

УДК 691.32

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.1.7>**Кирилаха Світлана Вікторівна,**

аспірантка кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій
факультету будівництва, архітектури та дизайну,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>
E-mail: lanakirilaha@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕРІАЛИ В БУДІВНИЦТВІ З ВИКОРИСТАННЯМ 3D-ДРУКУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ БУДІВЕЛЬ

Анотація. У статті аналізуються найбільш поширені методи 3D-друку, що використовуються в сучасних технологіях адитивного будівництва. Зокрема, розглянуто три ключові методи: спосіб спікання (селективне лазерне спікання, SLS), метод лазерної стереолітографії (SLA) та спосіб пошарового екструдювання (LOM). Кожен із цих методів має свої особливості та переваги в контексті будівельних процесів. Спосіб спікання дозволяє точно формувати об'єкти з різноманітних матеріалів, метод лазерної стереолітографії забезпечує високу точність і використовується для створення складних геометричних форм, а спосіб пошарового екструдювання дозволяє ефективно працювати з великими об'ємами матеріалу. У статті також підкреслено важливість цих методів для вдосконалення будівельних технологій і досягнення більшої ефективності у процесі виготовлення конструкцій.

У статті розглядаються інноваційні адитивні технології, що використовуються в будівництві, зокрема Contour Crafting, Concrete Printing і DShape. Описано принципи їх роботи, переваги застосування порівняно із традиційними методами будівництва, а також потенціал для створення складних архітектурних форм і зниження витрат на матеріали та час. Зокрема, технологія "Contour Crafting" дозволяє створювати великі будівельні елементи з мінімальними затратами, Concrete Printing дає змогу 3D-друкувати індивідуальні будівельні деталі, а DShape відкриває можливості для виготовлення складних конструкцій без використання ливарних форм. У статті підкреслено значення цих технологій у розвитку сучасного будівництва, їхню роль у підвищенні ефективності та зниженні витрат, а також їхній потенціал у створенні інноваційних будівельних рішень. Як матеріал досліджувався бетон, були виготовлені зразки – куби. Визначено фракційний склад компонентів. Бетонний розчин готували в бетонозмішувачі БСМ-500, з об'ємом барабана 500 л. Визначені фізико-механічні характеристики бетону за технологією 3D-друку.

Ключові слова: будівельне виробництво, адитивні технології, 3D-друк, будівельний принтер, екструдювання, будівельний майданчик, спікання, шар, фракція.

Kyrylakha Svitlana. Innovative additive technologies and materials in construction using 3D printing for building creation

Abstract. The article analyzes the most common 3D printing methods used in modern additive construction technologies. In particular, three key methods are considered: sintering (selective laser sintering, SLS), laser stereolithography (SLA), and layer-wise extrusion (LOM). Each of these methods has its own features and advantages in the context of construction processes. The sintering method allows precise formation of objects from various materials, the laser stereolithography method ensures high accuracy and is used to create complex geometric shapes, while the layer-wise extrusion method allows efficient handling of large volumes of material. The article also emphasizes the importance of these methods for improving construction technologies and achieving greater efficiency in the manufacturing of structures.

The article discusses innovative additive technologies used in construction, including Contour Crafting, Concrete Printing, and DShape. The principles of their operation, the advantages of their application compared to traditional construction methods, as well as the potential for creating complex architectural forms and reducing material and time costs, are described. In particular, the Contour Crafting technology allows the creation of large construction elements with minimal costs, Concrete Printing enables 3D printing of individual building parts, and DShape opens up possibilities for producing complex structures without the use of casting molds. The article highlights the importance of these technologies in the development of modern construction, their role in improving efficiency and

reducing costs, as well as their potential in creating innovative construction solutions. Concrete was used as the material for the study, and samples were made in the form of cubes. The fractional composition of the components was determined. The concrete mix was prepared in a BSM-500 concrete mixer with a drum capacity of 500 liters. The physical and mechanical properties of the concrete were determined using 3D printing technology.

Key words: construction production, additive technologies, 3D-printing, construction printer, extrusion, construction site, sintering, sphere, fraction.

Вступ. Сучасні інноваційні 3D-технології та обладнання для їх застосування набувають широкого використання у XXI ст., швидко розвиваються та охоплюють різноманітні аспекти архітектури. Особливої уваги варті нові методи використання 3D-друку, що дають можливість створювати повноцінні будівлі та споруди за допомогою адитивних технологій [1].

