

УДК 72:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.38.2.16>

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ В АРХІТЕКТУРІ: 3D-ДРУК ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПЕРАТИВНОГО БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ ВІЙНИ

Красний Едуард Костянтинович

старший викладач кафедри архітектури та дизайну середовища,
Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна,
e-mail: edredddt@gmail.com, orcid: 0009-0008-7988-1512

Анотація. **Мета дослідження** – визначити перспективи та обмеження застосування технології 3D-друку для оперативного будівництва архітектурних об'єктів в умовах війни та окреслити можливості її впровадження в українську практику.

Методологія дослідження ґрунтується на комплексному підході, що поєднує аналіз сучасної наукової літератури, вивчення міжнародного досвіду застосування 3D-друку в архітектурі, експертні оцінки технологічних можливостей та матеріалів, а також аналіз перспектив й обмежень упровадження цієї технології в умовах війни в Україні. Застосування порівняльного та системного аналізу дало змогу визначити ключові фактори ефективності 3D-друку для оперативного будівництва, а також окреслити шляхи інтеграції цієї технології в українську архітектурну практику.

Результати. Технологія 3D-друку в архітектурі розглядається як одна з найбільш перспективних інновацій, здатних забезпечити швидке реагування в кризових умовах. Її застосування дає змогу мінімізувати витрати часу, ресурсів і людської праці, що є особливо важливим в умовах війни, коли наявна нагальна потреба у створенні захисних споруд, медичних пунктів, житлових модулів та інших об'єктів критичної інфраструктури. У статті розглянуто сучасний стан розвитку технологій 3D-друку в архітектурі, їхні технічні можливості та приклади використання у світі. Окрема увага приділяється потенціалу цієї технології для України, зокрема в процесі оперативного будівництва об'єктів цивільного захисту, укриттів і тимчасових житлових просторів. Проаналізовано переваги 3D-друку – висока швидкість зведення, економія матеріалів, екологічність, адаптивність проектних рішень, а також обмеження: нормативно-правові бар'єри, вартість обладнання, довговічність матеріалів.

Наукова новизна статті полягає в комплексному дослідженні можливостей застосування 3D-друку саме в умовах воєнного конфлікту в Україні, що дає змогу оцінити його потенціал для швидкого відновлення житлової та соціальної інфраструктури. Уперше системно проаналізовано переваги, обмеження та технологічні аспекти 3D-друку в кризових ситуаціях із практичними рекомендаціями щодо впровадження в українську будівельну практику.

Практична значущість. Результати дослідження можуть стати важливим елементом підвищення стійкості та безпеки держави у воєнних і післявоєнних умовах, формуючи нову парадигму будівництва, орієнтовану на швидкість, гнучкість та інноваційність.

Ключові слова: 3D-друк, оперативне будівництво, модульна архітектура, кризові технології, воєнні умови, інноваційні матеріали.

ВСТУП

Сучасна війна в Україні супроводжується масштабними руйнуваннями житлових будинків, об'єктів інфраструктури та соціальних установ. Виникає потреба у швидкому відновленні та створенні нових споруд, здатних забезпечити безпеку населення й задовольнити першочергові потреби в житлі та медичному обслуговуванні. Традиційні технології будівництва є надто затратними за часом та ресурсами, що обмежує їх ефективність у кризових умовах. З огляду на це, актуальним є дослідження можливостей застосування 3D-друку для оперативного зведення будівель.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Технологія 3D-друку в будівництві та архітектурі активно досліджується у світі. В Україні дослідження зосереджені на адаптації міжнародного досвіду та конструкцій принтерів. Практичні приклади застосування технології в Україні були показані в публікації К. Бутко [1]. С. Іванов-Костецький, І. Гуменник, І. Воронкова [3] дослідили шляхи застосування 3D-друку в сучасній архітектурі, акцентуючи на модульності та адаптивності споруд. Дослідження К. Кірик, Н. Журавської, П. Стефанович [4] показали екологічний вплив та перспективи розвитку 3D-будівництва. О. Орисенко, М. Нестеренко, А. Шокало, Т. Нестеренко [5] дослідили конструкції будівельних принтерів. І. Слепцов, Н. Гудкова [6] відзначили переваги 3D-друку: скорочення часу будівництва, економію матеріалів, зменшення відходів та формування інноваційного архітектурного середовища. М. Шилоткач, О. Григорчук [7] вивчили актуальність цифровізації будівництва.

