МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему: **«ЗАСТОСУВАННЯ 3D-ПРИНТЕРУ В РОЗРОБЦІ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ»**

Виконав: студент 2 курсу, група 8.1923-мбг
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
освітньо-професійної програми «Міське будівництво та господарство»
Любченко Владислав Петрович

Керівник: доцент кафедри міського будівництва і архітектури, канд. техн. наук В.О. Савін

Рецензент: доцент кафедри міського будівництва і архітектури, канд. техн. наук А.В. Банах

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра Міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр і назва)
Освітня програма «Міське будівництво та господарство»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедри *міського будівництва і архітектури*
доцент А.В. Банах
"02" 09 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Любченко Владиславу Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Застосування 3D-принтеру в розробці будівельної продукції»

Науковий керівник роботи доц., к.т.н., Савін Валерій Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*30*" *09* 2024 року № *1486-с*

2. Термін подання студентом кваліфікаційної роботи *грудень 2024 р.*

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи *Актуальність обраного напрямку досліджень, перспективи впровадження майбутніх теоретичних та практичних досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень, значимість у сучасному житті, можливості розвинення проблематики досліджень.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Аналіз світового досвіду застосування 3D-друку для створення будівель та будівельних елементів; визначення переваг та обмежень технології 3D-друку в будівництві; оцінка можливостей використання 3D-принтерів для зниження витрат матеріалів, енергії та трудових ресурсів; формулювання рекомендацій щодо впровадження 3D-друку в практику будівництва.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Від
восьми графічних аркушів із результатами аналітичних обґрунтувань наукового
напряму досліджень, результатами практичних досліджень, навести основні
відомості про найпоширеніші технології 3D-друку, перспективи розвитку та
виклики впровадження 3D-друку в розробці будівельної продукції.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Савін В.О., к.т.н., доц.		
Розділ 2	Савін В.О., к.т.н., доц.		
Розділ 3	Савін В.О., к.т.н., доц.		

7. Дата видачі завдання 02.03.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміт
1	Основні відомості про найпоширеніші технології 3D-друку	1 жовтня	
2	Використання 3D-принтерів в розробці будівельної продукції	1 листопада	
3	Перспективи розвитку та виклики впровадження 3D-друку в розробці будівельної продукції	1 грудня	
4	Попередній захист	10 грудня	

Студент _____ (підпис) Любченко В.П. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проєкту) _____ (підпис) Савін В.О. (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) Гребенюк О.В. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Любченко В.П. Застосування 3D-принтеру в розробці будівельної продукції.

Кваліфікаційна робота для здобуття другого ступеня вищої освіти за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник Савін В.О. Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра міського будівництва і архітектури, 2024.

У кваліфікаційній роботі виконаний аналіз світового досвіду застосування 3D-друку для створення будівель та будівельних елементів. Визначені переваги та обмеження технології 3D-друку в розробці будівельної продукції.

Для максимально ефективного використання технології 3D-друку в будівництві в післявоєнний період в Україні в роботі запропонована стратегія впровадження 3D-друку в розробці будівельної продукції. Основною метою є відновлення інфраструктури та житлового фонду, зниження витрат на будівництво та пришвидшення процесу відновлення, використовуючи інноваційні та доступні технології.

Ключові слова: системи 3D-ПРИНТЕР, БУДІВЕЛЬНА ПРОДУКЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ, БУДІВНИЦТВО, ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ABSTRACT

Liubchenko V. The Use of a 3D Printer in the Development of Construction Products.

Qualifying final work for obtaining a higher education master's degree in specialty 192 Construction and civil engineering, scientific supervisor V. Savin, Zaporizhzhya National University, Y.M Potebnya Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Urban Construction and Architecture, 2024.

The qualification work analyzes the world experience in the use of 3D printing to create buildings and building elements. The advantages and limitations of 3D printing technology in the development of construction products are determined.

For the most effective use of 3D printing technology in construction in the post-war period in Ukraine, the work proposes a strategy for implementing 3D printing in the development of construction products. The main goal is to restore infrastructure and housing stock, reduce construction costs and accelerate the recovery process using innovative and affordable technologies.

Key words: 3D PRINTER, BUILDING PRODUCTS, 3D PRINTING TECHNOLOGIES, CONSTRUCTION, INNOVATIVE TECHNOLOGIES

ЗМІСТ

ВСТУП……... 6
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАЙПОШИРЕНІШІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ……. 8
1.1 Розвиток технології 3D-друку……. 8
1.2 Категорії та методи роботи 3D-принтерів ……. 10
1.3 Принципи роботи та сфери застосування 3D-друку…… 18
2 ВИКОРИСТАННЯ 3D-ПРИНТЕРІВ В РОЗРОБЦІ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ ……. 21
2.1 Сфера використання 3D – принтерів в розробці будівельної продукції 21
2.2 Приклади робіт 3D-друку у будівництві…….. 25
2.3 Особливості технології обладнання для 3D-друку будівель, споруд та конструктивних елементів…… 40
2.4 Матеріали для 3D друку в будівництві…….. 45
3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ВИКЛИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ 3D-ДРУКУ В РОЗРОБЦІ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ…….. 51
3.1 Перспективи розвитку та виклики 3D-друку в розробці будівельної продукції……. 51
3.2 Приклади застосування 3D-друку в розробці будівельної продукції……. 62
3.3 Майбутнє 3D-друку у розробці будівельної продукції …… 74
ВИСНОВКИ …….. 81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……. 82

ВСТУП

Актуальність проблеми. Сучасні технології постійно змінюють підходи до проектування та будівництва, і 3D-друк стає одним із ключових напрямів інновацій у цій сфері. Використання 3D-принтерів у будівництві дозволяє значно скоротити час зведення об’єктів, зменшити витрати матеріалів, мінімізувати вплив на довкілля та відкриває можливості для реалізації складних архітектурних форм, які раніше вважалися недосяжними.

Зростаюча урбанізація та необхідність забезпечення доступного, екологічного та швидкого житла висувають нові вимоги до будівельної галузі. 3D-друк сприяє вирішенню цих проблем, дозволяє створювати житлові, адміністративні та промислові будівлі з мінімальними затратами ресурсів та часу. Технологія забезпечує гнучкість у виборі будівельних матеріалів, таких як спеціальні бетонні суміші, будівельні відходи або навіть ґрунт, що додає значення сталому розвитку та зменшенню впливу будівництва на природу.

Актуальність теми також обумовлена можливістю застосування 3D-друку для створення модульних конструкцій, мобільних будівель, інфраструктурних об’єктів та навіть елементів архітектури з високими естетичними і функціональними показниками. Крім того, така технологія є перспективною для будівництва в умовах природних катастроф чи в складних географічних умовах, де використання традиційних методів є обмеженим.

Таким чином, дослідження можливостей застосування 3D-принтера у розробці будівельної продукції є не лише науково цікавим, але й практично значущим завданням для підвищення ефективності, доступності та екологічності сучасного будівництва.

Метою роботи є дослідження можливостей та перспектив використання технології 3D-друку для створення будівельної продукції, аналіз її впливу на ефективність, екологічність, економічність будівельних процесів, а також

розробка рекомендацій щодо оптимізації використання цієї технології в сучасному будівництві.

Реалізація мети передбачає:

– вивчення принципів роботи 3D-принтера в будівельній галузі;

– аналіз світового досвіду застосування 3D-друку для створення будівель та будівельних елементів;

– визначення переваг та обмежень технології 3D-друку в будівництві;

– оцінка можливостей використання 3D-принтерів для зниження витрат матеріалів, енергії та трудових ресурсів;

– дослідження екологічних аспектів застосування 3D-друку у створенні будівельної продукції;

– формулювання рекомендацій щодо впровадження 3D-друку в практику будівництва.

Об'єкт дослідження є технологія 3D-друку та її використання у створенні будівельних матеріалів, конструкцій та об'єктів різного призначення.

Предмет дослідження є принципи, методи та технології використання 3D-друку в будівельній галузі, а також їх вплив на процес створення будівельних матеріалів, конструкцій та об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів. Для максимально ефективного використання технології 3D-друку в будівництві в післявоєнний період в Україні в роботі запропонована стратегія впровадження 3D-друку в розробці будівельної продукції. Основною метою є відновлення інфраструктури та житлового фонду, зниження витрат на будівництво та пришвидшення процесу відновлення, використовуючи інноваційні та доступні технології.

Структура та обсяг магістерської роботи. Робота складається з вступу, трьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 83 сторінках, 1 таблиця, 36 рисунків. Для написання даної роботи використано 21 літературне джерело.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАЙПОШИРЕНІШІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

1.1 Розвиток технології 3D-друку

3D-принтер – це пристрій, який поступово створює фізичний об'єкт на основі цифрової тривимірної моделі. Завдяки такому пристрою можливо виготовляти об'єкти різної складності, розроблені за допомогою програмного забезпечення для 3D-моделювання.

Перший 3D-принтер було розроблено у 1984 році Чаком Халлом, засновником компанії *3D Systems*, яка є одним із лідерів ринку 3D-друку. У 1983 році Халл винайшов метод стереолітографії – технологію, що передбачає створення твердих об'єктів шляхом нашарування тонких шарів матеріалу, який твердне під дією ультрафіолетового випромінювання. Після патентування методу Халл розширив можливості технології, включивши до неї різні матеріали, здатні змінювати свій стан, і тим самим заклав основу сучасного адитивного виробництва.

У 1988 році компанія *3D* Systems випустила вдосконалений 3D-принтер SLA-250, що став першою комерційною моделлю. У цей же час з’явилися інші технології, зокрема метод наплавлення FDM (Fused Deposition Modeling), розроблений Скоттом Крампом, і технологія селективного лазерного спікання (SLS), запропонована компанією DTM. Ці методи згодом стали одними з найпоширеніших у галузі 3D-друку.

Наприкінці 1990-х років ринок 3D-друку почав активно розвиватися. З'явилися відносно доступні моделі, такі як Spectrum Z510 від компанії ZCorporation, які поєднували високу роздільну здатність і можливість друку кольорових об'єктів. У 2006 році було представлено проєкт RepRap, мета якого

– створення самовідтворюваних 3D-принтерів. Це стало важливим кроком до зниження вартості пристроїв та їх доступності для масового споживача.

З 2009 року, після закінчення патенту на технологію FDM, ціна на 3D-принтери значно знизилася, а їх використання стало популярним не лише у промисловості, але й серед індивідуальних користувачів. Модель першого в світі 3D-принтера наведена на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Модель першого в світі 3D-принтера

1.2 Категорії та методи роботи 3D-принтерів

Сучасні 3D-принтери використовують дві основні технології друку: струменеву та лазерну. Ці технології поділяються на кілька підвидів, які відрізняються типом матеріалів, що застосовуються для створення об'єктів.

Серед витратних матеріалів найчастіше використовуються фотополімерна смола, порошок, силікон, метали, віск, пластик різних типів і фотополімери.

Принцип роботи кожного 3D-принтера залежить від його типу і використовуваних матеріалів. Основними методами є:

- лазерний друк;
- спікання матеріалів;
- пошарове накладання пластику після його плавлення;
- ламінування;
- плавлення порошкових матеріалів;
- полімеризація фотополімерів під дією лазера;
- пошарове склеювання матеріалу;
- електронно-променеве плавлення порошку у вакуумі.

Деякі 3D-принтери здатні працювати з кількома матеріалами одночасно або виконувати друк у різних кольорах, завдяки чому пристрої додатково класифікують на монохромні, які друкують одним кольором, і кольорові, що створюють багатобарвні об'єкти.

Одними з найпоширеніших є кілька технологій, які заслуговують детального розгляду:

SLA (Stereolithography) – стереолітографія. Цей метод базується на дії ультрафіолетового або інфрачервоного випромінювання лазера на фотополімерну рідину, яка затвердіває і перетворюється на пластик. Платформа занурюється у фотополімер, де лазерний промінь проходить по

рідині, створюючи шар за шаром. Цей процес повторюється багаторазово, доки не буде сформовано весь об'єкт.

Перевагами методу є висока точність, швидкість друку і низька ймовірність технічних несправностей. До недоліків належать висока вартість обладнання, обмежена палітра кольорів і відносно невелика міцність кінцевих виробів. Через токсичність матеріалів і високу ціну обслуговування такі принтери не підходять для використання в домашніх умовах.

Схема роботи 3D принтера методом SLA наведена на рис. 1.2.

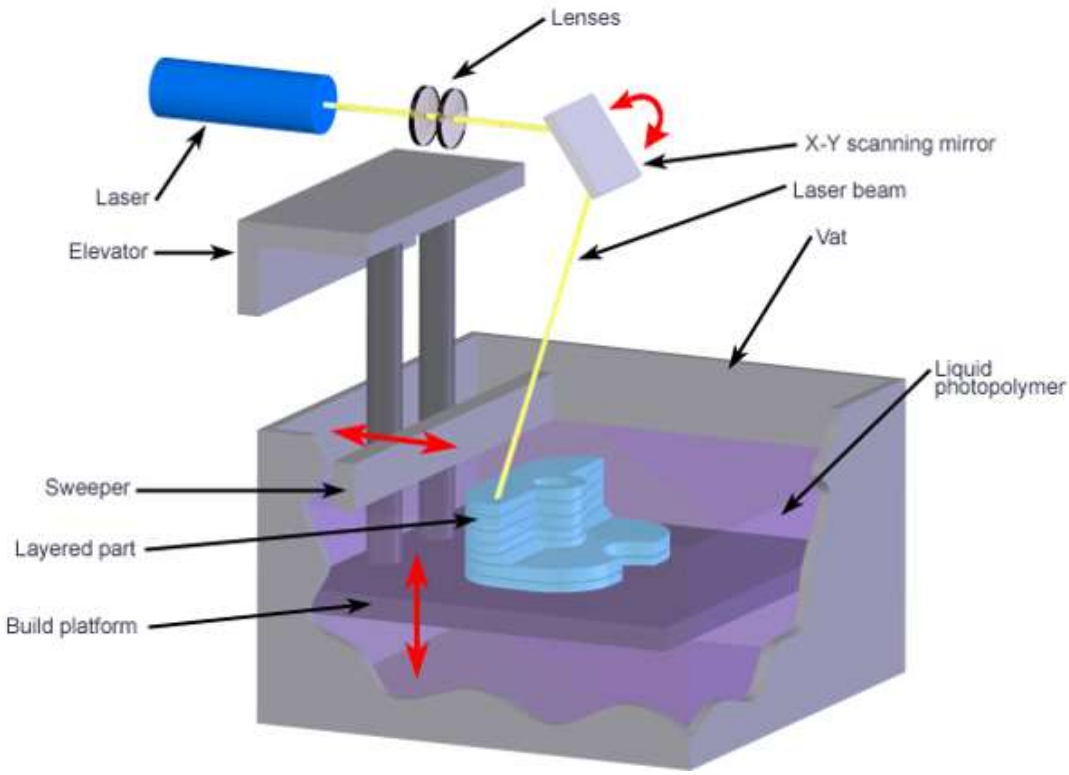


Рисунок 1.2 – Схема роботи 3D принтера методом SLA

SLS (Selective Laser Sintering) — селективне лазерне спікання. Ця технологія схожа за принципом дії на SLA, однак використовує порошкові матеріали. Спеціальний валик рівномірно розподіляє порошок по поверхні платформи, а лазер плавить окремі ділянки, формуючи об'єкт. Процедура повторюється шар за шаром, поки модель не буде завершено.

Час створення виробу залежить від складності його дизайну, а шари настільки тонкі, що попередній шар помітний крізь наступний. У результаті формується структура з високою деталізацією, яка не потребує додаткової обробки. В процесі друку платформа поступово опускається, що дозволяє формувати об'єкт заданої форми.

Після завершення роботи готовий виріб дбайливо вилучають із композиту та переносять у спеціальну камеру для очищення від залишків порошку. Для цього використовують щітки та потік стисненого повітря з компресора. Після очищення модель обов’язково просочують спеціальним суперклеєм для її зміцнення. Схема роботи 3D принтера методом SLS наведена на рис. 1.2.

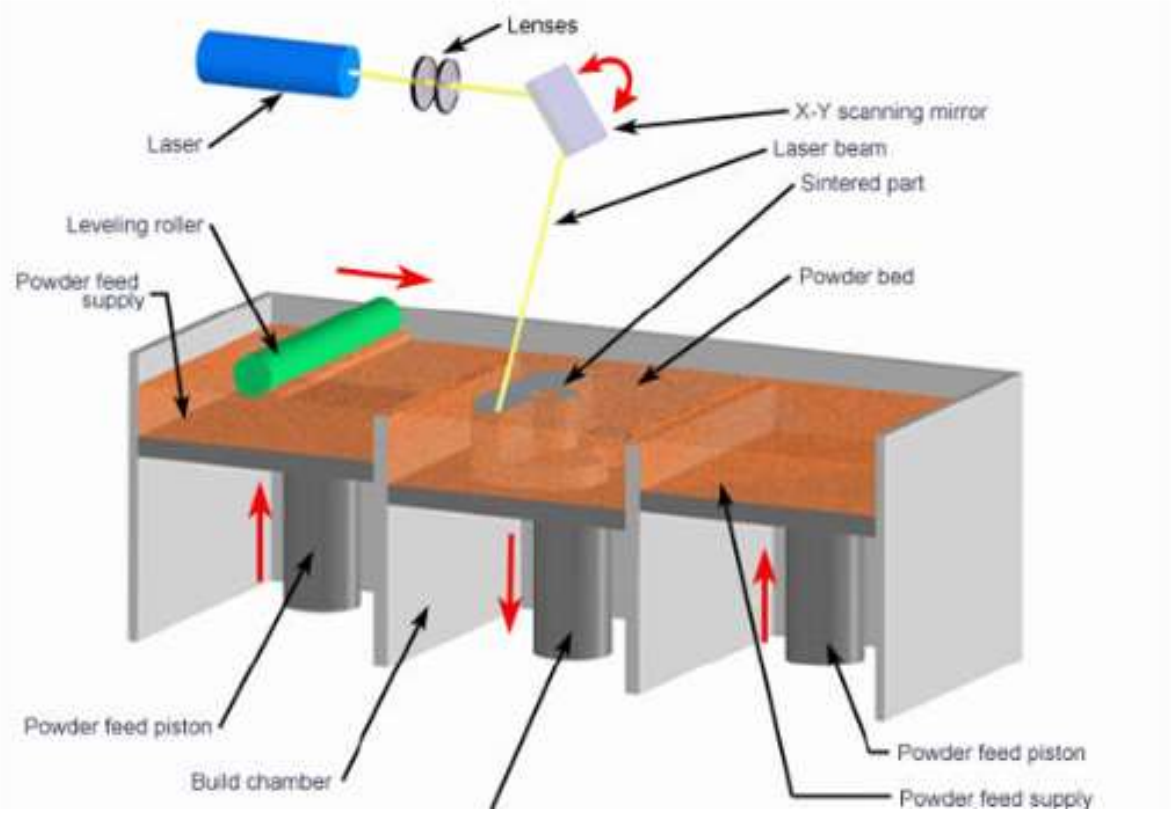


Рисунок 1.3 – Схема роботи 3D принтера методом SLS

Варто зазначити, що залишки порошку можуть бути повторно використані для виготовлення наступних моделей, що підтверджує безвідходність процесу виробництва за технологією SLS. Ця технологія

ідеально підходить для створення прототипів з різною деталізацією, наприклад, ювелірних виробів. Незапечений порошок виконує роль опори для виступаючих частин виробу, завдяки чому немає необхідності в додаткових підтримувальних конструкціях.