Останніми роками різні міжнародні країни активно використовують ці технології, фокусуючись на створенні будівель різноманітного призначення за допомогою обладнання для тривимірного друку. Такі пристрої працюють на основі поетапного виготовлення об'єктів за попередньою цифровою моделлю, спеціально розробленою для кожного конкретного об'єкта [2]. 3D-друк успішно застосовується для виробництва складних конструкцій, які було неможливо створити за допомогою традиційних методів. Такі технології сприяють скороченню витрат, зниженню рівня відходів і підвищенню швидкості будівництва [3].

Технологія 3D-друку стала важливою віхою в розвитку архітектурної практики на межі XX та XXI ст., надаючи нові можливості для проектування та реалізації складних форм і конструкцій, що раніше були неможливі або дуже дорогі для виконання. З наукового погляду її вплив на архітектуру можна розглядати крізь призму її здатності до створення інноваційних, функціональних і естетичних споруд із використанням новітніх матеріалів, а також з погляду екологічної сталості й оптимізації процесів будівництва [1; 4].

3D-друкування (3D-принтинг) – це процес відтворення реального об'єкта за зразком 3D-моделі призначення. В основі технології 3D-друкування лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердої моделі. 3D-друкування може здійснюватися різними способами і з використанням різних мате-

ріалів, але в основі будь-якого з них лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердого об'єкта [5; 7].

Матеріали та методи. Аналіз літературних джерел передбачав огляд наукових публікацій, що стосуються використання адитивних технологій у будівельній сфері на основі використання 3D-друку будівель.

3D-друк у будівництві, або будівельний 3D-друк (3DCP), – це група технологій адитивного виробництва, які використовуються для створення будівель та їхніх компонентів за допомогою пошарового друку відповідно до цифрової 3D-моделі (CAD). Для цього застосовуються різні матеріали, зокрема бетон. Ця технологія відкриває нові можливості для зміни архітектури та геометричних форм.

У сучасних наукових дослідженнях (О. Андрійчук, П. Оласюк, С. Шатов, М. Савицький, Е. Шляхов, І. Хагер, А. Голонка, Р. Путановіч), присвячених новітнім технологіям у будівельній галузі, визначено, що однією із ключових сучасних технологій є 3D-друк бетону, також відомий як адитивне виробництво.

Існує широкий вибір матеріалів для 3D-друку, що використовуються в будівельних проєктах: екструзія (бетон/цемент, віск, піна, полімери), порошкове склеювання (полімерне з'єднання, реакційноздатне з'єднання, спікання) і адитивне зварювання [8]. У 2013 р. компанія “Winsun” із Шанхая (Китай) виготовила першу партію з 10 будинків за допомогою спеціальної суміші «чорнил» на основі цементу, піску, волокон і власної добавки [9]. У дослідженні [10] друкарські суміші містили наноглину, кремнезем і волокна. Автори [11] використовували розчин на основі цементу та на основі поліпропіленового волокна (табл. 1).

У роботах [12; 13] досліджено вплив суперпластифікатора на текучість, технологічність

Таблиця 1

Матеріали композицій (кг/м³) для 3DCP [15]

Композиція	Пісок	Цемент	Зола-унос	Кремнезем	Вода	Автори
1	1 241	579	165	83	232	[11]
2	810	253	192	61	152	[12]

і міцність цементного розчину, з додаванням прискорювача і сповільнювача для контролю реології.

Перший в Україні 3D-друкований житловий будинок завершено 18 липня 2024 р. Проєкт реалізовано Henkel, Ceresit і 3D UTU. Будинок площею 130 м² був зведений за 2 доби за допомогою 3D-принтера та спеціальної цементно-піщаної суміші, розробленої для різних температурних умов [14].

Найбільш використовувані в технології 3D-друку такі три методи (Олександр Шевченко, 2021 р.): 1) спосіб спікання (селективного лазерного спікання) (далі – SLS); 2) метод лазерної стереолітографії (далі – SLA); 3) спосіб пошарового екструдювання (далі – LOM).

Метод селективного спікання у 3D-друці полягає в розплавленні будівельного матеріалу (піску, кварцового або шпатового) лазерним або сонячним променем, що дозволяє створювати точні елементи будівлі. Технологія характеризується високою швидкістю друку (до 35 мм/год).

Метод лазерної стереолітографії (SLA) для 3D-друку архітектурних об'єктів використовує лазер для спікання полімерної композитної суміші в рідкому стані. Лазер сканує траєкторією, визначену проєктом, твердячи матеріал по шарах. Важливою характеристикою є здатність полімерної суміші фотополімеризуватися під дією лазерного випромінювання. Після кожного шару ванну опускають, процес повторюється для наступного шару. Іноді цей метод називають методом наплення.