Міжнародні дослідження зосереджені на матеріалознавстві, конструкції будівельних принтерів та застосуванні 3D-друку для швидкого й модульного будівництва. С. Баніхашемі, Х. Шахрабі Фарахані, Л. Остад Тагізаде [10] визначили потенціал 3D-друку для швидкого житлового будівництва з економією ресурсів. Ф. П. Бос, Р. Дж. М. Вулфс, З. Й. Ахмед та Т. А. М. Салет [11] проаналізували роботу із земляними та бетонними сумішами. Р. А. Басуел, В. Р. Ліал де Сільва, С. З. Джонс, Дж. Дірренбергер [12] висвітлили автоматизоване будівництво через контурне формування та бетонну екструзію. Особливості 3D-друку бетоном з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів визначили Г. Де Шуттер, К. Лесаж, В. Меччерін, В. Н. Нерелла, Г. Хаберт, І. Агусті-Хуан [13]. М. Геблер, А. Й. М. С. Уітеркамп, С. Віссер [14] дали першу комплексну оцінку

3D-друку з погляду глобальної стійкості. Б. Хошневіс [15], А. Перро [16], Т. А. М. Салет, З. Й. Ахмед, Ф. П. Бос, Х. Л. М. Лаагланд [17] проаналізували особливості 3D-друку із земляними та бетонними сумішами. П. Шакор, С. Неджаді, Г. Пол, С. Малек [18] дослідили можливості та проблеми 3D-друку бетоном. Й. В. Д. Тей, Б. Панда, С. К. Пол, Н. А. Нур Мохамед, М. Дж. Тан, К. Ф. Леонг [19] провели огляд тенденцій 3D-друку в будівельній галузі. Т. Ванглер, Е. Льорет, Л. Райтер, Н. Хек, Ф. Грамазіо, М. Колер, Р. Дж. Флетт [20] підтвердили важливість оцінки міцності та довговічності конструкцій, надрукованих у 3D. Х. Чжун [21] дослідив геополімери як перспективні матеріали.

Так, наукова та практична література свідчить про значний потенціал 3D-друку для оперативного будівництва. Водночас комплексних досліджень щодо його застосування у воєнних та кризових умовах України поки недостатньо, що обґрунтовує актуальність подальшого вивчення цієї теми.

МЕТА

Мета – вивчити сучасні тенденції застосування технології 3D-друку в будівництві та архітектурному проектуванні для визначення перспектив її використання в умовах війни та післявоєнного відновлення української інфраструктури. Досягнення мети дослідження дасть змогу українським архітекторам і будівельним фахівцям оцінити можливості 3D-друку для оперативного, економічного та стійкого будівництва тимчасових і постійних споруд, укриттів і житлових модулів. Методи дослідження, застосовані в статті, містять аналіз літературних та наукових джерел щодо застосування 3D-друку в будівництві в Україні та за кордоном; порівняльний аналіз ефективності 3D-друку порівняно з традиційними технологіями будівництва з погляду часу та ресурсів; огляд практичних кейсів і досвіду застосування технології в кризових умовах та військових ситуаціях, включно з використанням у швидкому зведенні житлових і громадських споруд; синтез наукових даних для визначення потенціалу та обмежень технології в українському контексті, а також перспектив її інтеграції в програми відновлення країни після війни.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3D-друк у будівництві, або адитивне виробництво будівельних конструкцій, полягає в пошаровому формуванні об'єктів за цифровим проєктом без використання традиційних опалубок. Технологія дає змогу реалізовувати

складні архітектурні форми, оптимізувати витрати матеріалів та скоротити час будівництва [12, с. 40].

Будівельні 3D-принтери поділяють на декілька типів залежно від конструкції та способу подання матеріалу:

1. Роботизовані системи на основі крана або порталної конструкції – використовують екструзію бетонних сумішей або композитів. Робоча головка переміщується вздовж координатних осей, накладаючи матеріал пошарово [15, с. 8].