MJM (Multi Jet Modeling), Polyjet – метод наплавлення. Технологія базується на затвердінні акрилового фотополімеру під дією ультрафіолетового випромінювання. Рідкий полімер наноситься на друковану платформу за допомогою друкуючої головки. Після цього матеріал швидко освітлюється галогеновою лампою, що забезпечує його затвердіння. Процес повторюється кілька разів для отримання повного виробу. Для підтримки нависаючих елементів використовується побутовий віск, який видаляється нагріванням у печі, не залишаючи слідів. Цей метод дозволяє створювати багатобарвні моделі або об'єкти з різними фізичними властивостями, наприклад, еластичністю і твердістю. Основними недоліками є висока вартість матеріалів і відносна крихкість кінцевих виробів. Застосовується технологія переважно у медицині та промисловому прототипуванні. Схема роботи 3D принтера методом MJM наведена на рис. 1.4.

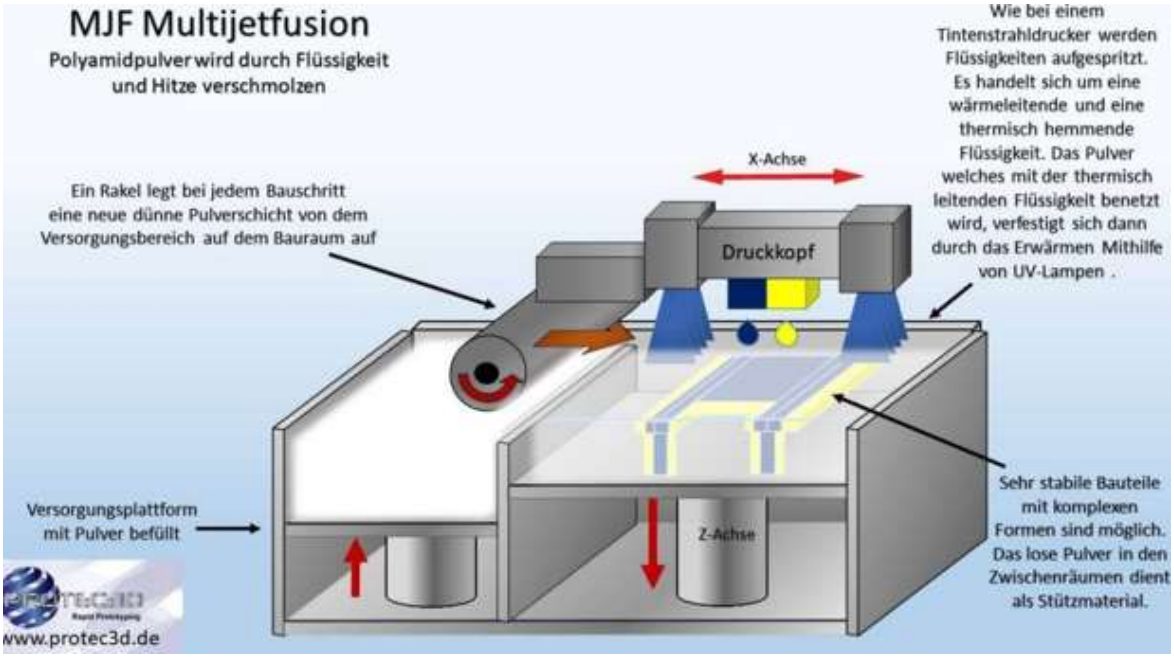


Рисунок 1.4 – Схема роботи 3D принтера методом MJM

DLP (Digital Light Processing) – технологія затвердіння полімеру. Ця методика нагадує MJM, але замість ультрафіолетового спалаху використовується звичайний світловий потік, що забезпечує затвердіння фотополімеру. Полімер додається до кювети у міру витрачання, а друкований апарат закривається для запобігання засвіченню. Підтримка для нависаючих елементів також здійснюється за допомогою воску, який видаляється аналогічно до процесу Polyjet. Схема роботи 3D принтера методом DLP наведена на рис. 1.5.

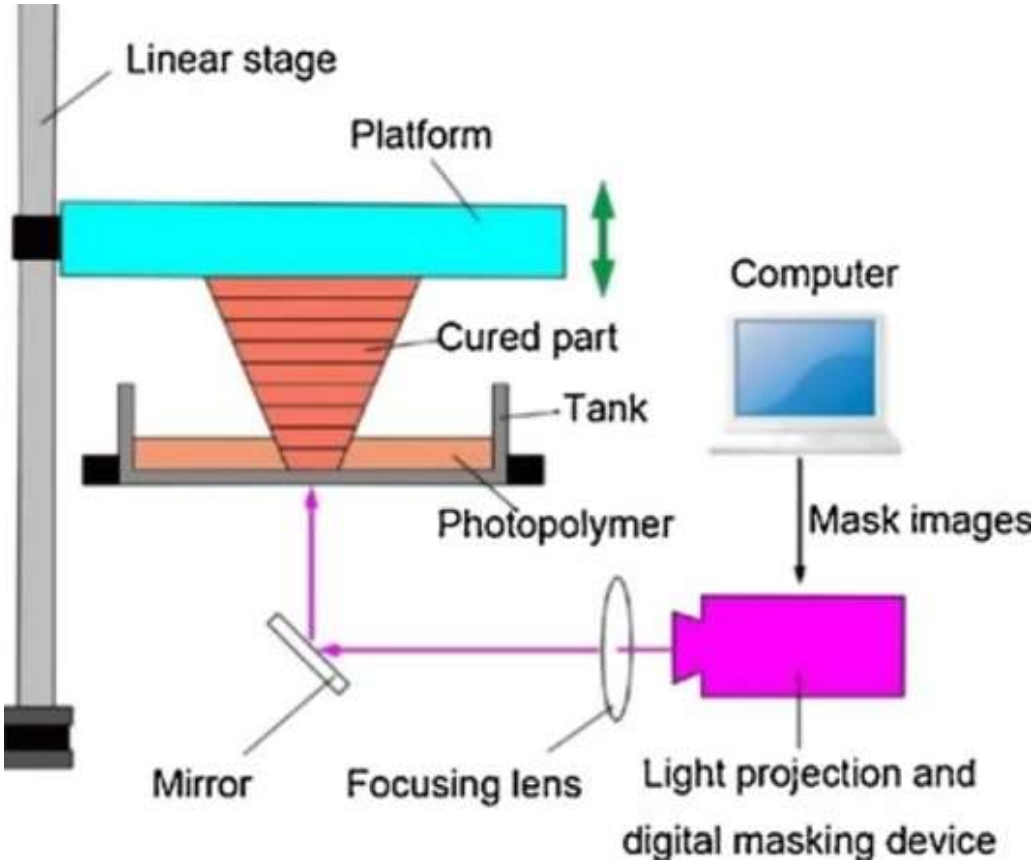


Рисунок 1.5 – Схема роботи 3D принтера методом DLP

FDM (Fused Deposition Modeling) – пошарове укладання полімеру. Технологія є однією з найпопулярніших і належить до струменевих методів друку. Пластикові нитки – філамент плавляться в екструдері та наносяться у вигляді тонкої розплавленої нитки на друковану платформу. Траєкторія

нанесення автоматично формується на основі цифрової 3D-моделі за допомогою спеціального програмного забезпечення, такого як Cura 3D. Моделі, виготовлені таким методом, відрізняються міцністю, доступністю матеріалів і широкою кольоровою палітрою.

Схема роботи 3D принтера методом FDM наведена на рис. 1.6.

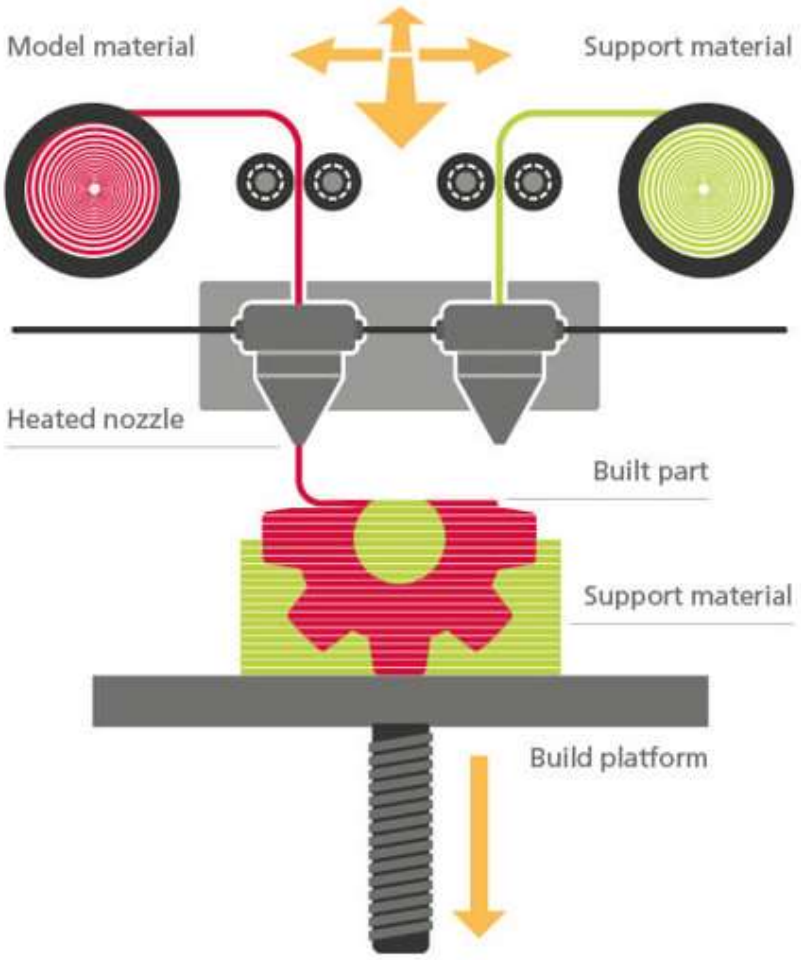


Рисунок 1.6 – Схема роботи 3D принтера методом FDM

Однією з головних переваг цієї технології є можливість виготовлення великих об'єктів за рахунок збільшення розмірів друкованої платформи. Також користувачі мають змогу налаштовувати такі параметри друку, як товщина шару, температура екструдера, швидкість друку, що дозволяє адаптувати процес під конкретні потреби.

Однак, існують і деякі обмеження. Наприклад, поверхня готових виробів може бути трохи шорсткою через видимість окремих шарів, що вимагає додаткового шліфування чи полірування. Також FDM-технологія має труднощі з відтворенням дуже дрібних деталей або складних нависаючих елементів без використання підтримок, які необхідно видаляти після друку.

Завдяки своїй універсальності та низькій собівартості FDM є ідеальним варіантом для створення як простих побутових об'єктів, так і функціональних прототипів у промисловості. Вона продовжує залишатися однією з провідних технологій 3D-друку, а її популярність сприяє постійному вдосконаленню обладнання та програмного забезпечення.

LENS (Laser Engineered Net Shaping) – лазерне спікання порошків. Цей метод передбачає подачу порошкового матеріалу через сопло в область, де він піддається дії лазерного променя, що викликає миттєве спікання. Технологія дозволяє використовувати металеві порошки, такі як сталь або титан, що робить її придатною для промислового виробництва, наприклад, виготовлення турбінних лопатей.

Схема роботи 3D принтера методом LENS наведена на рис. 1.7.

LOM (Laminated Object Manufacturing) – ламінування. LOM-технологія включає вирізання тонких ламінованих листів лазером і склеювання їх у тривимірний об'єкт. Вона дозволяє друкувати з пластику, алюмінію або навіть паперу. Наприклад, алюмінієві об'єкти створюються шляхом спікання фольги ультразвуковою вібрацією. Паперові моделі, незважаючи на легкість матеріалу, мають високу міцність і низьку собівартість. Хоча метод супроводжується значною кількістю відходів, їх можна мінімізувати, розташувавши кілька об'єктів на одному аркуші.

Схема роботи 3D принтера методом LOM наведена на рис. 1.8.

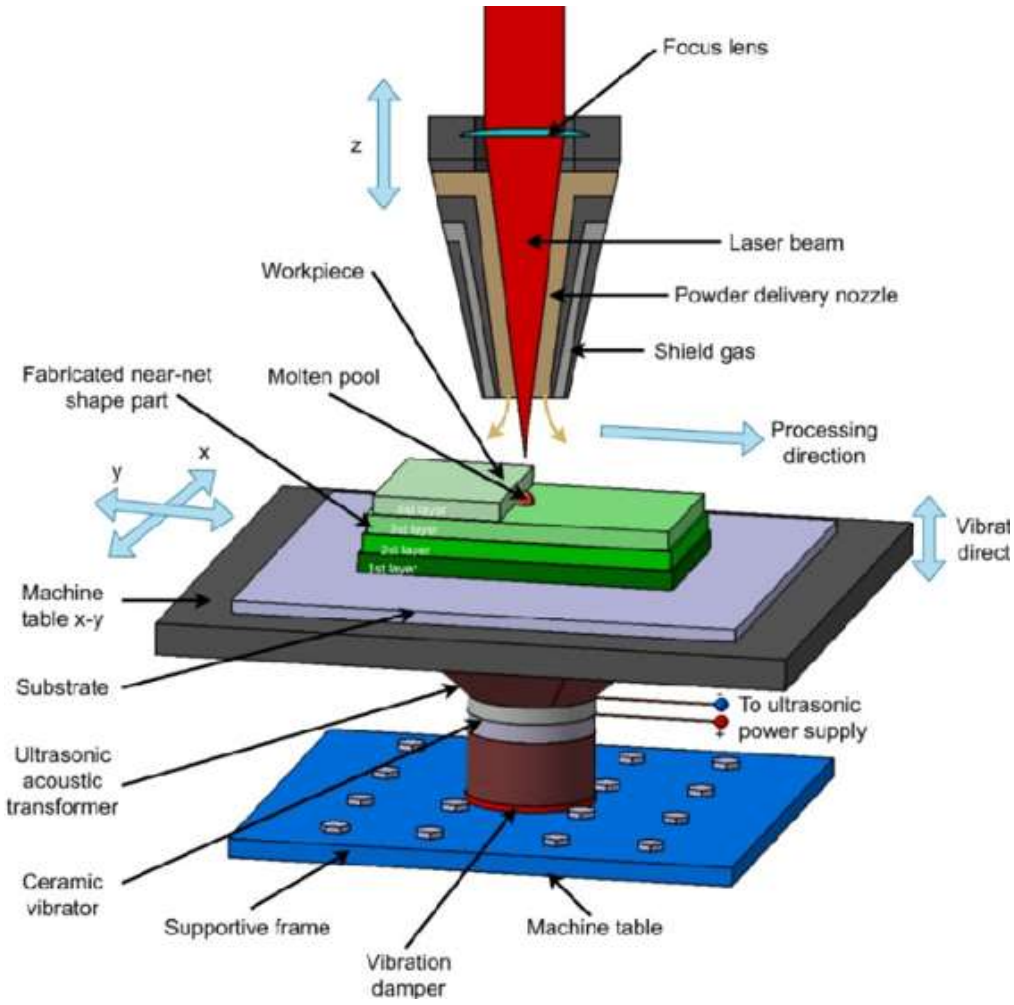


Рисунок 1.7 – Схема роботи 3D принтера методом LENS

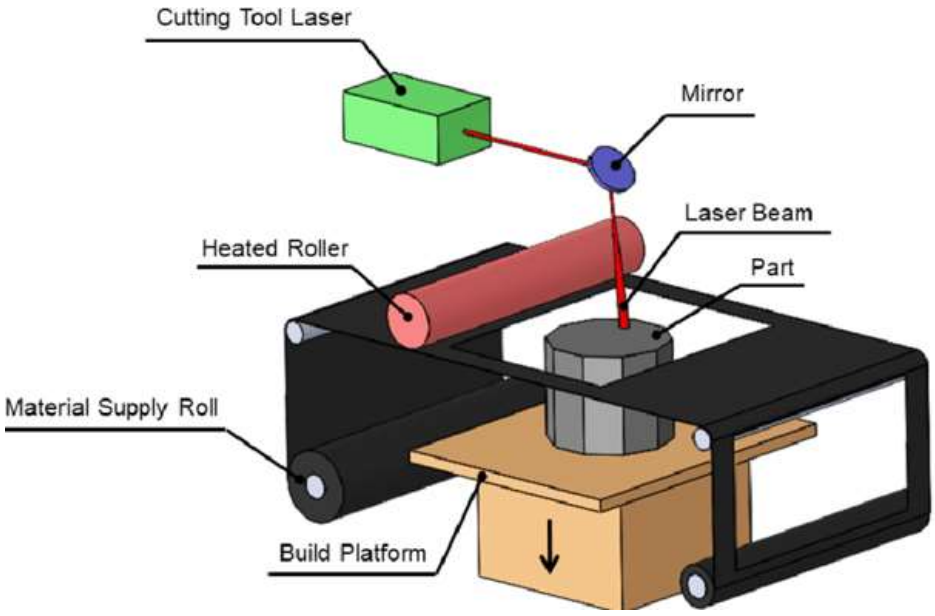


Рисунок 1.8 – Схема роботи 3D принтера методом LOM

1.3 Принципи роботи та сфери застосування 3D-друку

Принципи роботи 3D-друку. 3D-друк, або адитивне виробництво, являє собою процес створення тривимірних об'єктів шляхом поступового нашарування матеріалу за цифровою моделлю. Цей процес відрізняється від традиційних методів виготовлення, де об'єкт вирізається або фрезерується з єдиного блоку матеріалу. Процес 3D-друку складається з кількох етапів:

– моделювання об'єкта: першим кроком є створення цифрової моделі об'єкта за допомогою програмного забезпечення для тривимірного моделювання (наприклад, AutoCAD, SolidWorks або Blender). Модель повинна бути у форматі, який підходить для 3D-друку (наприклад, STL або OBJ).