У дослідженні були використані різноманітні наукові методи, зокрема адитивні технології, як-от Contour Crafting, Concrete Printing і DShape. Ці методи застосовувалися для створення будівельних конструкцій з високою точністю та мінімальними

витратами матеріалів. Технологія “Contour Crafting” використовувалася для виготовлення великих будівельних елементів і формування складних архітектурних структур. Concrete Printing був вибраний для 3D-друку окремих будівельних деталей, що дозволяє знижувати витрати і час на виготовлення. Технологія “DShape” використовувалася для створення складних форм і великих об'єктів без необхідності застосування традиційних ливарних форм.

У дослідженні [15] застосовували бетонні суміші зразків – куби розмірами 150 x 150 x 150 мм та 100 x 100 x 100 мм. Міцність бетону на стиск визначали в лабораторних умовах на зразках – кубах згідно з нормативним документом [23].

Результати. Пошарове екструдювання зараз є провідним методом для переважної частини будівельних принтерів. Принцип методу полягає в подачі швидкотвердної дрібнозернистої бетонної суміші до екструдера 3D-принтера. Суміш містить мінеральні, хімічні й армувальні добавки, що забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики майбутньої будівельної конструкції [16; 17].

3D-друк будинків здійснюється за допомогою принтера, що має форму кранаманіпулятора, який формує конструкцію за проєктом, безпосередньо на будівельному майданчику. Процес передбачає пошарове нанесення матеріалу відповідно до проєктного плану. Екструдер подає швидко твердну бетонну суміш із добавками. Кожен шар укладається на попередній, утворює вертикальну структуру. Нижні шари бетону ущільнюються, підвищують їхню здатність витримувати вагу наступних шарів, що забезпечує загальну міцність конструкції [18]. 3D-принтер наносить кожен наступний шар поверх попереднього, поступово створює задану конструкцію (рис. 1).

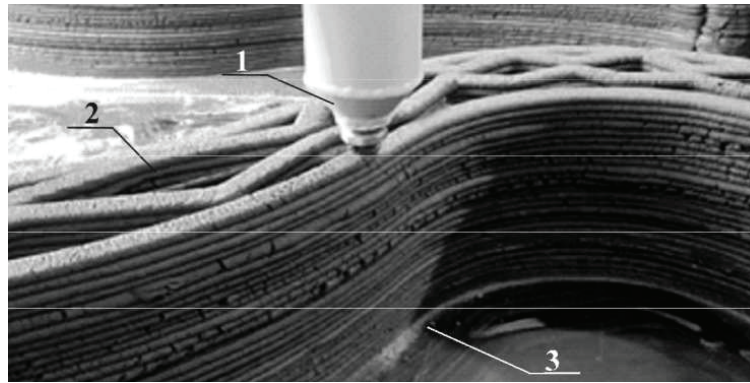


Рис. 1. Виготовлення огорожувальних конструкцій способом пошарового екструдювання за допомогою 3D-принтера [18]:

- 1 – сопло (екструдер);
- 2 – огорожувальна конструкція, що виготовляється;
- 3 – основа.

Технологія “Contour Crafting” (далі – СС) передбачає використання роботизованих систем для створення будівельних конструкцій шляхом пошарового нанесення матеріалу, зазвичай бетону, для формування складних архітектурних форм і великих об’ємів (рис. 2) [19].

СС дозволяє проєктувати інженерні комунікації у стінних порожнинах і автоматизувати їх прокладання за допомогою спеціального обладнання, встановленого на рамі.

Технологія “Concrete Printing” (далі – СР), розроблена пізніше, працює за принципом пошарової екструзії, як і СС. СР – це технологія, що використовує 3D-друк для виготовлення будівельних елементів з бетону. За допомогою цієї технології створюються індивідуальні деталі конструкцій, зокрема

стіни, колони та інші архітектурні компоненти, з високою точністю і мінімальними втратами матеріалів.

Головна відмінність СР – відсутність шпательів [21] на екструдері, що дозволяє створювати складніші геометричні форми (рис. 3).

Завдяки цій характеристиці метод СР вважається одним із найбільш перспективних і ефективних у будівництві. Зростання попиту на унікальні форми будівель і споруд робить цей напрям дедалі пріоритетнішим у галузі.

Технологія “DShape” використовує зв’язування порошку для затвердіння піску за допомогою сполучної речовини. Пристрій розміром 4 x 4 м здатен створювати конструкції об’ємом до 6 кубометрів (рис. 4). Процес друку цією технологією включає три етапи:



Рис. 2. 3D-установка 3D-друку будівлі за технологією “Contour Crafting” [20]



Рис. 3. Процес 3D-будівництва за технологією “Concrete Printing” [20]

1) розроблення 3D-моделі об’єкта; 2) його побудову; 3) остаточну обробку.

Будівництво контролюється через програмне забезпечення *CAD-CAM* та мобільний застосунок, що здійснюють сканування поверхні та розпилення сполучної речовини.