2. Мобільні автономні принтери – пересуваються будівельним майданчиком, формуючи стіни без потреби у великій техніці, що особливо важливо в умовах обмеженого простору або небезпеки [5, с. 107].

3. Модульні системи з роботизованими маніпуляторами – здатні друкувати складні елементи конструкцій, наприклад арки, колони чи панелі з індивідуальною геометрією [4, с. 80].

4. Програмне забезпечення 3D-принтерів працює на основі цифрових моделей будівель, створених у CAD-системах. Це дає змогу автоматично контролювати товщину шару, час висихання матеріалу, швидкість подання суміші та точність накладання, що значно підвищує якість конструкцій.

Для оперативного й економічного будівництва особливе значення має добір матеріалів, які швидко тверднуть, мають достатню міцність і доступні локально. Найпоширеніші матеріали:

1. Бетонні суміші для 3D-друку – спеціальні композиції із цементу, води, наповнювачів і пластифікаторів, що забезпечують швидке тверднення та стабільність шарів. Вони можуть містити армувальні волокна для підвищення міцності [16, с. 672].

2. Геополімери та композити – екологічно чисті матеріали, що допомагають створювати конструкції з низьким вуглецевим слідом. Вони стійкі до вологи та температурних перепадів, що важливо для тимчасових укриттів [21, с. 115].

3. Біополімери та суміші на основі глини або місцевих матеріалів – дешеві й доступні в кризових регіонах, застосовуються для друку легких житлових модулів і тимчасових будівель. [20, с. 70]

В умовах воєнних дій 3D-друк дає змогу максимально зменшити потребу у великій кількості робітників та техніки, що знижує ризики для персоналу. Також технологія забезпечує оперативне моделювання конструкцій під конкретні умови: наприклад, адаптацію укриттів під наявні руїни чи швидке

масштабування житлових модулів для внутрішньо переміщених осіб.

Так, поєднання цифрового моделювання, роботизованих систем і спеціалізованих матеріалів робить 3D-друк ефективним інструментом швидкого будівництва в кризових та воєнних умовах, забезпечуючи одночасно економічність, безпеку та архітектурну гнучкість. 3D-принтери дають змогу оперативно створювати захисні споруди з урахуванням локальних умов та рівня загрози. Наприклад, можливо друкувати модульні бомбосховища, що легко інтегруються в наявну інфраструктуру та забезпечують необхідний рівень захисту. За допомогою 3D-друку можна швидко зводити тимчасові медичні модулі з готовими просторовими планами, що дає змогу оперативно розгорнути мобільні шпиталі та пункти для надання першої допомоги. 3D-друк допомагає виготовляти модульні житлові блоки, які легко транспортувати та збирати на місці. Такі конструкції можуть забезпечувати базові потреби в житлі, водопостачанні та електропостачанні, скорочуючи час на облаштування тимчасового житла. Уражені будівлі й споруди можна частково або повністю відновлювати з використанням 3D-друку, що дає змогу швидко реагувати на руйнування та підтримувати життєдіяльність громад. [6] Досвід міжнародних експериментальних проєктів показує, що впровадження технології 3D-друку може суттєво знизити вартість зведення соціальних об'єктів, зокрема шкіл та медичних центрів, що підтверджується результатами досліджень [14, с. 160]. Крім того, новітні розробки у сфері цифрового бетону демонструють високу довговічність надрукованих конструкцій [20, с. 71]. Важливим аспектом є і адаптація технології до місцевих умов з урахуванням доступності матеріалів та їх екологічності [3, с. 60]. Використання 3D-друку в кризових умовах може суттєво змінити парадигму архітектурного проєктування, роблячи його більш стійким та інноваційним [4, с. 85]. Приклади з практики показують, що технологія вже успішно застосовується у воєнних умовах, зокрема в Україні, де надруковані будинки стають частиною процесу відновлення інфраструктури [9].