– розбиття моделі на шари: після створення моделі вона розбивається на тонкі шари за допомогою спеціального програмного забезпечення, званого слайсером. Це дозволяє принтеру точніше та ефективніше будувати об'єкт.

– друк: принтер поступово нашаровує матеріал, зазвичай пластик, метал чи інші матеріали, у вигляді тонких шарів, що дозволяє отримувати кінцеву форму. Процес може тривати від кількох хвилин до кількох днів, залежно від складності та розміру об'єкта.

– завершення: після завершення друку об'єкт може потребувати додаткової обробки, такої як шліфування, полірування або фарбування, щоб досягти бажаної якості поверхні.

Сфери застосування 3D-друку. 3D-друк знаходить своє застосування в численних галузях, завдяки своїй гнучкості та можливості створювати складні об'єкти. Серед основних сфер використання виділяються:

– медицина. Протези та імплантати: 3D-друк дозволяє створювати індивідуально підібрані протези, що ідеально відповідають фізіологічним характеристикам пацієнта. Це значно підвищує комфорт та ефективність протезування.

– медичні моделі: Використовуються для тренувань, планування операцій та виготовлення анатомічних моделей органів, що сприяє покращенню результатів хірургічних втручань.

Аерокосмічна та автомобільна промисловість:

– деталі та компоненти: 3D-друк дозволяє виготовляти складні, легкі, але міцні деталі для літаків та автомобілів, зменшуючи вагу та вартість виробів.

– швидке прототипування: швидке створення прототипів деталей допомагає компаніям тестувати ідеї перед серійним виробництвом.

Будівництво:

– 3D-друк будівель: технологія дозволяє будувати частини будівель або навіть цілі будинки з використанням спеціальних матеріалів, таких як бетон. Це знижує витрати на будівництво та збільшує швидкість виконання робіт.

Мистецтво та дизайн:

– мистецькі об'єкти та ювелірні вироби: Художники та дизайнери використовують 3D-друк для створення складних форм, що неможливо виготовити іншими методами. Технологія дозволяє втілювати найскладніші дизайнерські ідеї.

– індивідуалізовані продукти: 3D-друк використовується для створення персоналізованих товарів, таких як аксесуари, одяг або взуття, які точно відповідають вимогам клієнтів.

Освіта та наука:

– навчальні моделі: використання 3D-друку в навчанні дозволяє створювати наочні моделі, які допомагають студентам краще розуміти складні концепції в таких областях, як біологія, хімія, архітектура та інженерія.

– наукові дослідження: вчені використовують 3D-друк для створення моделей для досліджень, виготовлення інструментів і експериментальних об'єктів.

Торгівля та реклама: рекламні матеріали та виставкові стенди де 3D-друк дозволяє створювати унікальні рекламні продукти та виставкові стенди, які привертають увагу завдяки своїй оригінальності.

– персоналізовані подарунки та сувеніри: ця технологія дозволяє виготовляти персоналізовані подарунки та сувеніри для клієнтів.

Завдяки своїм унікальним властивостям, таким як гнучкість у проєктуванні, здатність створювати складні форми та швидкість прототипування, 3D-друк має великий потенціал у майбутньому для розвитку багатьох галузей. Технологія активно розвивається, і її можливості продовжують розширюватися, зокрема в таких перспективних сферах, як біоінженерія та розширене виробництво.

Основою роботи 3D-друку є цифрова 3D-модель, яка створюється за допомогою програмного забезпечення для проєктування (CAD-програм) або отримується шляхом 3D-сканування. Готова модель розбивається на шари за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке генерує інструкції для 3D-принтера.

3D-друк здійснюється за наступними етапами:

– підготовка моделі – створення чи імпорт цифрової моделі, її оптимізація та нарізання на шари;

– завантаження матеріалу – вибір та підготовка матеріалу для друку пластик, метал, смола тощо.

– процес друку – послідовне нанесення матеріалу шар за шаром для формування кінцевого об'єкта.

– післяобробка – зняття опорних елементів, шліфування, фарбування або додаткова обробка для покращення властивостей виробу.

Залежно від типу принтера і технології, можуть використовуватися різні методи нанесення матеріалу, такі як плавлення, полімеризація, спікання або екструзія.

Переваги 3D-друку: можливість створення складних геометрій; економія матеріалів; швидке виготовлення прототипів; висока ступінь кастомізації.

Обмеження 3D-друку: висока вартість деяких технологій і матеріалів; обмежена міцність виробів залежно від технології; необхідність післяобробки.

2 ВИКОРИСТАННЯ 3D-ПРИНТЕРІВ В РОЗРОБЦІ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

2.1 Сфера використання 3D – принтерів в розробці будівельної продукції

3D-друк (3D-принтинг) – це процес виготовлення фізичних об'єктів за допомогою 3D-моделі, що відповідає певній меті. На відміну від традиційних принтерів, які створюють зображення на папері, 3D-принтери дозволяють формувати тривимірні об'єкти, тобто реальні фізичні моделі.

Сьогодні 3D-принтери активно застосовуються в багатьох галузях виробництва, зокрема у машинобудуванні, створенні макетів, виготовленні елементів інтер'єру та різноманітних деталей. У будівництві, як уже зазначалося, використання 3D-друку вимагає розробки нових технологій, оснащення ефективним обладнанням та створення нормативної документації.

У 2019 році компанія J'son & Partners Consulting завершила аналіз актуального стану та перспектив впровадження 3D-друку в будівництві по всьому світу. 3D-друк в будівництві, або будівельний 3D-друк, відомий також як «адитивне виробництво для будівництва» (3DCP), включає технології, що використовують метод 3D-друку для виготовлення будівель та їх компонентів. Цей процес передбачає послідовне створення об'єктів по шарах за допомогою цифрових 3D-моделей (CAD) з використанням різних матеріалів, зокрема бетону. Це відкриває нові можливості для зміни традиційної архітектури та формування складних геометричних конструкцій.

Прогнозується, що найбільший ріст ринку 3D-друку відбудеться в сегменті житлового будівництва. Основні чинники, що сприяють цьому зростанню, включають попит на доступне житло, яке можна виготовити за

допомогою 3D-друку, а також можливість створювати складні архітектурні форми за низькою ціною.

Наразі для 3D-друку використовуються матеріали, такі як бетон, пластик, метал, кераміка та інші. Ринок 3D-друку можна поділити за видами продукції, такими як стіни, дахи, підлоги, сходи тощо. Стіни з 3D-друку з бетону є одними з основних конструкцій, які виготовляються заздалегідь, як на виробництві, так і на будівельному майданчику.

У 2017 році Європа займала провідну позицію на ринку 3D-друку бетоном за вартісним обсягом. Прогнозується, що в період з 2018 по 2023 рік найбільший ріст на ринку 3D-друку бетоном відбудеться на Близькому Сході, де високі витрати на робочу силу і попит на доступне житло сприяють розвитку цієї технології, що підтримується урядовими ініціативами.

Звіт компанії J'son & Partners Consulting також описує переваги і недоліки використання 3D-друку в будівництві. Зазначено, що типове будівництво за допомогою 3D-друку ще не набуло широкого поширення, а бібліотека готових технічних рішень практично не існує. Оскільки всі надруковані будівлі є унікальними, загальна статистика поки що не сформована. Тому економіка будівництва за допомогою 3D-друку залишатиметься непередбачуваною.

Серед факторів адитивного виробництва є як ефективні, так і витратні аспекти, що робить будівництво з використанням 3D-друку експериментальним процесом, спрямованим на здобуття знань і навичок у цій галузі.

На сьогоднішній день 3D-друк у будівництві застосовується для таких цілей:

– створення архітектурних макетів і моделей;

– виробництво предметів інтер'єру та меблів, малих архітектурних форм;

– виготовлення будівельних елементів, наприклад, друк і укладання цегли, блоків, скла, цифрової деревини, композитів, балок, каркасів;

– виготовлення підлог;

– створення складних фасадів, корпусів для зовнішніх конструкцій;

– друк несучих і не несучих стін, а також лінійних об'єктів;

– друк як великих будівель, так і менш складних споруд;

– класичний 3D-друк металом, пластиком, полімерами, піском;

– друк мостів;

– друк труб при прокладанні тунелів під землею.

Будівельний 3D-принтер зазвичай використовує технологію екструдування, при якій новий шар будівельного матеріалу накладається поверх попереднього. У будівництві використовуються різні технологічні схеми 3D-друку:

– повне друкування будівлі;

– друк окремих конструктивних елементів, а також макетів будівель і елементів ландшафтного дизайну. Використання принтерів для друку окремих елементів дозволяє уникнути сезонності будівництва – частини будівель можуть друкуватися, зберігатися на складі до досягнення потрібної міцності бетону, а потім монтуватися на будівельному майданчику.

Можливе застосування комбінованої схеми 3D-друку, при якій будівлю зводять, а деякі конструктивні елементи виготовляються окремо і транспортуються на будівельний майданчик.

На рис. 2.1 наведене зведення несучої конструкції будинку методом 3D-друку. 3D-друк активно застосовується в будівництві для виготовлення як окремих компонентів, так і цілих будівель. Розглянемо приклади використання цієї технології для друку будівельних елементів та повноцінних споруд. Будинок надрукований на промисловому 3D-принтері наведений на рис. 2.2.

Вільне проєктування та створення унікальних конструкцій: 3D-друк бетоном виходить за межі будівництва будинків, рис. 2.3. Технологія 3D-друку відкриває можливості для виготовлення складних архітектурних форм, реалізація яких за допомогою традиційних методів будівництва є надзвичайно складною або навіть неможливою. До того ж, використання цієї технології дозволяє значно скоротити час виробництва та звести до мінімуму ризик помилок у процесі роботи.

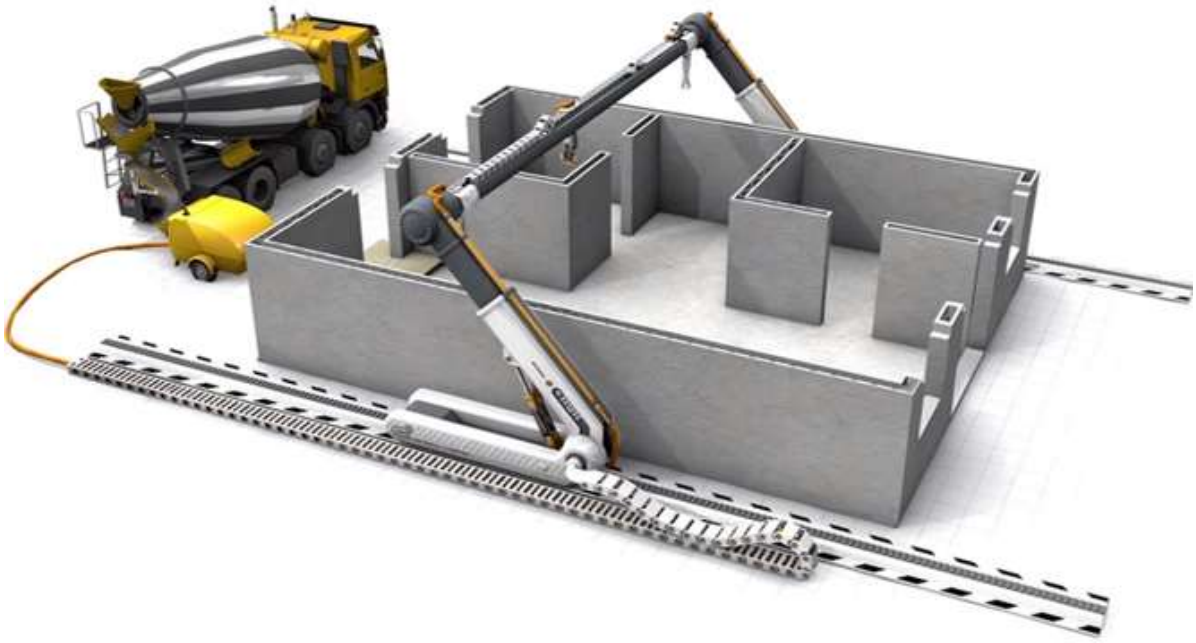


Рисунок 2.1 – Зведення несучої конструкції будинку методом 3D-друк



Рисунок 2.2 – Будинок надрукований на промисловому 3D-принтері

Бетонні стіни, створені за допомогою 3D-друку, характеризуються високою міцністю і надійністю, що гарантує їх довговічність та стійкість до несприятливих погодних умов, таких як сильний вітер, дощ, мороз чи спека. Завдяки особливостям технології 3D-друку, структура таких стін може бути оптимізована для додаткового підвищення механічної міцності та енергоефективності, що робить їх привабливим рішенням для сучасного будівництва [8].

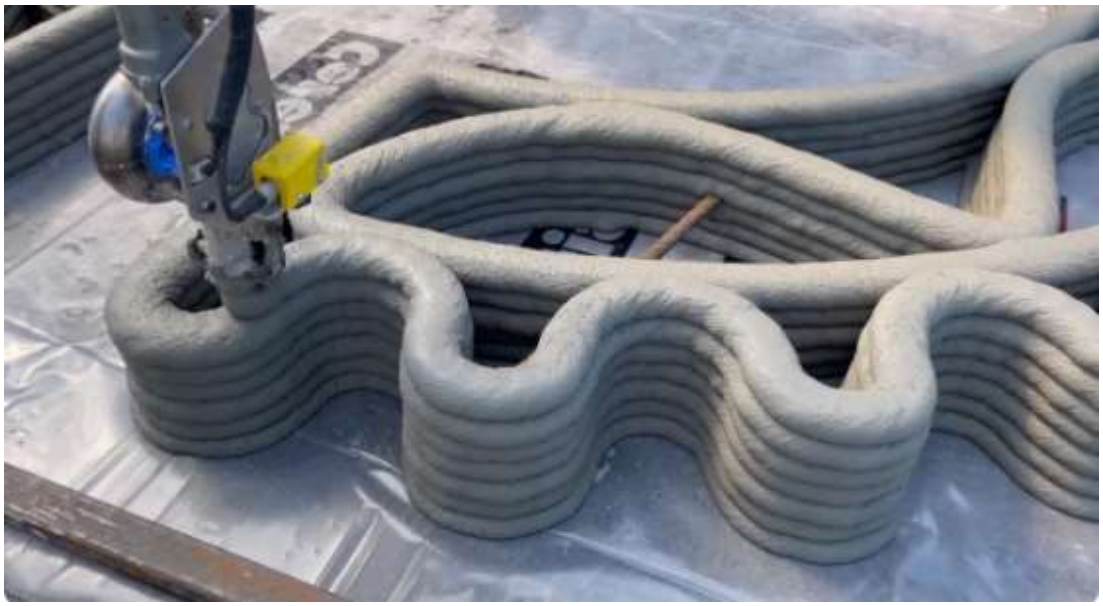


Рисунок 2.3 – 3D-друк бетоном [8]

2.2 Приклади робіт 3D-друку у будівництві

Одним із прикладів є друк панелей для стін і фасадів будівель. Компанія 3D Printed Housing в Нідерландах використовує 3D-друк для виготовлення бетонних панелей, які потім інтегруються в конструкцію будівель. Ці панелі мають складну геометрію та можуть бути адаптовані до конкретних

архітектурних вимог, що дозволяє знижувати витрати на матеріали та зменшувати відходи.

Проєкт житлових будинків у місті Ейндховен, Нідерланди, є яскравим прикладом застосування технології 3D-друку в будівництві. Він складається з п’яти будинків, кожен з яких був надрукований за допомогою 3D-принтера з бетонних матеріалів. Кожна споруда складається з 24 окремих бетонних елементів, які були надруковані по черзі, що зайняло 120 годин. Після завершення друку елементи були доставлені на місце будівництва, де вони були зібрані, прикріплені до фундаменту та оснащені дахом, вікнами і дверима.

Будинки мають футуристичний дизайн, створюючи враження, що вони є частиною природного ландшафту, схожі на скелі, що залишилися в оазисі, оточеному деревами. Такий вигляд підкреслює гармонійне поєднання архітектурної інновації та природного середовища. Крім того, ці будинки відповідають високим вимогам до комфорту, екологічності та енергоефективності. Це житло розташоване в тій частині Ейндховена, де панує тиша та спокій, що робить його ідеальним місцем для відпочинку. Проєкт житлового будинку у місті Ейндховен, Нідерланди, рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Проєкт житлового будинку у місті Ейндховен, Нідерланди

Проєкт, окрім того, є важливим кроком у розвитку сучасного будівництва, показуючи можливості технології 3D-друку для створення не тільки індивідуальних будівельних елементів, але й цілих будівель, що знижує витрати та час, необхідний для зведення.

Ще одним прикладом є створення колон за допомогою 3D-друку, як це робить компанія ICON у США. Вони застосовують технологію для виготовлення бетонних колон, що використовуються в житлових будинках. 3D-друк дозволяє досягти високої точності при зведенні колон, що забезпечує їхню міцність при мінімальних витратах матеріалу.

Проєкт, реалізований компанією ICON у партнерстві з Lennar у Техасі, є одним з перших великих ініціатив, пов'язаних із 3D-друком будинків. У рамках цього проєкту планується створення спільноти з 100 3D-друкованих будинків, і майже чверть з них вже продано, а нові мешканці вже заселяються. Проєкт стартував у листопаді 2022 року і демонструє значні переваги використання 3D-друку в будівництві. Зокрема, будинки можна надрукувати за приблизно три тижні за допомогою принтера Vulcan. Водночас було розроблено вісім варіантів планів поверхів, що дає можливість вибору між різними розмірами та кількістю кімнат.

