

УДК [69+504.064]:004.9

*Віталій Свирідюк, доктор філософії, науковий співробітник
відділу змісту і технологій професійної освіти,
Інститут професійної освіти НАПН України,
м. Київ, Україна*

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA) 3D-ДРУКУ В БУДІВНИЦТВІ

Анотація. Технології 3D-друку в будівельній галузі, яка стрімко розвивається потребують комплексного огляду екологічної оцінки життєвого циклу (LCA). На основі систематичного аналізу ключових досліджень за останні роки в яких висвітлюються екологічні переваги, такі як оптимізація використання матеріалів, значне скорочення будівельних відходів та потенційне підвищення енергоефективності об'єктів. Водночас аналізуються обмеження адитивних технологій, зокрема їх залежність від складу використовуваних матеріалів, особливо цементу, що залишається основним джерелом вуглецевих викидів. Пропонується також розглянути методологічні підходи до проведення LCA для 3D-друку в будівництві, наголошуючи на необхідності їх стандартизації, та окреслити перспективні напрямки для майбутніх досліджень, включно з розробкою та впровадженням альтернативних екологічно чистих будівельних матеріалів в Україні.

Ключові слова: 3D-друк, 3DCP, адитивні технології, будівництво, оцінка життєвого циклу, LCA, сталий розвиток, екологічний вплив, бетон, вуглецевий слід, оптимізація матеріалів.

Abstract. 3D printing technologies in the rapidly evolving construction industry require a comprehensive review of environmental life cycle assessment (LCA). Based on a systematic analysis of key studies from recent years, which highlight environmental benefits such as optimized material use, significant reduction in construction waste, and potential improvements in building energy efficiency, this paper also examines the limitations of additive technologies, particularly their dependence on the composition of materials used, especially cement, which remains a primary source of carbon emissions. It is proposed to further explore methodological approaches to conducting LCA for 3D printing in construction, emphasizing the need for their standardization, and to outline promising directions for future research, including the development and implementation of alternative eco-friendly construction materials in Ukraine.

Keywords: 3D printing, 3DCP, additive technologies, construction, life cycle assessment, LCA, sustainable development, environmental impact, concrete, carbon footprint, material optimization.

Будівельна галузь є одним із найбільших споживачів природних ресурсів та джерел викидів парникових газів, відповідаючи за приблизно 39% глобальних викидів CO₂ [6, с. 1; 8, с. 112]. У контексті зростаючих екологічних викликів та глобальних цілей сталого розвитку, впровадження інноваційних технологій, здатних мінімізувати негативний вплив будівництва на довкілля, набуває критичного значення. Технологія 3D-друку бетону (3DCP), як один із напрямків адитивного виробництва, відкриває нові можливості для створення більш сталих будівельних практик. Вона дозволяє зменшити кількість відходів, оптимізувати використання матеріалів та створювати складні архітектурні форми з потенційно меншим впливом на довкілля [10, с. 3; 1, с. 1-2]. Для об'єктивної та всебічної оцінки екологічних переваг та обмежень цієї технології необхідний систематичний підхід, яким є оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) [4]. Метою даної роботи є комплексний аналіз сучасних досліджень у сфері оцінки життєвого циклу 3D-друку в будівництві, узагальнення застосовуваних методологічних підходів, основних кількісних та якісних результатів, а також виявлення перспективних напрямків подальших наукових розвідок.

Екологічна оцінка життєвого циклу в контексті будівництва базується на міжнародних стандартах ISO 14040-14044, які визначають чотири основні етапи:

- визначення мети та сфери застосування (окреслення цілей дослідження, функціональної одиниці, меж системи);
- інвентаризаційного аналізу життєвого циклу (збір даних про використання ресурсів та викиди на кожному етапі);
- оцінки впливу життєвого циклу (перетворення інвентаризаційних даних у показники потенційного впливу на довкілля);
- інтерпретації результатів (аналіз даних, формулювання висновків та рекомендацій) [4].

