositions optimized for 3D printing, taking into account their rheological properties, setting time, hardening rate, and interlayer adhesion. It also analyzes design constraints of the technology, such as geometric limitations, the need for support structures, height restrictions, and the critical importance of process parameter control.

A separate section highlights the role of artificial intelligence in automating key operations - from parametric design and movement control of the printhead to real-time monitoring of element quality. A comparative assessment of the advantages and disadvantages of 3D construction versus traditional methods is conducted, considering economic, environmental, and social factors. Finally, the paper outlines future prospects of the technology, including its potential use in extreme conditions or off-Earth construction, opening new frontiers for building in environments inaccessible to conventional methods.

Keywords: 3D printing in construction; geodetic preparation; building information modeling (BIM); concrete mixtures; extrusion; artificial intelligence; automation; additive technologies; quality control; three-dimensional design.

REFERENCES

1. Buswell R.A. et al. 3D Printing in Concrete Construction: Applications and Challenges. *International Journal of Multidisciplinary Research & Reviews.* 2023. Vol. 2, No. 4, P. 11-18. {in English}

2. Lim S. et al. Development of a viable 3D concrete printing system. *Automation in Construction*. 2012. Vol. 217(1), P. 665-670. {in English}

3.Dini E. D-Shape technology: Digital construction of buildings by additive fabrication. URL: http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf (accessed: 10.05.2025). {in English}

4. Khoshnevis B. Contour Crafting: A New Automated Construction Technology. *Automation in Construction.* Vol. 13 (2004), P. 5–19. {in English}

5. Tay Y.W.D. et al. 3D Printing Trends in Building and Construction Industry. *Journal of Building Engineering*. 2017. Vol. 45, P. 263–268. {in English}

6. Interviewing XtreeE: 3D Printing Concrete to Push the limits of Construction. *Sculpteo Blog*. URL: https://www.sculpteo.com/blog/2023/08/18/interviewing-xtreee-3d-printing-concrete-to-push-the-limits-of-construction (accessed: 11.05.2025). {in English}

7. Weng, Y., Li, M., Ruan, S., Wong, T.N., Tan, M.J., Ow Yeong, K.L., & Qian, S. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261, P. 121245. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245. {in English}

8. 3D Printing Construction Market Size, Report, Forecast to 2030. *Straits Research.* URL: https://straitsresearch.com/report/3dprinting-construction-market (дата звернення:11.05.2025). {in English}

9. Batikha M., Jotangia R., Baaj M.Y., Mousleh I. 3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 134. P. 104087. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104087. {in English}

10. Reid R.L. 3D printing builds eco-friendly houses in Texas town // *ASCE American Society of Civil Engineers.* URL: https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/article/2023/09/3dprinting-builds-eco-friendly-houses-in-texas-town (accessed: 11.05.2025). {in English}

11. Gangotra A. та ін. 3D Printing Has Untapped Potential for Climate Mitigation in the Cement Sector. *Communications Engineering*. 2023. Vol. 2, № 1. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1038/s44172-023-00054-7. {in English}

12. Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z.Y., Salet T.A.M. 3D printing concrete with reinforcement. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 112. P. 103086. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.006. {in English}

13. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Wackrow R., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. P. 262–268. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010. {in English}

14. Maboudi M. та ін. Current Surveying Methods for the Integration of Additive Manufacturing in the Construction Process. *ISPRS Archives*. 2020. Vol. XLIII-B4-2020. P. 763–768. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-763-2020. {in English}

15. Mawas K., Maboudi M., Gerke M. Automatic Geometric Inspection in Digital Fabrication. *ISPRS Archives*. 2022. Vol. XLIII-B1-2022. P. 459–466. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-459-2022 {in English}