Попри те, що ціни на такі будинки варіюються від 450 000 до 600 000 доларів, що є на рівні з іншими будинками в цьому районі, відгуки покупців є позитивними. Особливо відзначають чудову теплоізоляцію завдяки товстим бетонним стінам, що дозволяє зберігати прохолоду в середині будинку навіть під час сильної літньої спеки. Проте існують і певні труднощі, зокрема проблеми з Wi-Fi сигналом через бетонні стіни, що вимагає додаткового обладнання для підключення до Інтернету.

У відповідь на виклики, пов'язані з високими витратами на будівництво, ICON запустила конкурс Initiative 99 у 2023 році, спрямований на розробку 3D-друкованих будинків, вартість яких не перевищувала б 99 000 доларів. Цей крок має на меті зробити 3D-друковане житло доступним для більш широкої аудиторії. Незважаючи на те, що технологія 3D-друку в будівництві ще

знаходиться на стадії розвитку, цей проект є важливим кроком вперед у використанні інноваційних методів для створення доступного і енергоефективного житла, рис. 2.5, 2.6.



Рисунок 2.5 – Процес друку несучих конструкцій будівельного проєкту компанії ICON



Рисунок 2.6 – Процес друку несучих конструкцій будівельного проєкту компанії ICON

Технологія 3D-друку в архітектурі розвивається з неймовірною швидкістю, забезпечуючи нові можливості для створення складних геометричних форм. Цей прогрес дозволяє архітекторам досягати безпрецедентного рівня художньої свободи, зокрема в проектуванні текстурованих фасадів і декоративних елементів. Завдяки високій роздільній здатності 3D-принтерів та швидким виробничим можливостям, архітектори можуть реалізувати навіть найскладніші елементи без додаткових витрат на традиційні методи виробництва. Загальний вид фасаду одноповерхової будівлі побудованої за допомогою 3D-принтеру наведений на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Загальний вид фасаду одноповерхової будівлі побудованої за допомогою 3D-принтеру

Проєктування з використанням 3D-друку дозволяє створювати не тільки прототипи, а й завершені архітектурні об’єкти. Студія RAP з Амстердама, наприклад, успішно реалізувала проект бутик-магазину "Ceramic House", для якого були надруковані індивідуальні керамічні плитки, що використовують алгоритмічно згенеровану геометрію, натхненну традиційним мистецтвом

ткацтва, рис. 2.8. Такі інноваційні підходи дозволяють створювати унікальні дизайнерські рішення, що відповідають вимогам сучасної архітектури.



Рисунок 2.8 – Загальний вид фасаду бутик-магазину "Ceramic House"



Рисунок 2.9 – Процес 3D-друку архітектурних об’єктів для фасаду бутик-магазину "Ceramic House"

У межах співпраці з фестивалем Origen у Ріомі, Швейцарія, команда ETH Zürich створила дев’ять бетонних колон, кожна з яких була надрукована на 3D-принтері на повну висоту за 2,5 години. Ці колони стали частиною проекту «Бетонна хореографія» і стали яскравим прикладом використання технологій 3D-друку в архітектурі. Кожен елемент мав унікальний дизайн, розроблений студентами магістратури з цифрового виробництва та архітектури, які досліджують можливості багатошарового екструзійного друку для створення складних геометрій.

Процес виготовлення, розроблений ETH Zürich, дозволяє друкувати бетонні конструкції без традиційної опалубки, що робить виробництво більш економічним. Завдяки цьому технологічному підходу використовується мінімум матеріалів, що необхідні для забезпечення міцності колон. Бетонні колони створені командою ETH Zürich наведені на рис. 2.10.



Рисунок 2.10 – Бетонні колони створені командою ETH Zürich

Висота кожної колони складає 2,7 метра, а їх конструкції мають складну геометрію, що підкреслює потенціал обчислювального проектування та цифрового виробництва в майбутньому бетонному будівництві. Порожнисті елементи були армовані сталевими конструкціями та заповнені бетоном після завершення процесу друку.

Цей проект демонструє, як 3D-друк може приносити нові ефективні та виразні можливості для бетонної архітектури, дозволяючи створювати унікальні декоративні елементи, що інтегрують технології та мистецтво.

Також, студенти ETH Zurich створили складні металеві архітектурні конструкції за допомогою 3D-друкованих форм у рамках проекту "Deep Façade". Ця інноваційна конструкція, висотою 3,5 метра, виготовлена з алюмінію і демонструє потенціал використання 3D-друку для створення індивідуальних, доступних металевих елементів для архітектури. Проект був розроблений студентами курсу Digital Fabrication і став важливим етапом у дослідженні способів створення складних геометричних форм, яких неможливо досягти традиційними методами.

Один з основних аспектів цього проекту полягає в тому, що 3D-друк значно знижує витрати на виготовлення форм для лиття металу, що зазвичай є складним і дорогим процесом. За допомогою 3D-друку можна створювати складні форми з піску, в які потім традиційним способом заливають розплавлений метал. Хоча теоретично можливе 3D-друкування металу для виготовлення таких конструкцій, цей процес наразі є дорогим і обмеженим щодо вибору металів.

Фасад складається з 26 панелей, кожна з яких виконана за алгоритмом диференційованого росту, що імітує природний розвиток живого організму. Цей проект продовжує дослідження можливостей інтеграції технологій 3D-друку у сучасну архітектуру, відкриваючи нові горизонти для створення унікальних та функціональних елементів фасадів.

Металеві архітектурні конструкції надруковані за допомогою 3D форм наведені на рис. 2.11, 2.12.



Рисунок 2.11 – Металеві архітектурні конструкції надруковані за допомогою 3D форм



Рисунок 2.12 – Металеві архітектурні конструкції надруковані за допомогою 3D форм

Компанія MX3D з Нідерландів розробила перший у світі міст, що виготовлений за допомогою 3D-друку, який був офіційно відкритий 15 липня в Амстердамі. Цей пішохідний міст, довжиною 12,2 метра та вагою 6 т, став заміною для старої конструкції, що нині на реставрації. Проект, який тривав понад чотири роки, передбачав використання роботів із штучним інтелектом, адаптованих до функцій промислових 3D-принтерів, що дозволяє виготовляти сталеві конструкції, рис. 2.13.

Особливістю цього моста є використання сталі, виготовленої через 3D-друк, що вимагає нових методів розрахунку і досліджень. Ця інновація стала основою для встановлення нових стандартів у галузі 3D-друку металів і створення більш ефективних і гнучких конструкцій.

Міст також оснащений датчиками для моніторингу безпеки, навантаження та трафіку, що дозволяє контролювати рівень завантаження району. Перед встановленням конструкція була протестована провідними університетами, що підтвердило її надійність і стабільність.



Рисунок 2.13 – Загальний вид мосту компанії MX3D

Цей проєкт не лише демонструє передові технології в будівництві, але й відкриває нові можливості для використання 3D-друку в створенні складних і функціональних архітектурних елементів.



Рисунок 2.14 – Процес монтажу мостової споруди компанії MX3D

Будівля офісу, надрукована на 3D-принтері в Дубаї, є першою в світі такою будівлею і була завершена всього за 17 днів. Офіс займає 2 700 квадратних футів і демонструє, як 3D-друк може прискорити процес будівництва. Цей проект є яскравим прикладом того, як технологія 3D-друку може бути використана для великих і ефективних будівельних проектів. Для його створення була використана спеціально розроблена цементна суміш, а сам процес будівництва здійснювався за допомогою модульного 3D-принтера. Це дозволило значно знизити витрати та скоротити час на виконання проекту.

Цей офіс не лише функціональний, а й демонструє естетичні можливості 3D-друку завдяки вигнутим поверхням, що створюють враження елегантності та сучасності. Проєкт став частиною більш широкої стратегії Дубаю щодо

розвитку технологій 3D-друку, з метою стати світовим лідером у цій сфері до 2030 року. Процес будівництва об’єкту у Дубаї за допомогою 3D-принтеру представлений на рис. 2.15. Фасад офісної споруди надрукованої на 3D-принтері в Дубаї представлений на рис. 2.16.



Рисунок 2.15 – Процес будівництва об’єкту у Дубаї за допомогою 3D-принтеру



Рисунок 2.16 – Фасад офісної споруди надрукованої на 3D-принтері в Дубаї

Челлендж NASA для створення житлових модулів на Марсі є амбітним проєктом, що вивчає можливості використання 3D-друку для проєктування сталих житлових структур для майбутніх місій на Марс.

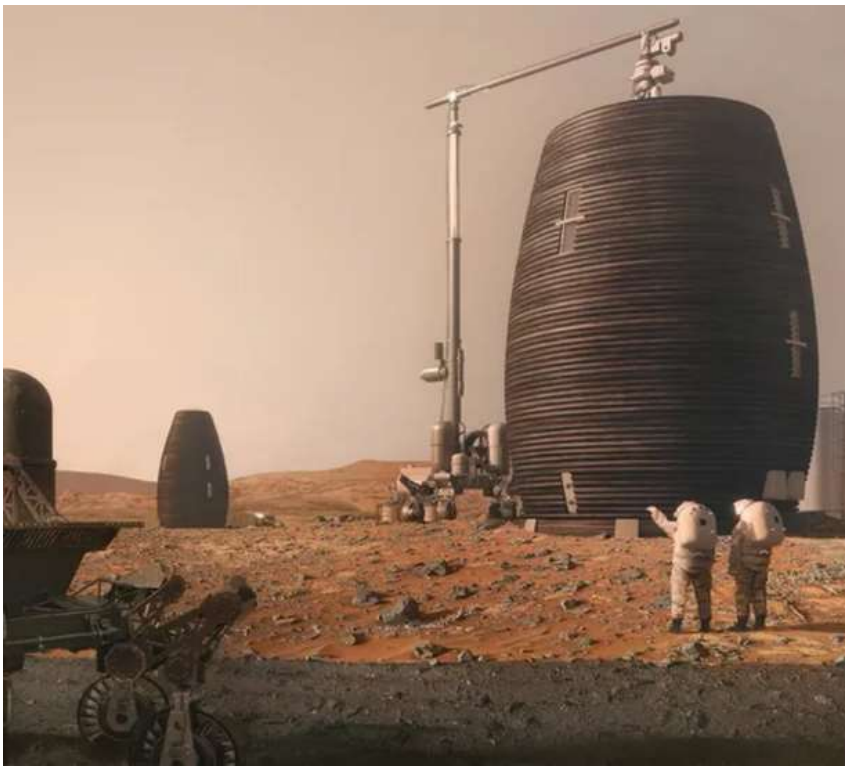


Рисунок 2.17 – Процес будівництва об’єкту на Марсі за допомогою 3D-принтеру



Рисунок 2.18 – Загальний вид зсередини

Цей конкурс закликає команди створювати інноваційні, автономні проєкти, які можна буде побудувати за допомогою місцевих матеріалів з Марса. Житлові модулі повинні підтримувати довгострокове перебування людей на планеті, а також просувати технології 3D-друку.

Переможцем конкурсу став проєкт Marsha, розроблений командою AI SpaceFactory. Ця конструкція призначена для автономного друку за допомогою передових технологій 3D-друку. Для її виготовлення використовується суміш біопластиків та базальту, матеріалу, що є у великій кількості на Марсі, що робить проєкт більш стійким. Marsha підкреслює потенціал використання природних, місцевих матеріалів для будівництва, зменшуючи залежність від ресурсів, що доставляються з Землі.

Цей конкурс став важливим етапом у розвитку технологій 3D-друку, які можуть знайти застосування і на Землі, зокрема для будівництва житла в районах, постраждалих від стихійних лих, або для вирішення глобальної житлової кризи. NASA зазначає, що ці технології можуть кардинально змінити як космічні місії, так і будівництво на Землі.

На шляху до вдосконалення технології виникають нові питання про естетику, мистецтво та орнамент в архітектурі. Зараз, коли можливості для створення складних геометрій відкривають нові горизонти для творчості, архітектори отримують більше можливостей для експериментів, що дозволяє поєднувати функціональність і художній вираз в одній архітектурній концепції. 3D-друк надає архітекторам простір для інновацій і дозволяє привнести нові текстури та елементи в міське середовище.

Один з прикладів – компанія Liscio, яка активно застосовує 3D-друк для виготовлення складних фасадних елементів із композитних матеріалів. Це дозволяє зменшити витрати на виробництво, а також створювати деталі з унікальними, складними формами без значних додаткових витрат на матеріали. Така технологія забезпечує значну гнучкість у дизайні, дозволяючи створювати індивідуальні фасади, що відповідатимуть специфічним вимогам проєкту. Декоративні елементи фасаду виготовлені компанією Liscio наведені

на рис. 2.19. Процес друку на 3D-принтері декоративних елементів фасаду наведений на рис. 2.20.



Рисунок 2.19 – Декоративні елементи фасаду виготовлені компанією Liscio

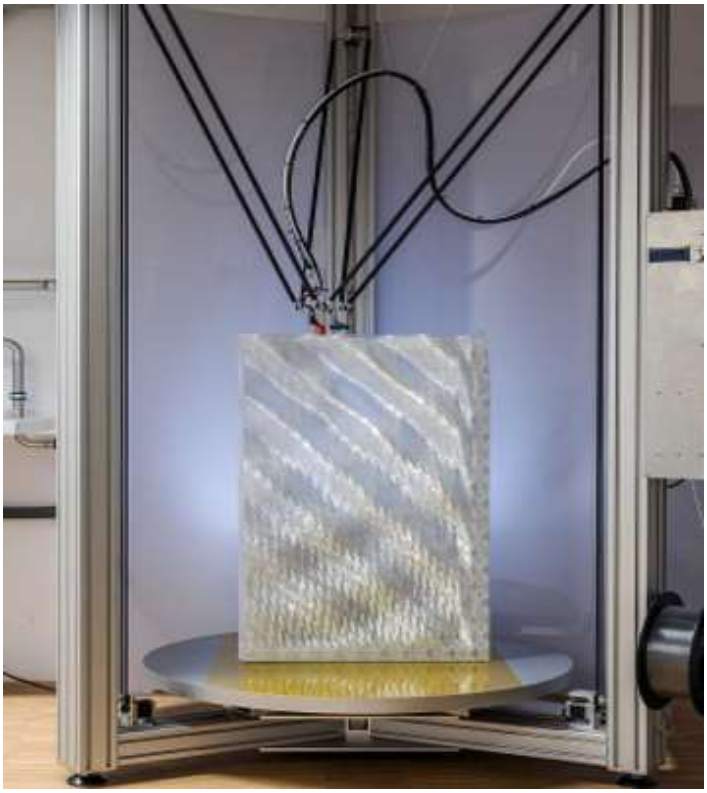


Рисунок 2.20 – Процес друку на 3D-принтері декоративних елементів фасаду

Цей підхід відкриває нові можливості для створення естетичних і функціональних архітектурних елементів, що поєднують інновації та стійкість, адже використані матеріали можуть бути відновлені або перероблені для подальшого використання.

2.3 Особливості технології обладнання для 3D-друку будівель, споруд та конструктивних елементів

3D-принтери мають різні розміри та вагу. Наприклад, принтер розміром 12 х12 метрів, що використовується для друку елементів будівель і ландшафтного дизайну висотою до 3 метрів, є великогабаритною 120-тонною конструкцією, рис. 2.21.



Рисунок 2.21 – Будівельний принтер формату 4,1 х 2,5 метрів

Для виготовлення окремих конструкцій у закритих приміщеннях застосовуються компактні принтери з об'ємом накопичувача головки від 18 до 32 літрів. На цьому етапі конструкції принтерів дозволяють створювати малоповерхові будівлі різних форм з використанням різноманітних будівельних сумішей, а також друкувати будівельні конструкції та вироби.

Нещодавно були розроблені 3D-принтери, які за допомогою бетононасосів подають суміш до екструдера, що значно підвищує ефективність друку виробів, рис. 2.22.

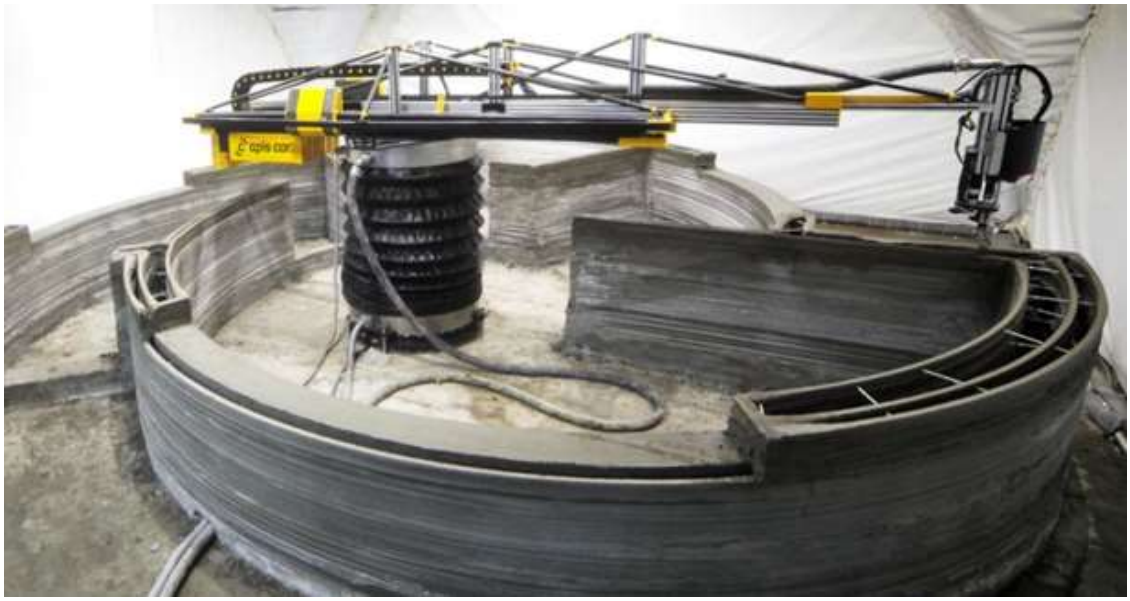


Рисунок 2.22 – Будівельні принтер з технологією подавання суміші в екструдер за допомогою бетононасосіїв

Одним із перспективних напрямків розвитку 3D-принтерів є створення мобільних моделей, які можуть бути оснащені ходовою частиною або транспортуватися за допомогою транспортних засобів, рис. 2.23. Це дозволяє безпосередньо доставляти обладнання на будівельний майданчик, що знижує витрати на транспортування матеріалів.