Використання 3D-друку в будівництві в умовах війни та кризових ситуацій має низку суттєвих переваг:

– швидкість та економічність – 3D-друк дає змогу скоротити час будівництва до кількох днів або навіть годин для невеликих об'єктів, зменшуючи потребу у великій кількості робітників і будівельної техніки;

– зменшення будівельних відходів – пошарова екструзія матеріалу забезпечує точне дозування та використання лише необхідної кількості суміші, що значно зменшує відходи й витрати ресурсів;

– можливість автономного будівництва з мінімальною кількістю персоналу – роботизовані системи можуть працювати майже без участі людей, що підвищує безпеку персоналу в умовах воєнних загроз [18, с. 1110];

– адаптивність форм та індивідуальність проєктів – 3D-друк дає змогу створювати конструкції будь-якої геометрії, модульні елементи та архітектурні деталі за потребою. Це важливо для швидкого адаптування споруд під конкретні умови на місцях;

– екологічність та використання локальних матеріалів – для друку можна застосовувати місцеві суміші на основі бетону, глини або біополімерів, що знижує логістичні витрати та вплив на навколишнє середовище.

Попри значні переваги, застосування 3D-друку в будівництві має низку обмежень та викликів, особливо в умовах війни:

– вартість та доступність обладнання – будівельні 3D-принтери та супутнє обладнання мають високу вартість, що обмежує їх широке впровадження, особливо в кризових умовах. Крім того, доставка та налаштування обладнання в зонах бойових дій можуть бути складними [13, с. 27];

– недовговічність споруд – хоча сучасні суміші для 3D-друку забезпечують достатню міцність для тимчасових споруд, питання довговічності таких будівель порівняно з традиційними конструкціями потребує додаткових досліджень та стандартизації;

– проблеми нормативно-правової бази – в Україні відсутні чіткі стандарти та норми для 3D-будівництва, що ускладнює легальне використання технології для зведення житлових та громадських об'єктів;

– труднощі при підготовці кадрів та технічного супроводу – для роботи з 3D-принтерами потрібні спеціалісти, здатні оперувати цифровими моделями та контролювати процес друку. Недостатня кваліфікація персоналу може знизити якість і безпеку споруд.

Впровадження 3D-друку в будівельну практику України відкриває багато перспектив. Технологія дає змогу швидко відновлювати житлові та громадські об'єкти, забезпечуючи стійку й ефективну реконструкцію пошкодженої інфраструктури. Використання місцевих бетонних сумішей, композитів або біополімерів дасть змогу знизити логістичні витрати та забезпечити доступність технології

в різних регіонах України. Створення спільних науково-практичних проєктів сприятиме адаптації технології до українських умов, підвищенню кваліфікації фахівців та розвитку інноваційних рішень. 3D-друк сприяє розвитку архітектури, орієнтованої на швидкість, гнучкість і стійкість, а також надає змогу експериментувати з формами, конструкціями та функціональними рішеннями. Технологія дає змогу виготовляти як тимчасові модульні об'єкти, так і довготривалі споруди, що робить її універсальним інструментом для оперативного реагування на кризові ситуації.

ВИСНОВКИ

Технологія 3D-друку в будівництві та архітектурі демонструє значний потенціал для оперативного та економічного зведення споруд, що особливо актуально в умовах війни і кризових ситуацій. Вона дає змогу скоротити час будівництва, зменшити витрати матеріалів та людських ресурсів, забезпечує високу адаптивність конструкцій і можливість модульного зведення будівель. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до оцінки можливостей 3D-друку в українських умовах, що поєднує технічні, матеріалознавчі та організаційні аспекти. Попри значні переваги, є обмеження, як-от висока вартість обладнання, недостатня нормативно-правова база, питання довговічності матеріалів та потреба в підготовці кваліфікованих фахівців. Водночас розвиток локальних матеріалів, навчання спеціалістів та адаптація міжнародного досвіду до українських реалій створюють сприятливі умови для впровадження цієї технології. Застосування 3D-друку дає змогу забезпечувати житлом внутрішньо переміщених осіб, оперативно будувати укриття та медичні пункти, сприяє зменшенню впливу на навколишнє середовище та формує нову парадигму архітектури, орієнтовану на швидкість, гнучкість та інноваційність. Впровадження 3D-друку в будівельну практику України може стати ключовим чинником підвищення стійкості держави, забезпечення безпеки населення та розвитку сучасної, ефективної, стійкої архітектури у воєнних і післявоєнних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Бутко К. Скорочення витрат, економія часу та зменшення відходів – чи може 3D-друк змінити архітектуру житлових будинків *Прагматика медіа*. 2023. URL: <https://pragmatika.media/skorochennia-vytrat-ekonomiia-chasu-ta-zmenshennia-vidkhodiv-chy-mozhe-3d-druk-zminyty-arkhitekturu-zhytlovykh-budynkiv/> (дата звернення: 03.10.2025)