Технологія “DShape” дозволяє будувати об’єкти з використанням спеціальних бетонних сумішей. У цій технології екструдер подає клейову речовину на пісок чи порошок, шар за шаром, завтовшки 5–10 мм.

Технологія “DShape” використовує процес 3D-друку, заснований на зв’язуванні порошкових матеріалів за допомогою сполучної речовини.

Процес складається з таких етапів:

1. Розроблення 3D-моделі: спочатку створюється цифрова модель об’єкта за допомогою CAD-системи.

2. Будівництво об’єкта: пісок або інший порошковий матеріал рівномірно наноситься в шари завтовшки 5–10 мм, кожен шар покривається тонким шаром сполучної речовини. Після цього наноситься наступний шар порошку, процес повторюється.

3. Остаточна обробка: після завершення друку опорний шар порошку видаляється, а поверхня об’єкта шліфується та полірується.

Цей процес дозволяє створювати великі конструкції об’ємом до 6 кубометрів за допомогою апарата розміром 4 x 4 м. Технологія забезпечує високу точність і можливість виготовлення складних форм, що важко досягти традиційними методами будівництва.

Бетон є основним матеріалом у будівництві. Він використовується для виготовлення фундаментів, стін, плит, колон, мостів, доріг



Рис. 4. Будівельний 3D-принтер за технологією “D-Shape” [22]

та інших конструкцій завдяки своїм міцності, довговічності й універсальності.

Бетон є важливим компонентом сучасного будівництва завдяки своїм властивостям, як-от стійкість до впливу навколишнього середовища, можливість створення різноманітних форм і конструкцій, а також доступність і економічність.

Автори роботи [15] для визначення міцності та щільності бетонів, виготовлених методом 3D-друку, у лабораторії ДВНЗ ПДАБА проводили експериментальні дослідження бетонних зразків.

Склад фракцій вихідних компонентів визначали за нормативною методикою шляхом просіювання через набір стандартних сит. У таблиці 2 наведено фракційний склад щебеню та річкового піску.

На основі отриманого фракційного складу піску визначено його модуль крупності, який становить 0,98. Зокрема, за модулем крупності ($M_{кр}$) пісок належить до дрібнозернистого.

Бетонний розчин готували в бетонозмішувачі БСМ-500, з об'ємом барабана 500 л. Потужність двигуна бетонозмішувача – 2,2 кВт, а частота обертання – 18 об./хв. Бетонні зразки виготовлялись у сталених формах і вирізались із конструкцій, створених методом 3D-друку, безпосередньо біля бетонозмішувача.

Для проведення дослідження міцності та щільності бетонів виготовляли зразки – куби розмірами 150 x 150 x 150 мм та 100 x 100 x 100 мм. Усього по шість зразків, виготовлених за традиційною технологією і методом 3D-друку.

Отже, загальна кількість бетонних зразків-кубів для зазначених випробувань – 12.

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, номінальним розмі-

ром 150 x 150 x 150 мм, виготовлених за традиційною технологією, наведені в табл. 3.

Міцність бетону на стиск зразків, номінальним розміром 150 x 150 x 150 мм, виготовлених за традиційною технологією, становила 14,0–17,2 МПа. Показники щільності бетону зразків дорівнюють 1,954–1,967 г/см³. Результати визначення міцності та щільності зразків бетонів, виготовлених за технологією 3D-друку, наведені в табл. 4.

Розрахунки міцності бетону на стиск зразків номінальним розміром 150 x 150 x 150 мм, виготовленого методом 3D-друку, становила 10,9–12,2 МПа. Показники щільності бетону зразків дорівнюють 1,944–1,958 г/см³.

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, виготовлених за традиційною технологією, наведені в табл. 5.

Міцність бетону на стиск зразків номінальним розміром 100 x 100 x 100 мм, виготовлених за традиційною технологією, становила 13,8–21,2 МПа. Показники щільності бетону зразків, виготовлених за традиційною технологією, дорівнюють 2,029–2,06 г/см³.

Результати визначення міцності та щільності бетону, виготовленого за технологією 3D-друку, наведені в таблиці 6.

Міцність бетону на стиск у зразках номінальним розміром 100 x 100 x 100 мм, виготовленого методом 3D-друку, становила 17,2–19,9 МПа. Показники щільності бетону зразків становлять 1,959–2,090 г/см³.

Результати випробувань бетонів, виготовлених як за традиційною технологією, так і 3D-друком, систематизували за міцністю та щільністю залежно від розмірів зразків.