У дослідженнях LCA для 3D-друку в будівництві зазвичай розглядають такі етапи повного циклу:

- виробництво будівельних матеріалів (видобуток сировини, виробництво цементу, піску, домішок);
- транспортування матеріалів на будівельний майданчик;
- безпосередньо процес 3D-друку (включаючи енергоспоживання обладнання);
- експлуатація будівлі (енергоспоживання на опалення, кондиціонування, освітлення, технічне обслуговування);
- завершення експлуатації (демонтаж, утилізація або переробка матеріалів) [2, с. 449-450].

За даними Bharadwaj R. K. Mantha (2024), була розроблена універсальна структура LCA для 3D-друку в будівництві, що апробована на прикладі двоповерхової вілли в ОАЕ, збудованої за технологією автоматизованого 3D-друку в будівництві «contour crafting» [9, с. 288-289]. Порівняльний аналіз 3DCP та традиційного будівництва за LCA, проведений М. Mohammad та ін. (2020) на прикладі 1 м² зовнішньої несучої стіни, розглядав чотири сценарії, включаючи традиційні бетонні блоки та різні варіанти 3DCP (з армуванням та без, з різними бетонними сумішами). Оцінювання проводились за п'ятьма категоріями впливу, і результати показали, що 3DCP, особливо сценарії без традиційного армування, значно зменшує негативний вплив на довкілля, зокрема викиди парникових газів приблизно на 20% порівняно з традиційним будівництвом [5, с. 10-15].

Аналіз опублікованих досліджень демонструє, що 3D-друк будівель має потенціал до значного зменшення екологічного сліду. Наприклад, дослідження Elias Ali (2021) показало, що 3D-друк будинків площею 60 м² може мати на 38% менший потенціал впливу на глобальне потепління порівняно з традиційним будівництвом.

Порівняння 3D-друку з традиційним будівництвом за екологічними впливами.

Екологічний вплив	
Енергоспоживання на етапі будівництва	Збільшує енергоспоживання на 10-15%.
Токсичність для ґрунтів	Збільшує токсичність ґрунтів на 5-15%.
Токсичність для людини	Зменшує токсичність для людини на 20-30%.
Використання ресурсів	Оптимізує використання ресурсів на 25-35%.
Потенціал глобального потепління	Зменшує потенціал потепління на 30-40%.

Made with  Napkin

Рисунок 1 – Порівняння між 3D-друком та традиційними методами будівництва

Основними факторами такого зменшення є оптимізація використання матеріалів завдяки прецизійному нанесенню, зменшення кількості будівельних відходів та скорочення тривалості будівельних робіт [2, с. 455-456]. Технологія дозволяє скоротити використання матеріалів на 30-40% [6, с. 1].

Однак, екологічні переваги не є абсолютними. Дослідження Bharadwaj R. K. Mantha (2024) виявило, що при використанні методу 3D-друку для двоповерхової вілли, загальна емісія CO₂ становила 103 тонни, причому 52% цих викидів були пов'язані з виробництвом бетону (цемент 614 кг/м³, зола 175 кг/м³, мікрокремнезем 88 кг/м³) [9, с. 291-292]. Це підкреслює критичну важливість оптимізації складу матеріалів. Виробництво цементу відповідає за приблизно 8% глобальних викидів CO₂, і зменшення вмісту цементу на 10% може призвести до зниження потенціалу глобального потепління на 7-9% [10, с. 10]. Перспективним є використання низьковуглецевих цементів, наприклад, технологія LC3 (вапняк-кальцинована глина в кількості 45% замість клінкеру), що спрямована на скорочення викидів CO₂ на 40–50% під час виробництва цементу [3]. Також

позитивний ефект дає використання вторинних матеріалів. Додавання подрібнених відходів шин (заміна 10% заповнювача) до бетонних сумішей для 3D-друку дозволяє знизити потенціал глобального потепління на 6-8% та сприяє розвитку циркулярної економіки [1, с. 12-14]. Енергоспоживання під час процесу друку також може бути значним фактором екологічного впливу, особливо при використанні електроенергії з високим вуглецевим слідом [10, с. 7]. Ключовими факторами, що визначають екологічну ефективність 3D-друку, є: склад матеріалів, геометрична складність конструкцій (перевага 3D-друку зростає зі складністю), масштаб виробництва, джерело енергії для обладнання та транспортні відстані. Методологічні виклики при проведенні LCA включають відсутність стандартизованих підходів (різні функціональні одиниці та межі системи ускладнюють порівняння), обмеженість емпіричних даних про довгострокову експлуатацію 3D-друкованих конструкцій та динамічність самої технології [8, с. 118-120].