Перед початком будівництва важливо провести моделювання майбутньої споруди та оптимізувати технологію друку за допомогою малогабаритних принтерів, що використовують реальні будівельні суміші. Це дозволяє

перевірити правильність обраних архітектурних та конструктивних рішень. Для виготовлення моделей застосовують суміші на основі гіпсу, а для конструкцій, що будуть експлуатуватися на відкритому повітрі, використовують цементні суміші. Такий підхід дозволяє відпрацювати процеси армування, встановлення каркасів у стіни та прокладання комунікацій. Надруковані зразки зручно використовувати для лабораторних досліджень та тестувань.

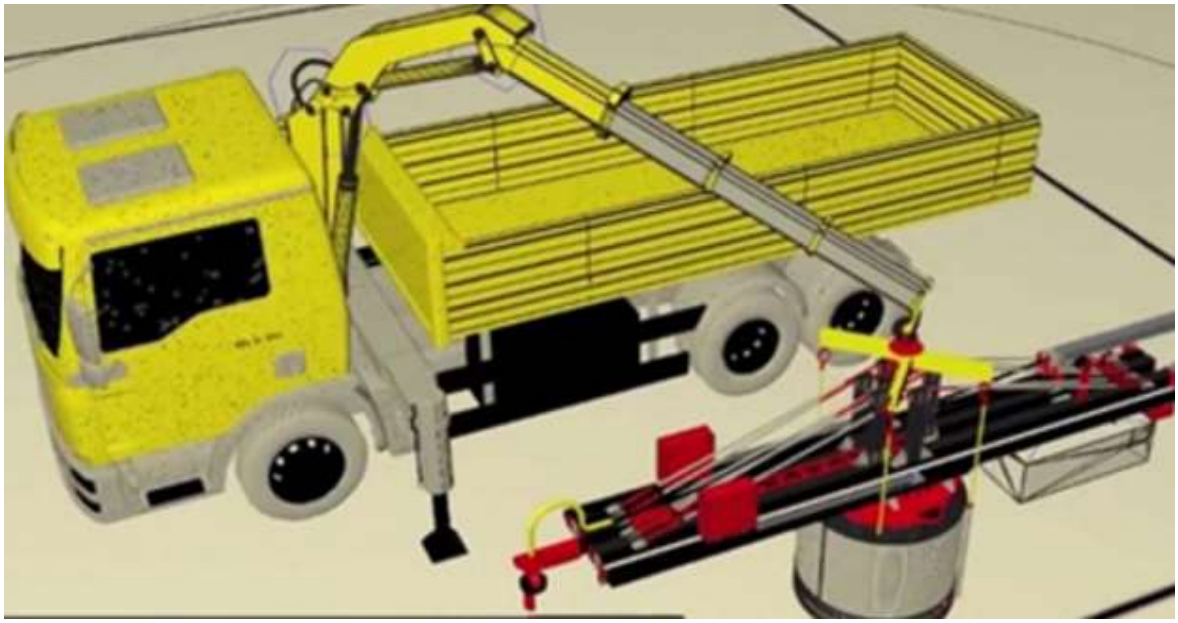


Рисунок 2.23 – Транспортування будівельного 3D-принтеру

Застосування кількох узгоджених 3D-принтерів дозволяє виготовляти будівлі та споруди, площа яких може варіюватися від кількох сотень до десятків тисяч квадратних метрів. Для будівництва високих будівель планується використовувати принтери, які піднімаються разом із будівельним процесом. Крім друку, ці пристрої з додатковими модулями виконують монтаж конструктивних елементів, таких як перемички і перекриття. Принтери обладнані маніпуляторами та захватами, які здійснюють монтаж на конструкціях, що переміщуються вздовж об'єкта. Схема використання двох 3D-принтерів наведена на рис. 2.24.

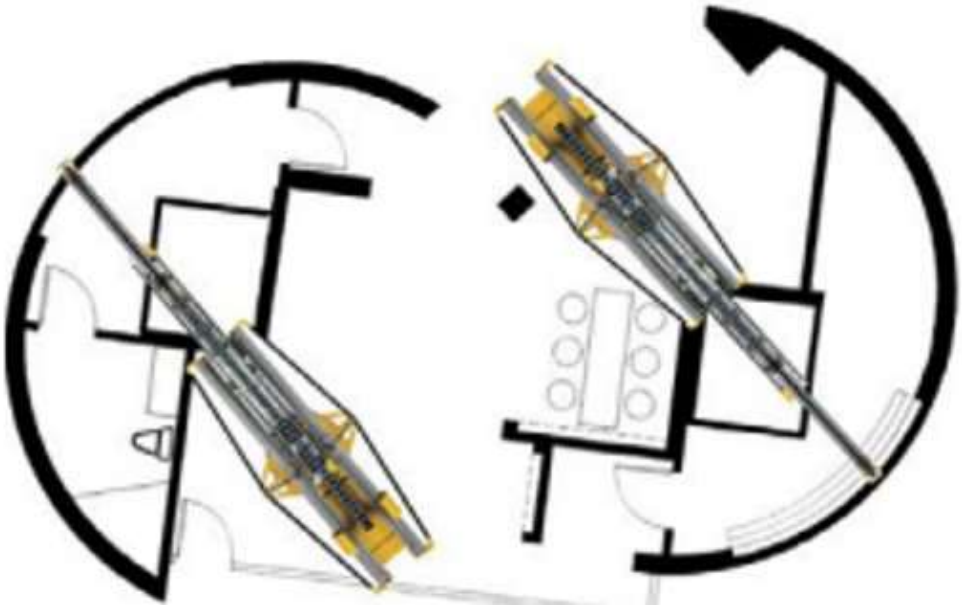


Рисунок 2.24 – Схема використання двох 3D-принтерів

Для 3D-друку будівельних конструкцій використовуються суміші на основі бетону чи розчину, а для підвищення їхньої міцності та зменшення витрат доцільно використовувати вторинні кам’яні матеріали, зокрема уламки бетонних конструкцій, цегли, шлаку і бута. Ці матеріали змішуються з розчином або бетоном для досягнення необхідних властивостей. Процес полягає в укладанні кам’яних матеріалів між шарами суміші, що дозволяє ефективно їх інтегрувати.

Для здійснення цієї технології розроблено спеціальне обладнання, яке включає рухому металеву конструкцію з опорами, мостом, візком, балкою, платформою, маніпулятором, телескопічним механізмом і головкою для друку. Обладнання обладнане автоматизованою системою керування для точного подавання будівельних сумішей.

Це обладнання включає конвеєри для подачі кам’яних матеріалів, дробарку для подрібнення каменю, змішувач для приготування суміші, а також насос для подачі готової суміші до маніпулятора. Система має кілька екструдерів, що дозволяють по черзі подавати різні матеріали, забезпечуючи міцність конструкції.

Наявність дробарки і змішувача дозволяє підготувати кам’яні матеріали до необхідного розміру, а телескопічний механізм і гусеничні візки забезпечують ефективне переміщення та маневрування під час процесу друку. Така технологія дозволяє підвищити міцність і зменшити витрати на будівництво, рис. 2.25.

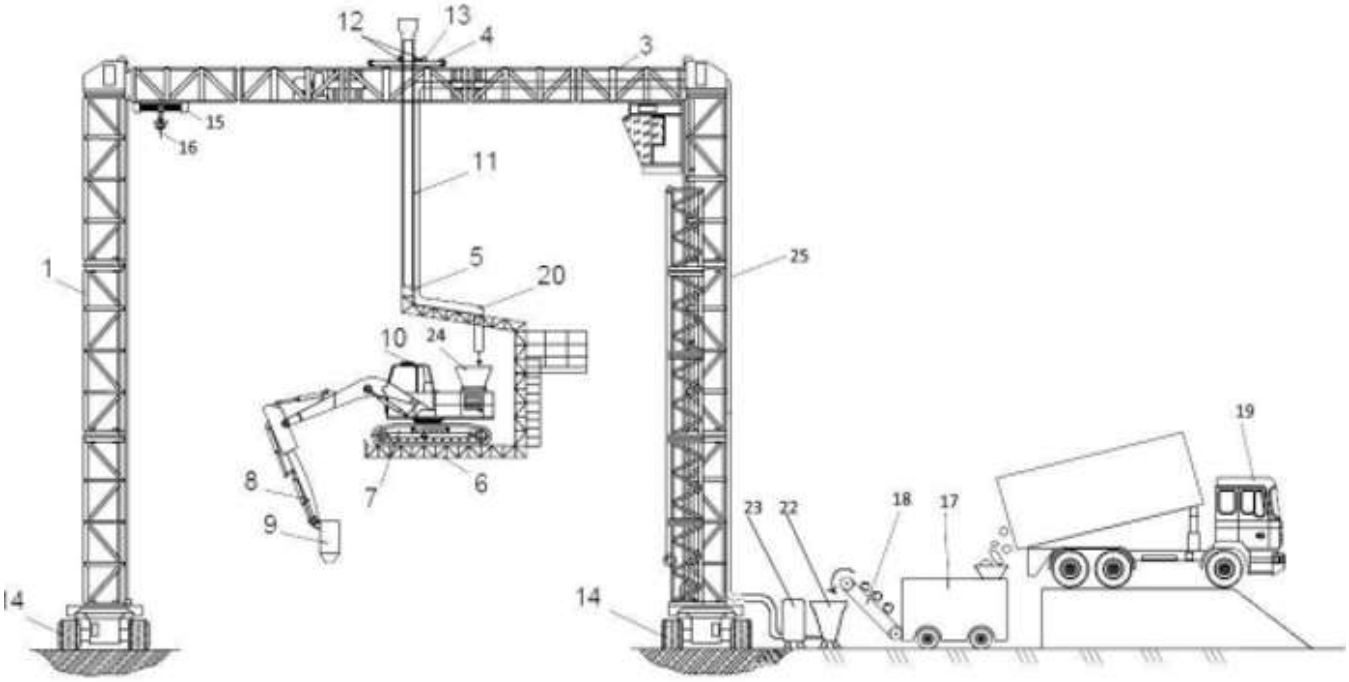


Рисунок 2.25 – Технологія друку із закріпленням 3D-принтера на підвісних опорах

Отже, технологія 3D-друку будівель, споруд та конструктивних елементів є інноваційним напрямом у будівельній галузі, що дозволяє значно знизити витрати на матеріали та робочу силу, скоротити час на зведення об'єктів і забезпечити високу точність виготовлення складних форм. Розвиток обладнання для 3D-друку відкриває нові можливості для створення індивідуальних та функціональних архітектурних рішень, враховуючи вимоги до інклюзивності та екологічної сталості. Врахування технологічних аспектів, таких як вибір матеріалів, параметри друку та специфікація обладнання, є ключовими для успішної реалізації проектів в умовах швидкозмінного ринку будівництва.

2.4 Матеріали для 3D друку в будівництві

Пісок є давно відомим матеріалом у будівництві, що застосовується для виготовлення різноманітних будівельних конструкцій. Його використання для 3D-друку в будівництві також мало досвід на ранніх етапах розвитку цієї технології, зокрема компанією D-Shape. Процес 3D-друку з піску включає створення 3D-моделі об'єкта в програмному забезпеченні CAD, яку потім передають на принтер. Для друку використовують шар піску товщиною від 5 до 10 мм, змішаний з оксидом магнію (MgO), після чого головка принтера наносить неорганічний зв’язуючий розчин, зазвичай на основі хлориду магнію. Ця хімічна реакція утворює матеріал, схожий на пісчаник, що твердіє протягом 24 годин.

Процес друку з піску є відносно дешевим, і в окремих випадках створення великих конструкцій може коштувати лише кілька десятків фунтів. Однак, хоча процес виготовлення структур є недорогим, питання міцності та придатності таких конструкцій для будівництва залишаються відкритими. Деякі дослідники, зокрема творець D-Shape, пропонують використання спеціального ущільнювача, що перетворює пісок на матеріал з міцністю, вищою за звичайний портландцемент. Однак наукові підтвердження цих заяв поки що обмежені.

Процес виготовлення 3D-друкованих пісчаних конструкцій також досить повільний. Наприклад, створення навіть невеликої скульптури може зайняти кілька тижнів, оскільки процес потребує ретельної обробки вручну після друку. Крім того, розробка принтера для пісчаних конструкцій може бути дорогим варіантом, особливо з урахуванням необхідності інтеграції його в ринок масового виробництва.

Хоча пісок як матеріал для 3D-друку має певні переваги, такі як доступність і дешевизна, він не став популярним для будівництва великих, довговічних об'єктів. Сумніви щодо міцності таких конструкцій, а також обмеження

швидкості друку і необхідність спеціалізованих пристроїв для їх виготовлення, обмежують перспективи його застосування в масштабах масового житлового будівництва. Тому, незважаючи на перспективність цього матеріалу в окремих випадках, він не є ідеальним вибором для великих будівельних проєктів.

Метал не є оптимальним матеріалом для 3D-друку в будівництві через низку обмежень, як конструктивного, так і технологічного характеру. Основний метод друку металів передбачає використання металевого порошку, який є дуже дорогим і вимагає складного та тривалого процесу. Цей процес містить численні етапи, що займають багато часу, тому він не є практичним для виготовлення великих конструкцій, таких як будинки. Наприклад, виготовлення навіть невеликої металевої деталі може обійтися в значну суму, а для друку цілого будинку витрати на порошок будуть надзвичайно високими, що зробить проект значно дорожчим, ніж використання традиційних методів будівництва.

Що стосується конструкцій, то металеві будинки мають іще кілька суттєвих недоліків. Одним із них є ризик корозії, особливо коли метал піддається впливу вологи, що призводить до зниження надійності і довговічності конструкцій. Вартість виготовлення металевих елементів та складність будівництва з таких матеріалів також є значними, що ще більше ускладнює їх використання в будівельному 3D-друці. Саме тому метал не буде використовуватися в якості основного матеріалу для будівництва великих об'єктів за допомогою 3D-друку.

Бетон є основним матеріалом для 3D-друку, оскільки він широко використовується в будівництві і має достатньо розвинених технологій для його застосування. Використання бетону залежить від способу його друку великими 3D-принтерами. На сьогоднішній день існують дослідження і розробки в цій галузі, зокрема в Університеті Лафборо (Великобританія). Найбільш підходящим методом для 3D-друку є так звана "контурна обробка".

Домішки. Домішки є додатковими компонентами, які змішуються з цементом, водою і агрегатами, і використовуються для зміни властивостей бетонної суміші. Вони можуть впливати на час твердіння, міцність, здатність

до будівництва, покращення роботи насоса, температуру твердіння та навіть колір бетону.

Прискорювачі. Існує два типи прискорювачів:

– прискорювачі умов твердіння. Ці добавки прискорюють процес твердіння завдяки створенню певних умов, таких як паровий прогрів при атмосферному чи підвищеному тиску, або електричний прогрів.

– прискорювачі твердіння. Це хімічні добавки, які підвищують швидкість набуття міцності бетону без необхідності прогрівання. Вони включають речовини на основі кислот або сильних основ, що вибірково впливають на гідратацію в'яжучих компонентів. Прискорювачі поділяються на хлорвмісні (наприклад, хлорид кальцію) та безхлоридні (наприклад, алюмінат натрію). Важливо зазначити, що використання хлорвмісних добавок у залізобетоні обмежено, оскільки хлор може викликати корозію сталі.

Сповільнювачі. Ці добавки використовуються для затримки твердіння бетонної суміші. Вони уповільнюють реакції гідратації в результаті утворення захисних оболонок на частках цементу, що дозволяє контролювати час твердіння. Сповільнювачі особливо корисні при високих температурах або при транспортуванні бетону на великі відстані.

Суперпластифікатори. Ці домішки дозволяють зменшити кількість води в суміші без зміни її пластичності, що є важливим для процесу 3D-друку. Використання суперпластифікаторів дозволяє знижувати водоцементне співвідношення, що забезпечує швидший процес підготовки суміші і зменшує час друку.

Використання домішок дозволяє модифікувати властивості бетону, що робить його більш придатним для 3D-друку. Це включає сповільнювачі, суперпластифікатори, а також добавки, що поліпшують міцність, стійкість до корозії та інші властивості.

Перероблені матеріали. Використання перероблених матеріалів у будівництві, зокрема для 3D-друку, стає важливим напрямом сталого розвитку в індустрії. Заміна традиційних будівельних матеріалів, таких як бетон і

пластик, на вторинні матеріали допомагає зменшити обсяг відходів і екологічний слід будівництва. Під час будівництва багато матеріалів, що зазвичай потрапляють на сміттєзвалища, можуть бути ефективно перероблені й інтегровані у нові конструкції, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Наприклад, пластик є одним із найбільш поширених матеріалів для переробки в будівництві. Великі обсяги пластикових відходів, таких як пластикові пляшки або пакувальні матеріали, можуть бути перероблені для створення нових будівельних продуктів, таких як елементи для 3D-друку. Перероблений пластик може використовуватися для виготовлення стінових панелей, плитки або навіть елементів інтер'єру. Завдяки своїй легкості, міцності та стійкості до вологи, перероблений пластик має великий потенціал для використання в будівельних конструкціях.

Також популярним матеріалом є перероблений бетон, який може бути використаний для 3D-друку. Старий бетон, що залишається після демонтажу будівель, можна подрібнити та повторно використати для виготовлення нових конструкцій. Цей процес допомагає зменшити витрати на новий матеріал і знижує викиди вуглецю, пов'язані з виробництвом цементу. Використання переробленого бетону також дає змогу створювати більш стійкі та зносостійкі конструкції, знижуючи загальний вплив будівництва на навколишнє середовище.