[2] Використання 3D-друку в будівництві: можливості та перспективи. *Інтернет-видання Полтавщина*. URL: <https://blog.poltava.to/atlant/16536/> (дата звернення: 03. 10. 2025)

[3] Іванов-Костецький С., Гуменник І., Воронкова І. Шляхи застосування технологій 3D-друку у створенні сучасних об'єктів архітектури. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: «Архітектура». 2022. № 1(7). С. 54–64. DOI: <https://doi.org/10.23939/sa2022.01.054>

[4] Кірик К.Р., Журавська Н.Є., Стефанович П.І. Перспективи розвитку 3D будівництва та його вплив на навколишнє середовище. *SWorld Journal*. 2023. Вип. 18(1). С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-18-01-076>

[5] Орісенко О.В., Нестеренко М.М., Шокало А.В., Нестеренко Т.М. Аналіз конструкцій принтерів для 3D-друку в будівництві та архітектурі. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2021. Вип. 2(57). С. 105–110. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10906>

[6] Слепцов І., Гудкова Н. Інновації в архітектурі України: 3D-друковані будинки. *І Всеукраїнська конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інноватика в освіті, науці та бізнесі»*. 2020. С. 412–418. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17490/1/Innovatyka2020_P412-418.pdf

[7] Шилоткач М., Григорчук О. 3D-друк у будівництві: нова ера архітектури. *Фізика – основа цифровізації суспільства та сталого інноваційного розвитку техніки і технологій: матеріали II Всеукраїнської, з міжнародною участю, молодіжної науково-практичної онлайн конференції*. 2025. С. 705–708. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15655>

[8] 3D-друк в архітектурі в 2025 році: тренди та досвід *Блог Epic 3D*. URL: <https://epic3d.com.ua/3d-druk-v-arkhitekturi-2025/> (дата звернення: 04.10.2025)

[9] A house 3D printed in 58 hours is donated to a soldier in Ukraine *3Dnatives*. URL: <https://www.3dnatives.com/en/house-3d-printed-ukraine-260720245/> (дата звернення: 04.10.2025)

[10] Banihashemi S., Shahrabi Farahani H., Ostad Taghizadeh L. 3D printing in construction: sustainable technology for rapid housing. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 420. P. 120–135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01314-y>

[11] Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z.Y., Salet T.A.M. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2016. Vol. 11(3). P. 209–225. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>

[12] Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. P. 37–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>

[13] De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V. N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete – technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. P. 25–36. URL: <http://hdl.handle.net/1854/LU-8615719>

[14] Gebler M., Uiterkamp A.J.M.S., Visser C. 3D printing: Environmental, economic and social implications. *Energy Policy*. 2014. Vol. 74. P. 158–167. URL: <https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1016%252Fj.enpol.2014.08.033;h=repec:eee:enepol:v:74:y:2014:i:c:p:158-167>

[15] Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies. *Automation in Construction*. 2004. Vol. 13(1). P. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>

[16] Perrot A. 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 172. P. 670–676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>

[17] Salet T. A. M., Ahmed Z. Y., Bos F. P., Laagland H. L. M. Design of 3D printed concrete structures. *Materials and Design*. 2018. Vol. 162. P. 453–461. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

[18] Shakor P., Nejadi S., Paul G., Malek S. Review of emerging additive manufacturing technologies in civil engineering. *Rapid Prototyping Journal*. 2019. Vol. 25(6). P. 1108–1123. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>