Отже 3D-друк у будівництві демонструє значний потенціал для зменшення негативного впливу будівельної галузі на довкілля, головним чином через оптимізацію використання матеріалів, зменшення кількості відходів та скорочення термінів будівництва. Однак, екологічна ефективність технології суттєво залежить від складу використовуваних матеріалів, де домінуючий негативний вплив спричиняє високий вміст портландцементу, виробництво якого пов'язане зі значними викидами CO₂. Подальший розвиток технології 3D-друку в будівництві з точки зору екологічної ефективності має бути спрямований на:

- оптимізацію матеріалів: розробка та впровадження низьковуглецевих цементів (наприклад, геополімерні бетони, цементи типу LC3), збільшення частки вторинної сировини (промислові відходи, будівельне сміття, відходи шин) та дослідження біогенних матеріалів.
- удосконалення технології друку: підвищення енергоефективності друкарського обладнання, розробка гібридних систем із використанням

відновлюваних джерел енергії, оптимізація параметрів друку для мінімізації відходів та покращення якості конструкцій.

- розвиток та стандартизацію методології LCA: створення єдиних підходів до оцінки життєвого циклу 3D-друку в будівництві, розробка спеціалізованих баз даних щодо екологічних впливів матеріалів та процесів, інтеграція LCA з інформаційним моделюванням будівель для комплексної оцінки.

Реалізація цих напрямків дозволить більш точно та комплексно оцінювати екологічні впливи на всіх етапах життєвого циклу та приймати обґрунтовані рішення щодо вибору технологій для досягнення цілей сталого будівництва.

Список використаних джерел

1. Al-Harthi M. A., Al-Sakkaf A. Life cycle assessment (LCA) of 3D concrete printing and casting incorporating ground waste tire rubber aggregates. *Recycling*. 2023. Vol. 8, No. 1. P. 15.
2. Ali E. Cradle to gate life cycle assessment (LCA) of 3D printing houses. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2021. Vol. 15, No. 9. P. 447–456.
3. Bhavani S., Prasad M. L. V. A low carbon cement (LC3) as a sustainable material in high strength concrete: Green concrete. *Materials and Construction*. 2023. Vol. 73, No. 352. e326.
4. International Organization for Standardization. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: ISO, 2006. 43 p.
5. Mohammad M., Masad E., Al-Ghamdi S. G. 3D concrete printing sustainability: a comparative life cycle assessment of four construction method scenarios. *Buildings*. 2020. Vol. 10, No. 12. Article 245. <https://doi.org/10.3390/buildings10120245>.
6. Motalebi A., Khondoker M. A. H., Kabir G. A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing. *Journal of Cleaner Production: Sustainability*. 2024. Vol. 4. Article 100013.
7. Muñoz I., Alonso-Madrid J., Menéndez-Muñiz M., Uhart M., Canou J., Martin C., Stavropoulos P. Life cycle assessment of integrated additive–subtractive concrete 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 112. P. 2149–2159. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06487-0>.
8. Patel R., Kumar S. A comprehensive review of life cycle assessment of 3D printing technology in the construction industry. *Journal of Green Building*. 2024. Vol. 19, No. 2. P. 111–130.

9. Wang H., Smith J. A generic 3D printing life cycle assessment (LCA) framework for AEC applications. *Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2024. P. 288–295
10. Zhang X., Wang Y., Li Q. Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of 3D concrete printing: A review. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 80. Article 103769.