Один із важливих аспектів використання перероблених матеріалів у 3D-друці – це їх здатність знижувати залежність від природних ресурсів. Наприклад, перероблені пластики та бетон зменшують потребу у видобутку нових матеріалів, таких як пісок або нафта. Це не лише сприяє збереженню екологічного балансу, але й робить процес будівництва більш економічним і доступним.

Водночас, такі матеріали можуть мати додаткові переваги в порівнянні з традиційними. Наприклад, перероблені пластикові компоненти можуть мати кращі теплоізоляційні властивості, що робить будівлі більш

енергоефективними. Перероблений бетон, у свою чергу, може мати вищу стійкість до механічних навантажень і довший термін служби, якщо правильно підібрати суміш.

Перероблені матеріали також можуть бути використані в більш складних конструкціях завдяки технологіям 3D-друку. За допомогою цієї технології можна створювати геометрично складні форми, що важко досягти традиційними методами. Технології 3D-друку дозволяють виготовляти елементи конструкцій з перероблених матеріалів з високою точністю та ефективністю, що знижує кількість відходів і оптимізує процеси виробництва.

Таким чином, використання перероблених матеріалів для 3D-друку в будівництві відкриває нові можливості для розвитку більш сталого, економічного та екологічно чистого будівництва. Це не лише дозволяє зменшити обсяг відходів і забруднення, а й сприяє збереженню природних ресурсів, зменшенню витрат на нові матеріали та поліпшенню якості будівельних конструкцій.

Біоматеріали в 3D-друці для будівництва є однією з найбільш перспективних і екологічно сталих технологій. Вони дозволяють створювати конструкції з природних, біологічно розкладаються матеріалів, що мають мінімальний вплив на навколишнє середовище. 3D-друк забезпечує точність і ефективність у створенні будівельних елементів, а біоматеріали, такі як дерево, солома, водорості або біопластики, стають важливими складниками цього процесу.

Дерево, зокрема, є популярним матеріалом завдяки своїй міцності, легкості та естетичному вигляду. Технології 3D-друку дозволяють створювати конструктивні елементи з дерева або його похідних, таких як пресовані деревні волокна або композити. Завдяки таким матеріалам будівлі мають хороші теплоізоляційні властивості, що робить їх енергоефективними. Крім того, дерево є відновлюваним ресурсом, що додає йому екологічної привабливості.

Іншим цікавим матеріалом для 3D-друку є солома. Вона може бути використана для виготовлення теплоізоляційних панелей або навіть для

створення конструкцій. Солома, поєднана з біопластиками, дозволяє виготовляти міцні й екологічні матеріали, які ефективно використовуються для будівництва. Водорості також займають важливе місце серед біоматеріалів. Цей матеріал має низьку вагу та високу теплоізоляцію, а також є швидкозростаючим, що робить його доступним і сталим ресурсом. Водорості можуть використовуватися для створення біопластиків або волокнистих матеріалів, які підходять для будівельних елементів, таких як стінові панелі чи декоративні частини.

Однією з головних переваг біоматеріалів у 3D-друці є їх екологічна безпека. Вони виготовляються з відновлюваних ресурсів, що сприяє зниженню кількості відходів і зменшенню навантаження на сміттєзвалища. Оскільки більшість таких матеріалів здатна розкладатися в природних умовах, це знижує рівень забруднення навколишнього середовища. Додатково, біоматеріали володіють властивостями, які забезпечують енергоефективність будівель, такими як теплоізоляція, а також здатність регулювати вологість у приміщеннях. У майбутньому можна очікувати, що біоматеріали стануть важливим компонентом у будівельній індустрії. Розвиток технологій 3D-друку та вдосконалення властивостей біоматеріалів дозволять зменшити викиди шкідливих речовин і забезпечити сталий розвиток будівництва. Завдяки таким матеріалам, які поєднують інновації з природними ресурсами, будівельний процес стане не лише економічно ефективним, а й екологічно безпечним.

Використання різноманітних матеріалів, таких як перероблені пластики, біоматеріали, бетони та металеві сплави, дозволяє не лише оптимізувати виробничі процеси, але й знижувати екологічний вплив будівництва. Завдяки 3D-друку можна створювати складні та точні конструкції, зменшуючи витрати часу і ресурсів, що робить будівництво більш сталим і ефективним. Зважаючи на швидкий розвиток технологій, можна очікувати, що використання нових матеріалів для 3D-друку стане основною тенденцією в будівництві, забезпечуючи більш екологічні, економічно вигідні та інноваційні рішення для майбутнього.

3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ВИКЛИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ 3D-ДРУКУ В РОЗРОБЦІ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

3.1 Перспективи розвитку та виклики 3D-друку в розробці будівельної продукції

Ключовими перспективами розвитку 3D-друку в розробці будівельної продукції є:

1. Підвищення ефективності та зниження витрат на будівництво завдяки 3D-друку є одними з основних переваг цієї технології. Один із найважливіших аспектів полягає в оптимізації використання матеріалів. Традиційні методи будівництва часто призводять до значних відходів, оскільки матеріали необхідно підготувати, обробити, а також скорочувати їх під час монтажу. У разі 3D-друку кожен матеріал наноситься з високою точністю, що дозволяє використовувати лише необхідну кількість. Завдяки цьому значно зменшуються витрати на матеріали, а кількість відходів практично зводиться до мінімуму. Це також дозволяє знизити вартість будівництва, оскільки економія на матеріалах є важливою складовою.

Крім того, 3D-друк здатен значно зменшити витрати на робочу силу. Традиційне будівництво вимагає великої кількості працівників, які займаються різними етапами роботи: від підготовки матеріалів до монтажу конструкцій. З впровадженням 3D-принтерів частина цих етапів може бути автоматизована, що дозволяє значно скоротити потребу в робочих руках. Це не лише знижує витрати на оплату праці, але й дає можливість зменшити часові затрати, що також впливає на загальну вартість будівництва.

Іншим важливим фактором є скорочення часу на виконання будівельних робіт. Завдяки здатності 3D-принтерів працювати безперервно, без

необхідності в перервах на обробку чи доставку матеріалів, можна значно прискорити процес зведення будівель. Це дозволяє зменшити загальні витрати на будівництво, оскільки зменшується тривалість проекту, що також впливає на витрати на робочу силу та інші ресурси.

З точки зору довгострокових витрат, 3D-друк дозволяє створювати конструкції, які мають високу точність та надійність, що зменшує потребу в ремонтах та технічному обслуговуванні. Вбудовані в 3D-друк системи контролю якості дозволяють уникнути дефектів, які можуть виникати при традиційному будівництві, і це додатково знижує витрати в майбутньому.

2. Інновації в проектуванні та виготовленні будівельних конструкцій через технологію 3D-друку відкривають нові можливості для створення складних, унікальних і економічно вигідних архітектурних рішень. Завдяки здатності 3D-принтерів працювати з різними матеріалами та створювати складні геометричні форми, з'являється можливість кардинально змінити підходи до проектування будівель та виготовлення їх конструкцій.

Одним з головних інноваційних аспектів є здатність 3D-друку реалізувати складні, органічні форми, які важко або навіть неможливо виготовити за допомогою традиційних будівельних методів. Архітектори можуть вільно експериментувати з формами, що раніше були недосяжними через технологічні обмеження. Технологія 3D-друку дозволяє створювати конструкції з витонченими деталями, плавними лініями та складними каркасами, що змінює архітектурний вигляд будівель і створює нові можливості для вираження творчих ідей.

Ще однією інновацією є можливість адаптації конструкцій до специфічних вимог замовників. 3D-друк дозволяє з великою точністю виготовляти деталі, що відповідатимуть точним параметрам проекту. Це дає змогу реалізовувати нестандартні конструктивні рішення, зокрема адаптовані під конкретні географічні чи кліматичні умови. Наприклад, можна створювати будівлі, які краще витримують землетруси, надмірне навантаження чи інші природні явища завдяки точно продуманій геометрії та матеріалам.

Технологія 3D-друку також дозволяє істотно прискорити процес виготовлення будівельних конструкцій. Традиційно виготовлення окремих частин будівлі займає чимало часу і вимагає кількох етапів, включаючи транспортування, складання та монтаж. За допомогою 3D-друку елементи будівлі можуть бути надруковані безпосередньо на будівельному майданчику, зменшуючи час на доставку та монтаж, а також мінімізуючи можливі помилки при складанні.

Важливою інновацією є використання нових матеріалів, які спеціально розроблені для технології 3D-друку. Це можуть бути як спеціальні види бетону, що володіють підвищеною міцністю, так і біорозкладні пластики, які сприяють зниженню екологічного навантаження будівель. Матеріали, що використовуються в 3D-друці, можуть бути розроблені таким чином, щоб забезпечити не тільки необхідну міцність, але й естетичні характеристики, такі як текстури або кольорові ефекти, що ще більше підвищує привабливість кінцевого продукту.

Технологія 3D-друку також дозволяє оптимізувати використання ресурсів, оскільки за допомогою комп'ютерного моделювання можна створювати конструкції з точністю до міліметра, що знижує кількість матеріальних витрат та зменшує негативний вплив на навколишнє середовище. Програмне забезпечення для 3D-друку дозволяє точно розраховувати кількість необхідного матеріалу, що знижує витрати на будівельні ресурси і зменшує кількість відходів, що утворюються в процесі будівництва.

Завдяки інтеграції технологій 3D-друку та автоматизації будівництва, можна не лише зменшити витрати на матеріали та робочу силу, але й значно підвищити точність і якість виконання проектів. Використання алгоритмів для оптимізації конструкцій дозволяє створювати більш стійкі та ефективні структури, що забезпечує їх довговічність і безпеку.

Отже, інновації в проектуванні та виготовленні будівельних конструкцій за допомогою 3D-друку не лише покращують ефективність будівництва, але й

відкривають нові можливості для реалізації складних архітектурних рішень, знижуючи витрати та підвищуючи якість будівель.

3. Швидкість виконання будівельних робіт – це одна з ключових переваг технології 3D-друку в будівництві, яка дозволяє значно скоротити час, необхідний для зведення будівель. Завдяки автоматизації процесів і високій точності нанесення матеріалу, 3D-друк може зменшити час виконання будівельних проектів порівняно з традиційними методами. Це має безпосереднє значення для підвищення ефективності будівельної галузі, оскільки дозволяє не тільки швидше завершувати проекти, а й знижувати витрати на робочу силу та ресурси.

Одним із основних аспектів, що забезпечує високу швидкість будівництва за допомогою 3D-друку, є можливість роботи без перерв. 3D-принтери здатні працювати без зупинок, що дозволяє виготовляти будівельні елементи у будь-який час доби, незалежно від погодних умов чи потреби в додаткових людських ресурсах для контролю процесу. Це значно зменшує час, необхідний для завершення будівельного проекту. Наприклад, при використанні 3D-принтерів для друку будівельних елементів, таких як стіни чи колони, роботи можуть бути завершені за кілька днів, в той час як традиційне зведення таких конструкцій займає значно більше часу.

Крім того, 3D-друк дозволяє значно зменшити кількість етапів, які потрібно виконати при будівництві. У традиційному будівництві зазвичай доводиться витрачати час на кілька етапів, таких як виготовлення матеріалів, транспортування, складання та монтаж. За допомогою 3D-друку ці етапи можна об'єднати, оскільки будівельні елементи можуть бути виготовлені безпосередньо на місці будівництва, що значно зменшує час на транспортування матеріалів і їх обробку. Це дозволяє скоротити логістичні витрати та прискорити виконання проекту.

Іншою важливою складовою є скорочення часу на підготовку будівельного майданчика. Технологія 3D-друку дозволяє швидко адаптувати інфраструктуру майданчика до вимог проекту, завдяки чому зменшується

необхідність у масштабних земляних роботах та інших підготовчих етапах, які зазвичай займають багато часу.

Завдяки можливості налаштування параметрів роботи 3D-принтера і використанню сучасних програмних забезпечень для моделювання, технологія дозволяє оптимізувати не тільки сам процес будівництва, але й зменшити час на проектування. Рішення для 3D-друку можуть бути швидко адаптовані під будь-які вимоги, що дозволяє мінімізувати час на коригування проекту і його виконання, знижуючи загальний цикл будівництва.

З точки зору термінів виконання, 3D-друк також може значно прискорити процес ремонту чи реконструкції. Оскільки будівельні елементи можуть бути надруковані за короткий період часу, ремонтні роботи, які зазвичай займають кілька тижнів або навіть місяців, можуть бути виконані за лічені дні, що є великим плюсом для зменшення часу перебування в будівельних умовах, а також для зниження витрат на тимчасове переміщення мешканців або працівників.

Загалом, використання 3D-друку в будівництві дозволяє значно скоротити час виконання робіт, що має безпосередній вплив на загальну вартість проекту. Це дає змогу будувати більше за менший проміжок часу, що відкриває нові можливості для розвитку індустрії, особливо в умовах високої потреби в швидкому зведенні житлових та комерційних об'єктів, а також для відновлення інфраструктури після стихійних лих або інших надзвичайних ситуацій.

4. Зниження впливу на навколишнє середовищ. Технологія 3D-друку в будівництві має значний потенціал для зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Однією з основних переваг є значне скорочення відходів. Традиційне будівництво часто супроводжується утворенням великих обсягів будівельних відходів через надмірне використання матеріалів або неточність у розмірах та формах, що призводить до їх обробки та утилізації. У випадку з 3D-друком матеріал наноситься з точністю до міліметра, що

дозволяє використовувати лише необхідну кількість матеріалу, мінімізуючи відходи та знижуючи потребу в утилізації.

Крім того, 3D-друк дає можливість використовувати екологічно чисті та перероблені матеріали. Наприклад, можна використовувати біорозкладні пластики або бетон, виготовлений з перероблених матеріалів, що значно знижує навантаження на довкілля. Деякі компанії також активно працюють над розробкою матеріалів, які є не лише екологічно чистими, а й більш енергоефективними, такими як бетон з низьким вуглецевим слідом або спеціальні суміші, що поглинають вуглекислий газ.

Ще однією важливою перевагою є можливість зведення будівель без необхідності транспортування матеріалів на великі відстані, що сприяє зменшенню викидів парникових газів, зокрема CO2. Оскільки 3D-принтери можуть працювати безпосередньо на будівельному майданчику, вони значно зменшують потребу в логістичних операціях, які зазвичай супроводжують традиційне будівництво. Це також знижує витрати пального та енергії, що в результаті позитивно впливає на навколишнє середовище.

Оскільки 3D-друк дозволяє створювати конструкції з мінімальними енергетичними витратами, а також застосовувати новітні матеріали, які мають більшу стійкість та тривалий термін служби, це також зменшує необхідність в частих ремонтах та реконструкціях, що ще більше знижує екологічне навантаження.

5. Можливість будівництва в умовах обмежених ресурсів. Технологія 3D-друку в будівництві має величезний потенціал для розвитку в умовах обмежених ресурсів, зокрема, в районах, де доступ до будівельних матеріалів є складним або дорогим. Завдяки здатності 3D-принтерів використовувати місцеві матеріали або навіть відходи, можна значно знизити залежність від зовнішніх постачальників і оптимізувати витрати на ресурси. Це особливо важливо в регіонах, де відсутній доступ до традиційних будівельних матеріалів, таких як бетон або цегла, або де їх транспортування є економічно недоцільним.

У віддалених районах або на будівництві в умовах стихійних лих 3D-друк дозволяє створювати будівлі та інфраструктуру без необхідності постійного завезення матеріалів. Наприклад, у пустельних або гористих місцевостях можна використовувати місцеві піщані або кам'яні матеріали для виготовлення будівельних сумішей. Це дозволяє зменшити витрати на транспортування та знизити вплив на навколишнє середовище.

Також важливим аспектом є можливість швидко будувати в умовах обмеженого часу або ресурсів. У випадку надзвичайних ситуацій, таких як землетруси, повені чи інші катастрофи, 3D-друк може забезпечити швидке зведення тимчасових або постійних житлових приміщень та інфраструктури. Це дозволяє забезпечити житлом людей, які залишилися без даху над головою, у мінімальні терміни, використовуючи доступні ресурси. Оскільки 3D-принтери можуть працювати автономно і вимагають мінімуму людської праці, це дозволяє організувати швидке відновлення на місці без потреби в масовому залученні робочої сили.

В умовах обмежених фінансових ресурсів 3D-друк також може стати альтернативою, що дозволяє знизити загальні витрати на будівництво завдяки скороченню витрат на матеріали, робочу силу та час. Це створює можливості для будівництва доступного житла та інфраструктури, навіть у регіонах з низьким рівнем економічного розвитку.

Отже, технологія 3D-друку в будівництві відкриває нові можливості для розвитку інфраструктури в умовах обмежених ресурсів, дозволяючи знижувати залежність від зовнішніх постачальників, використовувати місцеві матеріали, скорочувати витрати на транспортування та працю, а також забезпечувати швидке відновлення після стихійних лих чи інших надзвичайних ситуацій.

6. Масштабність та адаптація до різних типів будівель. Масштабність 3D-друку в будівництві – це одна з основних переваг цієї технології, оскільки вона дозволяє адаптуватися як до малих, так і до великих будівельних проектів. Ця універсальність є критично важливою для різних сегментів будівельного

ринку, включаючи житлові, комерційні, промислові та інфраструктурні об'єкти. Завдяки здатності 3D-принтерів працювати з різними матеріалами та мати високу точність, технологія може бути адаптована під різноманітні вимоги й масштаби будівництва.

Для малих будівельних проектів, таких як приватні будинки або невеликі комерційні приміщення, 3D-друк дозволяє створювати нестандартні архітектурні форми, що дає можливість знижувати витрати на матеріали та робочу силу. Наприклад, швидке зведення житлових будинків за допомогою 3D-друку може дозволити скоротити час будівництва вдвічі або більше порівняно з традиційними методами, що дає можливість швидше реагувати на потреби ринку та зменшувати витрати на будівництво.

У великих інфраструктурних проектах, таких як мости, тунелі або промислові комплекси, 3D-друк також має великий потенціал. Ця технологія дозволяє зводити складні конструкції з точністю до міліметра, що підвищує їх стійкість і безпеку. Наприклад, у випадку мостів або інших інженерних споруд, 3D-друк дозволяє створювати легкі, але міцні конструкції, що оптимізують використання матеріалів і зменшують загальні витрати на будівництво.