Критерієм визначено масштабний коефіцієнт при стиску, розрахований щодо міцності стандартних зразків 150 × 150 × 150 мм [15; 23]. Додатково були виготовлені та досліджені

Таблиця 2

Фракційний склад компонентів бетонної суміші [15]

Найменування компонентів	Повні залишки на ситах, %, з розміром вічок у мм							
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менше 0,16
Щебінь	–	30,27	61,78	4,11	0,96	1,85	0,96	0,07
Пісок річковий	–	–	–	0,31	3,4	86,67	9,18	0,44

Таблиця 3

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 150 мм, виготовлених у формах традиційним методом [15]

Зразок	Маса, г	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, см ²	Об'єм, см ³	Щільність, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність на стиск, МПа
1 ₁	6 572	149,6	150,3	149,5	224,8	3361	1,955	365,0	16,2
1 ₂	6 593	149,2	150,4	149,5	224,4	3355	1,965	377,5	16,8
1 ₃	6 657	150,9	150,1	149,7	226,4	3389	1,964	366,2	16,2
1 ₄	6 569	149,3	149,8	149,6	3345	3345	1,964	312,5	14,0
1 ₅	6 538	149,3	150,0	149,4	223,9	3345	1,954	338,8	15,1
1 ₆	6 612	150,1	149,9	149,5	224,8	3361	1,967	386,2	17,2

Таблиця 4

Результати визначення міцності та щільності зразків бетонів з ребром 150 мм, виготовлених методом 3D-друку [15]

Зразок	Маса, г	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, см ²	Об'єм, см ³	Щільність, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність на стиск, МПа
2 ₁	6 376	149,0	148,0	148,6	220,5	3276	1,946	243,0	11,0
2 ₂	6 388	147,5	148,5	149,0	219,0	3263	1,958	267,5	12,2
2 ₃	6 452	148,5	148,8	149,1	221,0	3295	1,958	241,2	10,9
2 ₄	6 457	148,8	149,4	148,9	222,2	3307	1,952	263,5	11,9
2 ₅	6 394	148,8	147,6	149,8	219,6	3289	1,944	257,5	11,7
2 ₆	6 446	148,9	148,6	149,0	221,3	3297	1,955	256,2	11,6

Таблиця 5

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 100 мм [15]

Зразок	Маса, г	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, см ²	Об'єм, см ³	Щільність, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність на стиск, МПа
31	2 008	99,2	99,9	99,7	99,2	988,5	2,03	210,0	21,2
32	2 036	101,45	99,5	98,9	100,8	997,1	2,04	171,2	17,0
33	2 087	102,0	99,9	99,4	101,9	1012,9	2,06	197,5	19,4
34	2 045	99,3	100,45	101,1	99,6	1006,9	2,03	137,5	13,8
35	2 050	101,0	100,4	99,7	101,4	1010,5	2,029	201,2	19,8
36	2 100	103,5	100,25	99,0	103,8	1027,2	2,044	192,5	18,6

Таблиця 6

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 100 мм, виготовлених за технологією 3D-друку [15]

Зразок	Маса, г	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, см ²	Об'єм, см ³	Щільність, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність на стиск, МПа
41	2 007	100,8	99,4	100,6	100,3	1009	1,989	181,2	18,0
42	1 985	99,1	101,7	98,9	100,8	1006	1,973	174,2	17,3
43	1 981	99,5	102,0	99,4	101,5	1011	1,959	175,0	17,2
44	2 032	101,4	100,4	101,1	101,8	1019	1,995	181,5	17,8
45	2 095	100,0	100,5	99,7	100,5	1002	2,090	182,5	18,2
46	2 081	99,3	100,8	99,0	100,0	997	2,087	198,8	19,9

на міцність і щільність зразки – куби бетонів розміром 70 x 70 x 70 та 50 x 50 x 50 мм.

На рис. 5, 6 наведені діаграми залежності міцності при стиску бетонів, які були виготовлені у формах за традиційною технологією та методом 3D-друку, від розмірів зразків, а в табл. 6 і 7 наведені узагальнені результати міцності, об'ємної ваги бетонів і значення масштабних коефіцієнтів.

У таблицях 7 і 8 представлено загальні результати визначення міцності та щільності бетонів, виготовлених за традицій-

ною технологією, та результати визначення міцності та щільності бетонів, виготовлених за технологією 3D-друку [15]. Примітка. У таблиці 7 та 8 у дужках наведено середні значення за результатами випробувань зразків.