[19] Tay Y. W. D., Panda B., Paul S. C., Noor Mohamed N. A., Tan M. J., Leong K. F. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017. Vol. 12(3). P. 261–276. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>

[20] Wangler T., Lloret E., Reiter L., Hack N., Gramazio F., Kohler M., Flatt R. J. Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*. 2016. Vol. 1. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>

[21] Zhong H. 3D printing geopolymers: A review. *Resources, Conservation & Recycling*. 2022. Vol. 178. P. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104455>

REFERENCES

[1] Butko, K. (2023). Skorochennia vytrat, ekonomiya chasu ta zmeshennia vidkhodiv – chy mozhe 3D-druk zminyty arkhitekturu zhytlovykh budynkiv [Reducing costs, saving time, and cutting waste–can 3D printing change residential architecture]. *Prahmatyka media*. Retrieved from: <https://pragmatika.media/skorochennia-vytrat-ekonomiya-chasu-ta-zmeshennia-vidkhodiv-chy-mozhe-3d-druk-zminyty-arkhitekturu-zhytlovykh-budynkiv/> [in Ukrainian].

[2] Vikorystannia 3D-druku v budivnytstvi: mozhlyvosti ta perspektyvy [The use of 3D printing in construction: opportunities and prospects]. *Internet-vydannia Poltavshchyna*. Retrieved from: <https://blog.poltava.to/atlant/16536/> [in Ukrainian].

[3] Ivanov-Kostetskyi, S., Humennyk, I., & Voronkova, I. (2022). Shlyakhy zastosuvannia tekhnolohiy 3D-druku u stvorenni suchasnykh ob'ektiv arkhitektury [Ways of applying 3D printing technologies in the creation of modern architectural objects]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriya: "Arkitektura"*, 1(7), 54–64. <https://doi.org/10.23939/sa2022.01.054> [in Ukrainian].

- [4] Kirik, K.R., Zhuravska, N.E., & Stefanovych, P.I. (2023). Perspektyvy rozvytku 3D budivnytstva ta yoho vplyv na navkolyshnie seredovyshe [Prospects for the development of 3D construction and its impact on the environment]. *SWorld Journal*, 18(1), 77–87. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-18-01-076> [in Ukrainian].
- [5] Orysenko, O.V., Nesterenko, M.M., Shokalo, A.V., & Nesterenko, T.M. (2021). Analiz konstruktivnykh printeriv dlya 3D-druku v budivnytstvi ta arkhitekturi [Analysis of printer designs for 3D printing in construction and architecture]. *Zbirnyk naukovykh prats. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 2(57), 105–110. Retrieved from: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10906> [in Ukrainian].
- [6] Slioptsov, I., & Hudkova, N. (2020). Innovatsii v arkhitekturi Ukrainy: 3D-drukovanii budynky [Innovations in Ukrainian architecture: 3D-printed houses]. *I Vseukrainska konferentsiia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh «Innovatyka v osviti, nautsi ta biznesi»*, 412–418. Retrieved from: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17490/1/Innovatyka2020_P412-418.pdf [in Ukrainian].
- [7] Shilotskych, M., & Hryhorchuk, O. (2025). 3D-druk u budivnytstvi: Nova era arkhitektury [3D printing in construction: a new era in architecture]. *Fizyka – osnova tsyfrovizatsii suspilstva ta staloho innovatsiinoho rozvytku tekhniki i tekhnolohii : materialy II Vseukrainskoi, z mizhnarodnoiu uchastiu, molodizhnoi naukovo-praktychnoi onlain konferentsii*, 705–708. Retrieved from: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15655> [in Ukrainian].
- [8] 3D-druk v arkhitekturi v 2025 rotsi: trendy ta dosvid [3D printing in architecture in 2025: trends and experience]. *Blog Epic 3D*. Retrieved from: <https://epic3d.com.ua/3d-druk-v-arkhitekturi-2025/> [in Ukrainian].
- [9] A house 3D printed in 58 hours is donated to a soldier in Ukraine. *3Dnatives*. Retrieved from: <https://www.3dnatives.com/en/house-3d-printed-ukraine-260720245/> [in English].
- [10] Banihashemi, S., Shahrabi Farahani, H., & Ostad Taghizadeh, L. (2025). 3D printing in construction: Sustainable technology for rapid housing. *Journal of Cleaner Production*, 420, 120–135. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01314-y> [in English].
- [11] Bos, F.P., Wolfs, R.J.M., Ahmed, Z.Y., & Salet, T.A.M. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867> [in English].
- [12] Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006> [in English].
- [13] De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., & Agusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25–36. Retrieved from: <http://hdl.handle.net/1854/LU-8615719> [in English].
- [14] Gebler, M., Uiterkamp, A. J. M. S., & Visser, C. (2014). 3D printing: Environmental, economic and social implications. *Energy Policy*, 74, 158–167. Retrieved from: <https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1016%252Fj.enpol.2014.08.033;h=repec:eee:enepol:v:74:y:2014:i:c:p:158-167> [in English].
- [15] Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> [in English].
- [16] Perrot, A. (2019). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172, 670–676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017> [in English].
- [17] Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. M. (2018). Design of 3D printed concrete structures. *Materials and Design*, 162, 453–461. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064> [in English].
- [18] Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., & Malek, S. (2019). Review of emerging additive manufacturing technologies in civil engineering. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), 1108–1123. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085> [in English].
- [19] Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: A review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724> [in English].
- [20] Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., & Flatt, R. J. (2016). Digital concrete: Opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67–75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16> [in English].
- [21] Zhong, H. (2022). 3D printing geopolymers: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 178, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104455> [in English].