Таким чином, технологія 3D-друку може бути масштабована для різних типів будівель і проектів, що дозволяє використовувати її як для малих, так і для великих інфраструктурних об'єктів. Це відкриває можливості для створення більш ефективних, економічних і екологічно чистих рішень у будівництві.

7. Інтеграція з іншими інноваціями. Перспективи розвитку 3D-друку в будівництві значною мірою залежать від інтеграції цієї технології з іншими інноваціями, такими як штучний інтелект (ШІ), роботизація та Інтернет речей (IoT). Спільне використання цих технологій може значно підвищити ефективність будівництва, автоматизацію процесів та точність виконання робіт, що відкриває нові горизонти для індустрії.

Штучний інтелект (ШІ) може бути використаний для аналізу даних і оптимізації проектів, що підлягають 3D-друку. Застосування ШІ дозволяє в

реальному часі аналізувати різні параметри, такі як температура, вологість або якість матеріалів, і коригувати параметри 3D-друку для досягнення максимальної ефективності. Наприклад, ШІ може автоматично виявляти дефекти в конструкції під час друку і коригувати параметри, що забезпечить точність і якість будівельних елементів без участі людини.

Роботизація є важливою складовою інтеграції з 3D-друком. В роботизованих системах роботи можуть виконувати фізичні операції, доповнюючи процес 3D-друку. Наприклад, роботи можуть виконувати монтаж зібраних елементів, проводити додаткові роботи з обробки або навіть виконувати вимірювання для контролю якості. Це дозволяє значно знизити витрати на працю і зменшити час, необхідний для завершення будівельного проекту. Крім того, роботи можуть виконувати складні та небезпечні операції, що підвищує безпеку на будівельних майданчиках.

Інтернет речей (IoT) дозволяє інтегрувати в систему 3D-друку розумні сенсори і пристрої, що дозволяють здійснювати моніторинг всіх етапів будівництва в реальному часі. Сенсори можуть контролювати стан матеріалів, температурний режим або навіть передбачати можливі несправності в обладнанні, що дозволяє знизити ризики та покращити планування робіт. Це дає змогу оптимізувати процес будівництва, забезпечуючи більшу прозорість і зменшуючи витрати на управління проектом.

Таким чином, інтеграція 3D-друку з іншими інноваційними технологіями, такими як штучний інтелект, роботизація та IoT, дозволяє значно підвищити ефективність, безпеку та точність будівельних процесів. Це дозволить не тільки зменшити витрати і час на виконання проектів, а й створити більш інтелектуальні, стійкі та екологічно чисті будівлі, що відповідатимуть вимогам сучасного будівельного ринку.

Виклики 3D-друку в будівництві є:

Впровадження 3D-друку в будівництві несе з собою значні переваги, однак супроводжується і низкою викликів, які можуть обмежити його широке застосування в галузі. Ці виклики включають технічні, економічні, юридичні

та соціальні аспекти, кожен з яких потребує ретельного опрацювання для забезпечення ефективного впровадження цієї технології.

1. Технічні виклики. Один з основних технічних викликів – це потреба в удосконаленні 3D-принтерів для будівництва. Хоча вже існують прототипи таких принтерів, вони все ще мають обмеження щодо розміру, швидкості та точності друку, особливо при роботі з великими об'єктами або складними конструкціями. Для забезпечення ефективності та якості друку на великих об'єктах, таких як багатоповерхові будівлі чи інфраструктурні об'єкти, необхідно розробити більш потужні принтери, які здатні працювати на великих майданчиках, забезпечуючи високу точність і стабільність під час друку.

Ще однією технічною проблемою є сумісність різних матеріалів, які використовуються в 3D-друку. Для досягнення необхідної міцності, теплоізоляції, вогнестійкості та інших характеристик будівельних матеріалів потрібно розробити спеціалізовані суміші для 3D-друку, що можуть бути адаптовані до різних умов навколишнього середовища. Деякі матеріали можуть мати обмежену здатність до друку або потребувати додаткових інгредієнтів для досягнення бажаних властивостей.

2. Економічні виклики. Інвестиції в обладнання для 3D-друку можуть бути високими, що створює бар'єри для широкого застосування цієї технології, особливо для малих і середніх підприємств. Хоча в перспективі ці витрати можуть бути виправдані, оскільки технологія дозволяє значно скоротити витрати на матеріали та робочу силу, початкові витрати на покупку та налаштування принтерів залишаються значним фактором для підприємств, які прагнуть впровадити цю технологію.

Також економічною проблемою є непередбачуваність витрат на матеріали, оскільки технологія 3D-друку все ще є новою, і постачальники матеріалів можуть коригувати ціни залежно від попиту та нових розробок. Це створює невизначеність для інвесторів та будівельних компаній, які планують застосування цієї технології в довгострокових проектах.

3. Юридичні та регуляторні виклики. Правова база для використання 3D-друку в будівництві ще не повністю сформована. Багато країн не мають чітко визначених стандартів або норм для проектування, будівництва і сертифікації 3D-друкованих будівель. Це створює правову невизначеність, особливо для будівельних компаній, які хочуть бути впевненими, що їхні проекти відповідатимуть вимогам місцевих органів влади.

Ще одним аспектом є питання безпеки 3D-друкованих будівель. Оскільки це нова технологія, потребує більш детального вивчення, щоб визначити, наскільки вона може бути надійною і безпечною для довгострокового використання. Без чітких стандартів та інспекцій для перевірки якості 3D-друкованих конструкцій можуть виникнути ризики для кінцевих споживачів.

4.Соціальні виклики. Впровадження 3D-друку в будівництві також стикається з соціальними викликами. Оскільки ця технологія здатна значно автоматизувати будівельний процес, вона може призвести до зменшення потреби в робочій силі, що викликає побоювання щодо втрати робочих місць у традиційній будівельній галузі. Робітники, які займаються ручною працею, можуть зіткнутися з необхідністю перекваліфікації, щоб адаптуватися до нових технологій.

Крім того, є питання сприйняття нових технологій серед населення. Хоча 3D-друк пропонує значні переваги, не всі споживачі можуть бути готові прийняти будівлі, виготовлені за цією технологією, через побоювання щодо їх якості або безпеки. Це вимагає значних зусиль у плані освітньої роботи, просування технології та доведення її переваг.

5. Проблеми інтеграції з традиційними методами будівництва. Інтеграція 3D-друку з традиційними методами будівництва також є важливим викликом. Для успішного застосування цієї технології потрібно адаптувати існуючі процеси і стандарти будівництва, а також навчити фахівців працювати з новими технологіями. Багато проектів вимагають комплексного підходу, який поєднує як традиційні, так і нові методи, що може бути складно реалізувати в

умовах існуючих будівельних практик. Таким чином, хоча технологія 3D-друку в будівництві має великий потенціал для трансформації галузі, її впровадження супроводжується численними викликами. Технічні обмеження, високі інвестиційні витрати, відсутність чіткої правової бази, соціальні наслідки для робочої сили та необхідність інтеграції з традиційними методами будівництва – все це є важливими бар'єрами для широкого застосування цієї технології. Однак, з урахуванням постійного розвитку та вдосконалення цієї технології, багато з цих викликів можна подолати, що забезпечить її успішне впровадження в будівництві.

3.2 Приклади застосування 3D-друку у розробці будівельної продукції

Сьогодні накопичено значний досвід у сфері 3D-друку будівель різного призначення. Технологія застосовується для створення одноповерхових споруд з одним приміщенням, двоповерхових будинків із кількома кімнатами, конструкції яких часто доповнюють арматурними елементами для підвищення міцності. Крім того, активно розробляються екологічні проєкти з використанням натуральних матеріалів, а також енергоефективні будівлі, спрямовані на зниження споживання ресурсів.

Окремо варто зазначити успішний досвід друку багатоповерхових конструкцій, що відкриває нові перспективи для масового житлового та комерційного будівництва.

Завдяки 3D-друку стало можливим створювати будівлі з унікальною зовнішньою архітектурою, яка враховує функціональне призначення об’єкта, національні культурні особливості та оптимізує витрати на матеріали і час будівництва. Інформація про будівлі, зведені у світі із застосуванням технології 3D-друку наведені в таблиці 3.1.

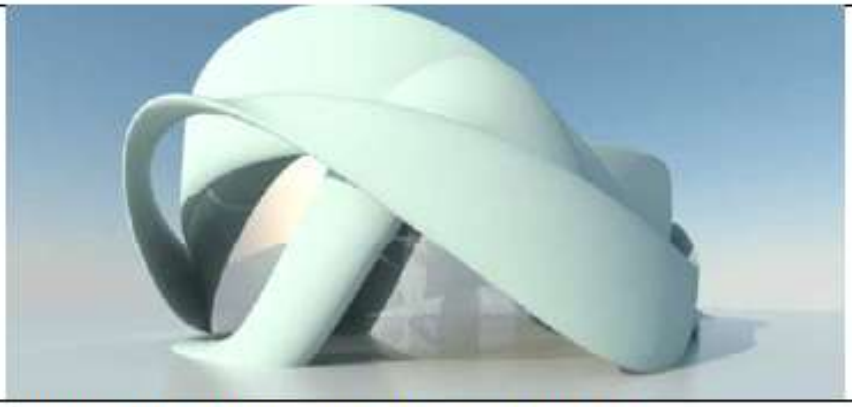
Таблиця 3.1 – Інформація про будівлі, зведені у світі із застосуванням технології 3D-друку

№	Зображення	Літ.
1	2	3
1	 	[12]
	Китай, Шанхай, 2014	
	3D-друк Winsun - 150x10x6(h)	
	Вілла WinSun в Сучжоу. Площа 1100 м2	
	Друк деталей. Вироби із бетону. Суміш – цементу та будівельних відходів з добавленням затверджувача.	
2	 	[12]
	Китай, Сучжоу	
	3D-друк Winsun - 40x10x6(h)	
	Особняк WinSun в Сучжоу. Площа 1100 м2.	
3	 	[12]
	США, Міннесота, 2014	
	Контурний 3D друк Stroybot 2	
	Замок	
	Моноліт, вироби. Матеріал: цементний розчин, добавки.	

Продовження табл. 3.1

4	 	[13]
	Китай, Сучжоу, 2015	
	3D-друк Winsun 150x10x6(h)	
	5-поверховий житловий будинок	
	Друк окремих блоків. Вироби із бетону. Матеріал: суміш із будівельних відходів, включно скло, сталь, цемент.	
5	 	[12]
	Китай, Шанхай, 2015	
	3D-друк Winsun 150x10x6(h)	
	Вироби з бетону, армованого скловолокном.	
6	 	[13] [29]
	OAE, Дубай, 2016 - Офіс Dubai Future Foundation (OAE)	
	3D-друкWinsun	
	Будівля "Офіс майбутнього". Площа 240 м2. 17 модулів (елементів). Одноповерхова будівля.	

Продовження табл. 3.1

8		[15]
	Нідерланди, 2017. Компанія CyBe Additive Industries.	
	3D-друк-маніпулятор CyBe Construction	
	Конференц-центр, 90 м2. Складна архітектурная форма.	
	Конструкції довільної форми із спеціального бетонного розчину CyBe MORTAR.	
9		[15]
	Франція, Університет Нанта - (University of Nantes) спільно з Nantes Digital Sciences Laboratory (LS2N)	
	Проект Yhnova - роботизована рука Batiprint 3D. Архітектурна фірма TICA.	
	Соціальне житло. П'ятикімнатний житловий будинок. Площа 95 $м^2$. Будинок з дугоподібними стінами і округленими кутами. Висота до 7 м.	
	Метод Batiprint3D – 3D друку «зсередини»	

Продовження табл. 3.1

12	   	[17] [27]
	Філіпіни, 2015	
	Lewis Grand Hotel – створює перший в світі готель з допомогою 3D принтера.	
	Трикімнатна вілла 130 м2 (10,5x12,5x3 (h) - прибудова до основної будівлі.	
	Матеріал: бетон	
13	 	[18]
	Росія, 2018	
	Американські компанії ICON і New Story	
	Житлова будівля. Площа 55-75 м2	
14	 	[19]
	Італія, дім Гайа, 2018	
	Модульний 3D-принтер Crane Wasp. Компанія WASP (будинки різних форматів і розмірів)	
	Житловий будинок. Площа 30 м2. Будинок круглий в плані. 3D-друк - зовнішня оболонка. Внутрішні дерев'яні конструкції,	

Продовження табл. 3.1

	утримують дерев'яний дах. Порожнини в конструкції стіни залишається порожніми для природної вентиляції, що дозволяє вбудовувати енергообладнання в стіни будинку.	
	Матеріал: натуральні суміші, зроблені з грунту прилеглої території, а також відходів виробництва рису, таких як подрібнена солома і рисове лушпиння.	
15		[20]
	Ейндховен, Босрийськ, Голландія, 2017-2019	
	Проект Віха в Голландії від Houben & Van Architecten. Технологічний університет Ейндховена спільно з місцевою архітектурою студією Houben & Van Architecten.	
	Проект 5 житлових будинків, які будуть доступні в оренду через фірму по нерухомості Vesteda.	
16		[24]
	ОАЕ, Дубай, 2018	
	Професор Берок Хошневіс з Університету Південної Каліфорнії розробив 3D принтер, який може побудувати будинок площею 250 кв. м. Для будівництва використовується 3D принтер	

Продовження табл. 3.1

	висотою 6 м, довжиною 37 м і шириною 12 м.	
	Офісна будівля, одноповерхова. Площа 250 м2. У ньому є електрика, телекомунікації, водопостачання і система кондиціонування повітря.	
	3D друк елементів. Збірка будівлі на будмайданчику.	
17	    США, Curve Appeal в місті Чаттануга	[21]
	Архітектурна студія WATG. Проект виконаний в концепції Freeform, що має на увазі нестандартну форму будівлі.	
	Житловий будинок, 56-74 м2.	
	Для спорудження будинку будуть використовуватися 28 панелей, які надрукують на 3D-принтері за межами будівельного майданчика. Надалі панелі будуть з'єднані, щоб сформувати зовнішні стіни, дах і внутрішні елементи. Кожен з цих елементів буде збиратися окремо, і тільки потім на будівельному майданчику їх з'єднають разом.	
18	 	[22] [25]

Метод 3D-друку BatiPrint3D, розроблений дослідниками Університету Нанта, базується на використанні роботизованої руки довжиною 4 метри з лазерним управлінням, яка наносить шари різних будівельних матеріалів, рис.3.1.

Проєкт Yhnova є результатом співпраці між Університетом Нанта, міською радою, компаніями Bouygues Construction і Lafarge Holcim, організацією Habitat Nantes Métropole, а також архітектурною студією TICA і фахівцями з урбаністики.

У рамках цього проєкту було збудовано доступний житловий будинок площею 95 м² із чотирма спальнями.

Робота 3D-принтера відбувається шляхом пошарового нанесення матеріалів знизу вгору. Технологія BatiPrint3D дозволяє використовувати три типи шарів:

– опалубка зі спіненого матеріалу;

– ізолювальний шар;

– конструктивний шар зі спеціальної бетонної суміші.

Ця комбінація забезпечує створення товстих, надміцних і довговічних стін.



Рисунок 3.1 – Метод 3D-друку BatiPrint3D [27]

3D-принтер BAAM (Big Area Additive Manufacturing) використовується для реалізації інноваційної концепції будівель і транспортних засобів, надрукованих за допомогою 3D-друку, під назвою AMIE (Additive Manufacturing Integrated Energy), рис. 3.2.

Ця концепція передбачає створення мобільного, пересувного житлового будинку розмірами: довжина – 12 м, ширина – 3,5 м, висота – 3,5 м.

Каркас будинку складається з непрозорих панелей (80%) і скляних елементів (20%). На даху будинку розташовані сонячні панелі, які забезпечують заряджання акумуляторів, встановлених під спорудою. Ці акумулятори служать джерелом енергії в нічний час.

Технологія забезпечує двосторонній потік енергії між житловим будинком і транспортним засобом, демонструючи інтеграцію можливостей масштабного 3D-друку та чистої енергії. Такий підхід є революційним у сфері виробництва, зберігання та раціонального споживання енергії.



Рисунок 3.2 – Друк за допомогою 3D-принтера BAAM [26]

У рамках концепції "Розумного міста" (Smart City), яка активно впроваджується в Дубаї, державний забудовник Emaar Properties застосовує технологію 3D-друку для будівництва житлових будинків, рис. 3.3.



Рисунок 3.3 Друк у рамках концепції "Розумного міста" (Smart City), Дубаї

Використання 3D-друку розглядається як сучасна екологічна альтернатива традиційним методам будівництва. Ця технологія дозволяє:

– зменшити обсяг будівельних відходів, що позитивно впливає на стан навколишнього середовища;

– суттєво знизити рівень шумового забруднення під час будівельних робіт, забезпечуючи комфорт для мешканців прилеглих районів.

Крім екологічних переваг, 3D-друк у будівництві сприяє підвищенню швидкості зведення будівель і дозволяє створювати архітектурні об’єкти з

унікальним дизайном, що гармонійно вписуються у сучасну концепцію розвитку міста.

Проєкт у мікрорайоні Arabian Ranches III є прикладом прагнення Дубая до впровадження інноваційних рішень у сфері урбаністики, орієнтованих на стійкий розвиток і комфортне життя.

Метод 3D-друку у будівництві продовжує активно розвиватися у світі, і на основі досвіду різних країн вже можна зробити певні висновки щодо класифікації будівель, зведених за допомогою цієї технології. Класифікація здійснюється за рядом характеристик, що дозволяють групувати будинки відповідно до їхніх функціональних, конструктивних та технічних особливостей.

Класифікація будинків, зведених методом 3D-друку, за основними ознаками:

Функціональне призначення будинку:

- житлові будинки (одноквартирні, такі як котеджі, особняки, вілли, або багатоквартирні будинки);
- готелі;
- офіси;
- конференц-центри;
- двоповерхові адміністративні будівлі;
- інноваційні центри, такі як Solar Park.

Тип будинку:

- стаціонарні будинки;
- мобільні будинки.

Поверховість будинку:

- одноповерхові будинки (переважна тенденція);
- двоповерхові будинки;
- багатоповерхові будівлі (до п'яти поверхів).

Площа будинку: від 30 м² до 1100 м², залежно від призначення та функціонального використання.