Згідно з рис. 5 і табл. 6, межа міцності на стиск бетонних зразків-кубів із ребром 150 мм менша порівняно зі зразками з ребром 100 і 50 мм. Це пояснюється впливом сил тертя під час випробувань на пресі. Для зразків із розміром ребра 100 і 50 мм межа міцності

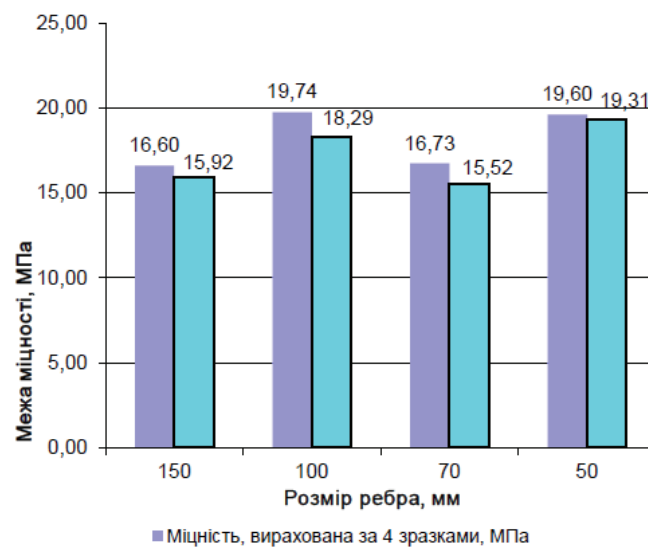


Рис. 5. Міцність при стиску бетонів, виготовлених у формах за традиційною технологією [15]

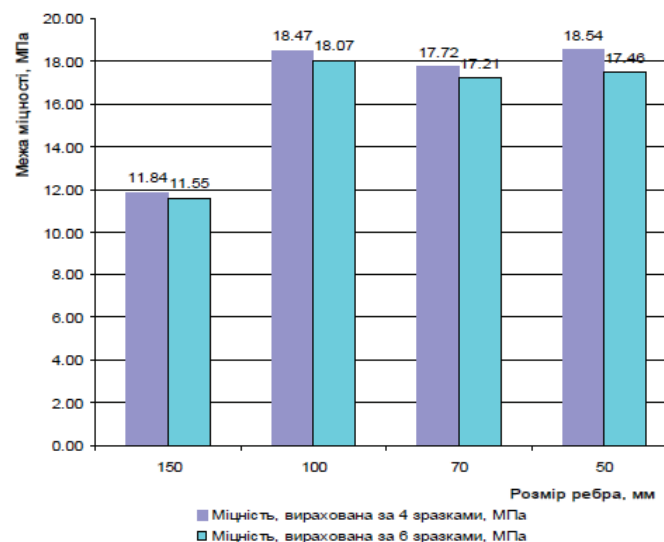


Рис. 6. Міцність при стиску бетонів, відібраних із конструкцій, виготовлених методом 3D-друку [15]

Таблиця 7

**Загальні результати визначення міцності та щільності бетонів,
виготовлених за традиційною технологією [15]**

№	Показники	Куби з розмірами ребра, мм			
		150	100	70	50
1	Межа міцності при стиску, МПа	16,60 (15,92)	19,74 (18,29)	16,73 (15,52)	19,6 (19,31)
2	Об'ємна вага, кг/м ³	1 960 (1 960)	2 040 (2 040)	2 070 (2 065)	2 100 (2 100)
3	Масштабний коефіцієнт	1,0 (1,0)	0,84 (0,87)	0,99 (1,025)	0,85 (0,825)
4	Найближча марка бетону за міцністю, М	М150			

Таблиця 8

**Результати визначення міцності та щільності бетонів,
виготовлених за технологією 3D-друку [15]**

№	Показники	Куби з розмірами ребра, мм			
		150	100	70	50
1	Межа міцності при стиску, МПа	11,84 (11,55)	18,47 (18,07)	17,72 (17,21)	18,54 (17,46)
2	Об'ємна вага, кг/м ³	1 950 (1 950)	2 040 (2 015)	1 980 (1 975)	2 010 (2 015)
3	Масштабний коефіцієнт	1,0 (1,0)	0,64 (0,64)	0,67 (0,67)	0,64 (0,66)
4	Найближча марка бетону за міцністю, М	М100			

становить 19,74 і 19,6 МПа відповідно, що перевищує базовий показник для зразків із ребром 150 мм (16,6 МПа).

Для кубів із розміром ребра 70 мм міцність на стиск майже відповідає показникам базових зразків і становить 16,7 МПа.

Бетон марки М150 має об'ємну вагу, що зростає зі зменшенням розміру кубів: 1 960, 2 040, 2 070 і 2 100 кг/м³ для ребер 150, 100, 70 і 50 мм відповідно.

Дослідження визначило масштабні коефіцієнти міцності бетону щодо стандартних зразків 150 × 150 × 150 мм [15; 23].