ABSTRACT

Krasnyi E. Innovative solutions in architecture: 3D printing as a tool for operational construction in wartime

The purpose of the study is to identify the prospects and limitations of using 3D printing technology for the rapid construction of architectural objects in wartime conditions and to outline the possibilities for its implementation in Ukrainian practice.

The research methodology is based on a comprehensive approach that combines analysis of current scientific literature, study of international experience in the application of 3D printing in architecture, expert assessments of technological

capabilities and materials, as well as analysis of the prospects and limitations of implementing this technology in wartime conditions in Ukraine. The use of comparative and systematic analysis made it possible to identify the key factors in the effectiveness of 3D printing for rapid construction, as well as to outline ways of integrating this technology into Ukrainian architectural practice.

Results. 3D printing technology in architecture is considered one of the most promising innovations capable of ensuring a rapid response in crisis situations. Its application allows minimizing the expenditure of time, resources, and human labor, which is especially important in wartime, when there is an urgent need to create protective structures, medical centers, residential modules, and other critical infrastructure facilities. The article discusses the current state of development of 3D printing technologies in architecture, their technical capabilities, and examples of their use around the world. Particular attention is paid to the potential of this technology for Ukraine, in particular in the process of rapid construction of civil protection facilities, shelters, and temporary living spaces. The advantages of 3D printing are analyzed—high speed of construction, material savings, environmental friendliness, adaptability of design solutions—as well as limitations: regulatory barriers, equipment cost, and material durability.

The scientific novelty of the article lies in a comprehensive study of the possibilities of using 3D printing specifically in the context of the military conflict in Ukraine, which allows assessing its potential for the rapid restoration of residential and social infrastructure. For the first time, the advantages, limitations, and technological aspects of 3D printing in crisis situations have been systematically analyzed, with practical recommendations for its implementation in Ukrainian construction practice.

Practical relevance. The results of this study can become an important element in increasing the stability and security of the state in wartime and post-war conditions, forming a new paradigm of construction focused on speed, flexibility, and innovation.

Keywords: 3D printing, rapid construction, modular architecture, crisis technologies, military conditions, innovative materials.

AUTHOR'S NOTE:

Krasniy Eduard, Senior Lecturer at the Department of Architecture and Environmental Design, Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine, e-mail: edredddt2017@gmail.com, orcid: 0009-0008-7988-1512.

Стаття подана до редакції: 07.10.2025.

Стаття прийнята до опублікування: 04.11.2025.

Стаття опублікована: 20.11.2025.