Габарити будинку:

– ширина: 10,0 м, 12,0 м, 20,0 м;
– висота: від 3,0 м до 6,0 м;
– діаметр: до 15,0 м.

Архітектурно-планувальні характеристики:

– проста схема: квадратні, прямокутні, круглі будівлі;
– складна схема: прямокутники з дугоподібними стінами або прямокутники з округленими кутами;
– вільне планування, що дозволяє максимізувати функціональний простір відповідно до потреб мешканців.

Метод 3D-друку дає можливість створювати різноманітні архітектурні форми та будівлі, що відповідають як технічним вимогам, так і інноваційним стандартам дизайну та функціональності. Завдяки використанню цієї технології можна зводити будівлі різного призначення з унікальними характеристиками, які неможливо було б досягнути традиційними будівельними методами.

Формоутворення будівель: будівлі можуть мати різні геометричні форми, такі як куби, паралелепіпеди, куполи, циліндри, модулі, капсули, складні архітектурні форми, біонічні форми, вільні форми або конструкції довільної геометрії.

Технології зведення будівель:

– друк будівлі у повному обсязі;
– друк окремих елементів будівлі з подальшою збіркою;
– друк будівлі по частинах;
– друк окремих блоків;
– друк складних панелей з подальшою збіркою;
– друк модульних конструкцій та їх збірка;
– технологія Batiprint3D, яка передбачає 3D-друк "зсередини".

Будівельні матеріали, що використовуються у 3D-друці:

цементний розчин з додатками;

– опалубка з піноподібного матеріалу, що поєднує ізоляцію та структурування;
– спеціальна бетонна суміш;
– натуральні суміші, що утворені ґрунтом з прилеглих територій, а також сировиною з виробництва рису, наприклад, подрібнена солома та рисове лушпиння;
– цементний розчин, зміцнений скловолокном;
– суміші на основі будівельних відходів, таких як скло, сталь, цемент;
– суміші з цементу та будівельних відходів із додаванням затверджувача;
– матеріали, які використовуються для 3D-друку: ґрунт, пінополіуретан, пісок, цемент, гіпс.

Ці технології та матеріали забезпечують широкий спектр можливостей для швидкого, ефективного та екологічного будівництва, мінімізуючи будівельні відходи та зменшуючи рівень шуму при будівельних роботах.

3.3 Майбутнє 3D-друку у розробці будівельної продукції

Майбутнє 3D-друку у розробці будівельної продукції має великі перспективи, оскільки ця технологія може значно змінити традиційні методи будівництва. Вона дозволяє прискорити процес зведення будівель, знижує витрати на матеріали та працю, а також дає можливість створювати складні і нестандартні конструкції, які важко реалізувати традиційними методами. З використанням 3D-друку можна зменшити кількість відходів, забезпечити точність у виготовленні будівельних елементів та підвищити ефективність будівництва. Крім того, технологія відкриває нові можливості для інклюзивного та доступного житла, зокрема у малозабезпечених регіонах. Ці переваги вказують на потенціал 3D-друку стати важливим інструментом для майбутнього розвитку будівельної галузі.

Ключові прогнози світових компаній у сфері 3D-будівництва: у найближчі роки технологія 3D-друку в будівництві зазнає значного розвитку. У 2024-2025 роках очікується розширення комерційного застосування цієї технології для будівництва невеликих об'єктів, таких як житлові будинки, офіси та інфраструктурні об'єкти. Водночас розробка нових матеріалів, таких як більш стійкі до навантажень бетони та екологічно чисті суміші, дозволить значно покращити якість і довговічність 3D-друкованих конструкцій. Важливим кроком стане інтеграція цієї технології з традиційними методами будівництва, де 3D-друк використовуватиметься для виготовлення окремих елементів, таких як стіни та дахи.

У 2026-2028 роках вдосконалення принтерів дозволить скоротити час на будівництво будівель на 30-50%, що зробить технологію ще більш ефективною для швидкого будівництва житла в умовах зростаючого попиту. 3D-друк почне використовуватися для зведення великих інфраструктурних об'єктів, таких як мости та інженерні споруди, що дозволить значно знизити витрати та покращити стійкість конструкцій. Також важливим стане розвиток робото-інтегрованих систем, що автоматизують процеси, такі як монтаж або зведення складних елементів.

У період 2029-2031 років 3D-друк інтегруватиметься з новими технологіями, такими як штучний інтелект і системи датчиків, що дозволить оптимізувати весь будівельний процес від планування до управління ресурсами. Зросте попит на екологічно чисті матеріали, зокрема, ті що переробляють або зможуть біорозкладатися, що зменшить вплив будівництва на довкілля. Крім того, технологія стане важливим інструментом для будівництва в складних або віддалених умовах, таких як пустелі, райони з високою вологістю або навіть на інших планетах.

У 2032 році і далі 3D-друк стане стандартом для зведення великих об'єктів, таких як висотні будинки та торгово-розважальні комплекси. Технологія дозволить будувати цілі житлові комплекси або нові міста, що може кардинально змінити підхід до урбанізації. Також є ймовірність повної

автоматизації будівельного процесу, де будівлі створюватимуться з інтегрованими комунікаціями, енергетичними системами та інфраструктурою. Таким чином, 3D-друк в будівництві стане ключовим інструментом для досягнення більш швидкого, ефективного та екологічного будівництва.

Інтеграція технології 3D-друку в будівництві з іншими інноваціями, такими як штучний інтелект (ШІ) та роботизація, відкриває нові горизонти для розвитку галузі. ШІ здатен змінити підхід до проектування, управління та виконання будівельних робіт. Він може автоматизувати створення оптимізованих проектів, враховуючи не лише естетичні і функціональні вимоги, але й знижуючи витрати на матеріали та енергоспоживання. ШІ також може бути використаний для передбачення технічних проблем і неефективностей на етапі будівництва, що дозволить знизити ризики та підвищити якість виконання робіт.

Роботизація в контексті 3D-друку дозволить автоматизувати різні етапи будівельного процесу, включаючи виготовлення окремих частин конструкцій, монтаж, а також обслуговування та ремонт будівель. Роботи зможуть працювати в умовах, де люди можуть бути обмежені, наприклад, у важкодоступних місцях або на небезпечних об'єктах. Важливим елементом є інтеграція роботів з 3D-друкованими елементами: роботи можуть допомогти в складному монтажі чи встановленні великих друкованих конструкцій, що значно зменшить час на виконання таких завдань.

Застосування ШІ та роботизації в 3D-будівництві забезпечить не тільки високий рівень автоматизації, але й зниження людського фактору, що може призвести до зменшення помилок і підвищення безпеки на будівельних майданчиках. Також ці технології дозволяють значно прискорити процес будівництва, що в умовах зростаючого попиту на житло та інфраструктуру має важливе значення. В перспективі, інтеграція цих інновацій з 3D-друком зможе змінити всю будівельну галузь, зробивши її більш ефективною, стійкою та доступною для широкого використання.

Можливість впровадження 3D-друку в масштабах масового житлового будівництва має значний потенціал для змін на ринку будівництва. Ця технологія може кардинально змінити підходи до проектування, зведення та ремонту житлових будинків, роблячи їх більш доступними, ефективними та екологічними.

Однією з найбільших переваг 3D-друку для масового житлового будівництва є можливість значного скорочення витрат на будівництво. Використання 3D-принтерів дозволяє автоматизувати процес створення конструкцій, знижуючи необхідність у великій кількості робочої сили та зменшуючи витрати на матеріали завдяки точному контролю над використанням сировини. Також можливість використовувати перероблені або екологічно чисті матеріали зробить процес будівництва більш стійким та менш шкідливим для довкілля. Крім того, 3D-друк дозволяє створювати індивідуальні архітектурні елементи, що відкриває нові можливості для реалізації нестандартних проектів в масовому житловому будівництві.

Ще однією важливою перевагою є зниження часу на будівництво. 3D-друк дозволяє зводити будівлі значно швидше, ніж традиційні методи. Це особливо важливо в умовах зростаючого попиту на житло, де кожен день затримки може мати економічні наслідки. Технологія дозволяє будувати об'єкти протягом кількох тижнів або навіть днів, що дає змогу значно прискорити процеси розвитку міст і вирішення житлових проблем.

3D-друк також має потенціал для масового виробництва житлових одиниць на віддалених або обмежених територіях, де традиційне будівництво стикається з проблемами доступу до матеріалів або робочої сили. Це може бути особливо корисно в умовах природних катастроф, у зонах відновлення після стихійних лих або в країнах, що розвиваються, де є дефіцит житла. Однак, для впровадження 3D-друку на рівні масового житлового будівництва необхідно вирішити низку технічних, економічних та юридичних питань. Наприклад, потрібна розробка стандартів і норм для 3D-друкованих конструкцій, а також вдосконалення матеріалів, що використовуються в друкуванні, щоб

гарантувати їх надійність і довговічність. Крім того, важливими є питання інтеграції нових технологій у існуючі системи житлового будівництва та інфраструктури, а також необхідність перекваліфікації робітників для роботи з новими технологіями.

В цілому, технологія 3D-друку має великий потенціал для змін у масовому житловому будівництві, зробивши його швидшим, економічнішим та екологічнішим. Проте для широкого впровадження цієї технології на практиці необхідна подальша інвестиція в дослідження та розвиток, а також адаптація до реальних умов ринку.

Для максимально ефективного використання технології 3D-друку в будівництві в післявоєнний період в Україні, потрібно розробити чітку стратегію та тактику її впровадження. Ось як можна організувати цей процес на кількох рівнях:

Стратегія впровадження 3D-друку в розробці будівельної продукції. Основною метою є відновлення інфраструктури та житлового фонду, зниження витрат на будівництво та пришвидшення процесу відновлення, використовуючи інноваційні та доступні технології.

Основні напрямки стратегії:

– технологічна інфраструктура: розвиток локальних виробництв 3D-принтерів, створення центрів 3D-друку для будівництва та ремонту. Це включає не лише самі принтери, а й матеріали для друку, які можуть бути адаптовані до специфічних умов українського ринку та клімату;

– модульність і адаптивність: впровадження модульних систем будівництва для швидкої адаптації до потреб конкретних регіонів. Модульні конструкції можна буде використовувати як для тимчасових, так і для постійних споруд, що важливо в умовах післявоєнної реконструкції.

– координація з урядом та бізнесом: необхідно створити державні програми та ініціативи, що стимулюють приватні інвестиції в будівельні компанії, які займаються 3D-друком. Важливо забезпечити нормативну підтримку і розвиток відповідної інфраструктури на рівні місцевих органів влади;

– навчання та розвиток кадрів: потрібно створити програми підготовки спеціалістів для роботи з 3D-принтерами, а також підтримувати дослідження та інновації у сфері матеріалознавства для розвитку нових видів будівельних матеріалів, що можна друкувати;

– екологічність і сталий розвиток: враховуючи нагальні потреби в відновленні природних ресурсів і вплив на навколишнє середовище, важливо орієнтуватися на екологічні матеріали для 3D-друку. Це може включати використання перероблених матеріалів, екологічно чистих сумішей для будівництва.

Тактика впровадження 3D-друку:

Крок 1: Прототипування та пілотні проєкти. Першим етапом повинні бути пілотні проєкти, які демонструють потенціал 3D-друку для різних типів будівельних робіт це – пілотні проєкти житлових будівель: зведення невеликих багатоквартирних або приватних будинків у містах і селищах, де найбільше потребують відновлення.

– тимчасові укриття та інфраструктура: будівництво тимчасових житлових комплексів або гуманітарних установ: лікарень, шкіл, пунктів обігріву в регіонах, що сильно постраждали від бойових дій.

Крок 2: Масштабування та локалізація виробництва. З огляду на позитивні результати пілотних проєктів, потрібно масштабувати виробництво 3D-принтерів та матеріалів для друку:

– створення локальних виробництв 3D-принтерів та постачання будівельних матеріалів;

– інтеграція локальних компаній для виробництва та постачання матеріалів, що відповідають вимогам до будівельних стандартів України.

Крок 3: Розвиток стандартів і нормативної бази. Для забезпечення надійності та безпеки будівництва на основі 3D-друку важливо розробити стандарти та нормативи для таких об'єктів:

– розробка стандартів для 3D-друкованих конструкцій, включаючи вимоги до міцності, теплоізоляції, протипожежної безпеки тощо.

– врахування локальних кліматичних умов при розробці матеріалів для друку, щоб забезпечити довговічність та ефективність побудованих споруд.

Крок 4: залучення інвестицій та підтримка на державному рівні. Залучення інвестицій у 3D-друк в будівництві, особливо в умовах обмежених ресурсів після війни, потребує участі держави та міжнародних організацій:

– стимулювання інвестицій за допомогою податкових пільг для компаній, що займаються технологіями 3D-друку.

– партнерства з міжнародними організаціями для отримання фінансування на відновлення інфраструктури.

Крок 5: Масове виробництво та впровадження. Після розробки та впровадження пілотних проєктів можна перейти до масштабного застосування технології:

– масове будівництво житла для переселенців і постраждалих сімей;

– відновлення інфраструктури в ключових регіонах, таких як дороги, мости, школи, лікарні та інші об'єкти.

Крок 6: моніторинг та оцінка ефективності. Постійний моніторинг результатів використання 3D-друку для будівництва дозволить коригувати стратегію та тактику. Важливо проводити регулярні оцінки якості, витрат, швидкості будівництва і задоволення потреб місцевих громад.

Переваги:

– швидкість відновлення та зведення нових будівель;

– зменшення витрат на будівництво та матеріали;

– гнучкість і адаптивність до різних умов та вимог.

Виклики:

– невизначеність щодо нормативної бази, що може уповільнити впровадження технології;

– необхідність висококваліфікованих кадрів, що обмежує можливості для швидкого масштабування;

– висока вартість початкових інвестицій в технології та обладнання.

ВИСНОВКИ

1. 3D-принтери відкривають нові можливості для будівельної галузі, дозволяючи створювати складні архітектурні форми, які неможливо реалізувати традиційними методами. Ця технологія забезпечує високу точність робіт, знижує рівень помилок, зменшує кількість відходів та скорочує час будівництва.

2. Застосування 3D-друку в будівництві сприяє зниженню витрат на матеріали завдяки їх раціональному використанню. Автоматизація процесів дозволяє зменшити потребу в ручній праці, що також скорочує загальні витрати на проєкт.

3. Технологія 3D-друку підтримує ідею сталого розвитку завдяки можливості використання екологічно чистих матеріалів, переробки будівельних відходів та зменшення шумового й пилового забруднення на будівельних майданчиках.

4. 3D-друк забезпечує швидке та економічне виготовлення доступного житла, що може вирішити проблему житлового дефіциту в різних регіонах. Також технологія корисна для зведення тимчасових споруд у надзвичайних ситуаціях або при ліквідації наслідків стихійних лих.

5. Розвиток 3D-друку сприяє впровадженню нових інженерних рішень і технологій, які стимулюють модернізацію будівельної галузі. Використання таких підходів дозволяє створювати більш гнучкі, адаптивні та функціональні конструкції.

6. Завдяки 3D-друку можна легко втілювати складні проєктні рішення, що дає архітекторам і дизайнерам більше свободи в розробці інноваційних будівель.

7. У світі вже реалізовано численні проєкти з використанням 3D-принтерів: житлові будинки, офіси, готелі, адміністративні споруди, що демонструє реальну ефективність цієї технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Martina F. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing [Text] / F. Martina. School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, UK, 2014. 178 p.

2. Gardiner, James Bruce. "Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing" (PDF). RMIT Research bank. Retrieved 21 February 2023. (pp. 176–202), 2011

3. Bruce M. R. Measurement and Simulation of Titanium Alloy Deposit Temperature in Electron Beam Additive Manufacturing / M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference. Chicago, Illinois, USA, 2012. P. 963 – 969.

4. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с. ISBN 978-966-641-824-4

5. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3д-друку будівельних об’єктів : колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф [та ін.]. ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького, Дніпро, ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с. ISBN 978-966-323-205-8

6. Kovacevic R. Development of MultiFab Machine For Rapid Manufacturing/ Repair / R. Kovacevic // The 2003 CTMA Symposium. Salt Lake City, USA, 2003

7. Clark, Corey. "Branch Technology unveils SHOP Architects' 3D printedpavilion at Design Miami". 3D Printing Industry.

8. Gardiner, James Bruce. "Exploring the Emerging Design Territory ofConstruction 3D Printing" (PDF). RMIT Research bank. Retrieved 21 February 2024. (p203-279), 2011.

9. 3D принтери, що друкують бетоном https://ucat3d.com/

10. Наші 3D принтери створюють будинки, в яких хочеться жити https://utu.com.ua/

11. Kira. "Construction of world's first 3D printed metal bridge begins today in Red Light District of Amsterdam". 3ders. Retrieved 21 February 2024.

12. "EeStairs Founding Father of the Landscape House". www.eestairs.com.

13. How a Chinese Company 3D-Printed Ten Houses In a Single Day". Gizmodo. Retrieved 2017-02-21.

14. На Київщині звели житловий будинок за допомогою 3D-принтера https://forbes.ua/news/na-kiivshchini-zbuduvali-zhitloviy-budinok-za-dopomogoyu-3d-printera-foto-19072024-22514

15. "The World's First 3D-Printed Building Will Arrive In 2014". TechCrunch. 2012-01-20. Retrieved 2013-02-08.

16. UniverseArchitecture (15 September 2014). "Landscape House Forum & Workshop Sept 3rd 2014_NRC Cafe_Amsterdam" – via YouTube.

17. "Office of the Future is 3D printed in Dubai". Treehugger. Retrieved 2017-02-21.

18. Savytskyi M. V. 3D-printing of build objects / M. V. Savytskyi, S. V. Shatov, O. A. Ozhyshchenko // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. праць. 2016. № 3. С. 18–26.

19. Використання досвіду 3D-друку будівельних об’єктів для проекту «Місячна база» / С. В. Шатов, М. В. Савицький, С. В. Іванцов // VII Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее», 21-24 мая 2019 г. / ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля». Днепр, 2019. С. 113.

20. Construction 3D printing. https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing

21. Dubai debuts world's first fully 3D-printed building". Inhabitat. 24 May 2016. Retrieved 21.10. 2024