Зразки бетону М100, виготовлені методом 3D-друку, мають меншу міцність при стиску для кубів із ребром 150 мм порівняно зі 100, 70 і 50 мм. Межа міцності для кубів 100 і 50 мм однакова – 18,5 МПа. Масштабні коефіцієнти міцності (0,64–0,67) нижчі за нормативні значення.

Висновки. 1. Проаналізовано методи селективного лазерного спікання (SLS), лазерної

стереолітографії (SLA) та пошарового екструдвання (LOM), які мають значний потенціал у будівництві, оскільки дозволяють виготовляти точні, складні та міцні конструкції з різноманітних матеріалів, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності, зменшення витрат і впровадження інновацій у галузь.

2. Вивчено інноваційні будівельні методи 3D-друку, як-от Contour Crafting, Concrete Printing і DShape, які дозволяють автоматизувати процеси будівництва, знижувати витрати та час, підвищувати точність і забезпечувати можливість створення складних архітектурних форм і конструкцій.

3. Визначено фізико-механічні характеристики бетонів на зразках за технологією 3D-друку. Показані результати визначення міцності та щільності бетонів за традиційною технологією та методом 3D-друку.

4. Міцність бетону на стиск зменшується для кубів 150 мм через вплив сил тертя, тоді як об'ємна вага збільшується зі зменшенням

розміру кубів. Межа міцності для кубів 100 і 50 мм становить 18,5 МПа, що вище за базові 16,6 МПа для кубів 150 мм. Масштабні коефіцієнти міцності бетону 3D-друку (0,64–0,67) нижчі за нормативні значення.

5. У статті проведено порівняння традиційної технології будівництва з використанням стандартних методів та інноваційного 3D-друку, оцінено ефективність, економічність і можливості кожного з підходів.

Список використаних джерел:

1. 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. № 112. P. 37–49.
2. Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution. *Business Horizons*. 2012. Т. 55. № 2. P. 155–162.
3. Гончаренко Ю., Мельник А. Адитивні технології в будівництві : навчальний посібник. Київ : Нац. авіац. ун-т, 2019.
4. Сучасні технології 3D-друку: перспективи для будівництва. *Науковий журнал Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2020. № 2. С. 45–58.
5. Labonnote N., Rønnquist A., Manum B., Rütther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 72. P. 347–366.
6. Lipson H., Kurman M. *Fabricated. The New World of 3D Printing*. Indiana : Wiley, 2013. 320 p.
7. Savvitskyi N., Shatov S., Ozhyshchenko O. 3D-printing of build objects. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 3. С. 18–26.
8. Construction 3D Printing. *Wikipedia*: вільна енциклопедія. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing (дата звернення: 13.03.2025).
9. Winsun: 3D Printing for Construction. *Future of Construction* : вебсайт. URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> (дата звернення: 13.03.2025).
10. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. P. 639–647. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817306657>.
11. Le T., Austin S., Lim S., Buswell R. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45. P. 1221–1232.
12. Tay Y.W., Panda B., Paul S.C., Tan M.J., Quian S., Leong K.F., Chua C.K. Processing and properties of construction materials for 3D printing. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 861. P. 177–181.
13. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., Zarwin N., Hamzeh F. 3D concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 6. P. 14–22.
14. Ceresit helps revolutionise construction for Ukraine's rapid reconstruction: first residential building 3D printed. *Henkel* : вебсайт. URL: https://www.henkel.ua/press-and-media/press-releases-and-kits/2024-08-21-ceresit-helps-revolutionise-construction-for-ukraines-rapid-reconstruction-first-residential-building-3d-printed-1983086?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 13.03.2025).
15. Савицький М., Айріх Ш., Халаф І.З. та ін. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів : монографія / за ред. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с.
16. Lipson H., Kurman M. *Fabricated. The New World of 3D Printing*. Indiana : Wiley, 2013. 320 p.
17. 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. С. 54–64. DOI: 10.23939/sa2022.01.054.
18. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 151. P. 292–299. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.357.
19. Tay Y., Panda B., Paul S., Noor M., Tan M., Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017. № 12 (3). P. 261–276. DOI: 10.1080/17452759.2017.1326724.
20. The Construction Industry with Additive Manufacturing: An Opportunity Analysis and Ten-Year Forecast. *SmartTech Analysis*. URL: <https://www.smartechanalysis.com/reports/additivemanufacturing-in-construction> (дата звернення: 13.03.2025).
21. Pershakov V., Bieliatynskyi A., Bakulin E., Bakulina V., Bolotov G., Popovych I. Тенденції розвитку світового висотного будівництва. *Revista Española de Derecho Constitucional*. 2016. № 61. P. 62–72.

22. 3D Printer G-code Commands: Full List & Tutorial. *All3DP* : вебсайт. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-gcodecommands-list-tutorial/> (дата звернення: 13.03.2025).
23. ДСТУ Б В.2.7.-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. (Чинний від 01.01.2010 р.). Київ, 2010. 43 с.

References:

1. 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 [in English].
2. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55 (2), 155–162 [in English].
3. Honcharenko, Y., & Melnyk, A. (2019). *Adytyvni tekhnolohii v budivnytstvi: Navchalnyi posibnyk [Additive technologies in construction: A textbook]*. Kyiv: Natsionalnyi aviatsiynyi universytet [in Ukrainian].
4. Suchasni tekhnolohii 3D-druky: perspektyvy dlya budivnytstva [Modern 3D printing technologies: Prospects for construction] (2020). *Naukovi zhurnal KNUBA*, 2, 45–58 [in Ukrainian].
5. Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., & Rütther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366 [in English].
6. Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated. The new world of 3D printing*. Indiana: Wiley. 320 p. [in English].
7. Savytskyi, N., Shatov, S., & Ozhyschenko, O. (2016). 3D-printing of build objects [3D-druk budivelnikh ob'ektiv]. *Visnyk Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of Dnipropetrovsk State Academy of Building and Architecture*, 3, 18–26 [in Ukrainian].
8. Construction 3D Printing. (n.d.). Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing (accessed: March 13, 2025) [in English].
9. Winsun: 3D printing for construction. (n.d.). Future of Construction. URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> (accessed: March 13, 2025) [in English].
10. Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016> [in English].
11. Le, T., Austin, S., Lim, S., & Buswell, R. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45, 1221–1232 [in English].
12. Tay, Y.W., Panda, B., Paul, S.C., Tan, M.J., Quian, S., Leong, K.F., & Chua, C.K. (2016). Processing and properties of construction materials for 3D printing. *Materials Science Forum*, 861, 177–181 [in English].
13. Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwin, N., & Hamzeh, F. (2015). 3D concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*, 6, 14–22 [in English].
14. Henkel (2024, August 21). *Ceresit helps revolutionise construction for Ukraine's rapid reconstruction: first residential building 3D printed*. Retrieved from https://www.henkel.ua/press-and-media/press-releases-and-kits/2024-08-21-ceresit-helps-revolutionise-construction-for-ukraines-rapid-reconstruction-first-residential-building-3d-printed-1983086?utm_source=chatgpt.com (Accessed: 13 March 2025) [in English].
15. Savytskyi M., Airikh Sh., Khalaf I.Z., et al. (2019). *Arkhitekturno-konstruktivno-tekhnolohichna systema 3D-druku budivelnikh ob'ektiv: kolektyvna monohrafiya / za zah. red. M. Savyts'koho*. Dnipro: FOP Udovychenko O.M. [Architectural-constructive-technological system of 3D printing of construction objects: collective monograph / ed. by M. Savytskyi].
16. Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated. The New World of 3D Printing*. Indiana: Wiley [in English].
17. Ivanov-Kostetskyi S., Humenyk I., Voronkova I. (2020). Shliakhy zastosuvannya tekhnolohii 3D-druku u stvorenni suchasnykh ob'ektiv arkhitektury. *Visnyk Natsional'noho universytetu "L'vivska politekhnika". Seriya "Arkhitektura"*, 54–64 [Ways of applying 3D printing technologies in the creation of modern architectural objects]. DOI: 10.23939/sa2022.01.054 [in Ukrainian].
18. Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*, 151, 292–299. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357> [in English].
19. Tay, Y., Panda, B., Paul, S., Noor, M., Tan, M., & Leong, K. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: A review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12 (3), 261–276. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724> [in English].

20. SmarTech Analysis. (n.d.). *The Construction Industry with Additive Manufacturing: An Opportunity Analysis and Ten-Year Forecast*. Retrieved March 13, 2025. Retrieved from <https://www.smartech-analysis.com/reports/additivemanufacturing-in-construction> [in English].
21. Pershakov, V., Bieliatynskyi, A., Bakulin, E., Bakulina, V., Bolotov, G., & Popovych, I. (2016). Tendentsii rozvytku svitovoho vysotnoho budivnytstva [Trends in the development of global high-rise construction]. *Revista Española de Derecho Constitucional*, 61, 62–72 [in English].
22. 3D Printer G-code Commands: Full List & Tutorial. (n.d.). *All3DP*. Retrieved March 13, 2025. Retrieved from <https://all3dp.com/2/3d-printer-gcodecommands-list-tutorial/> [in English].
23. DSTU B V.2.7.-214:2009. Concrete. Methods for Determining Strength Using Control Samples. [In Effect from 2010-01-01]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 43 p. [in Ukrainian].