

УДК 725.4

**АРХІТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ БУДІВЕЛЬ
ПРИ 3D-ДРУЦІ: ПРОЄКТУВАННЯ, МАТЕРІАЛИ, ЕФЕКТИВНІСТЬ
(ЧАСТИНА ПЕРША – ОГЛЯД)**

**ARCHITECTURAL AND STRUCTURAL ELEMENTS OF BUILDINGS
IN 3D PRINTING: DESIGN, MATERIALS, EFFICIENCY
(PART ONE - OVERVIEW)**

Keywords: 3D printing, adaptive manufacturing, computational design, performance evaluation, building elements.

Ключові слова: 3D-друк, адаптивне виробництво, обчислювальний дизайн, оцінка ефективності, елементи будівлі.

*Ph.D., senior lecturer at the Department
of Architectural Environment Design,
Lviv Polytechnic National University, Lviv*

*канд. арх., доцент кафедри дизайну
архітектурного середовища, Національний
університет «Львівська політехніка», Львів*

<https://doi.org/10.23939/sa2024.01.073>

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of current approaches to 3D printing (3DP) of buildings and their elements, highlighting the potential of this technology to revolutionize the construction industry. The study focuses on three key areas: computer-aided design methods, manufacturing technologies using different materials, and performance evaluation methods. The Design section details innovative tools and methods used from conceptual design to the production of building components, including parametric design and the integration of performance indicators. «Technology and Materials» covers a wide range of engineering applications of various materials, including thermoplastics, clay-based materials, concrete, metal, and experimental materials such as glass and shape memory materials.

Special attention is paid to the environmental aspect of 3D printing in construction. The potential of this technology to reduce waste, optimize the use of materials and energy, and create more energy-efficient building structures is analyzed. Innovative approaches, such as the use of recycled materials and the development of environmentally friendly building mixtures for 3D printing, are considered.

The chapter «Performance Evaluation» critically analyzes current strategies for evaluating 3DP buildings, including standardization, modeling, and life cycle assessment, emphasizing the need for new approaches to modeling complex 3DP structures. The article also provides an in-depth look at the challenges and prospects of 3DP in construction, including scalability, economic feasibility, and environmental impact, emphasizing the potential of this technology to create more efficient and sustainable building solutions. This study is the first part of a broader analysis that lays the conceptual foundation for further exploration and implementation of 3D printing in architecture and construction.

Анотація

Стаття представляє комплексний аналіз сучасних підходів до 3D-друку (3DP) будівель та їх елементів, висвітлюючи потенціал цієї технології для революціонізації будівельної галузі. Дослідження зосереджується на трьох ключових напрямках: комп'ютерні методи проектування, технології виготовлення з використанням різних матеріалів та методики оцінки ефективності. У розділі «Проектування» детально розглядаються інноваційні інструменти та методи, що застосовуються від концептуального дизайну до виробництва будівельних компонентів, включаючи параметричне проектування та інтеграцію показників ефективності. «Технологія та матеріали» висвітлює широкий спектр можливостей інженерного застосування різних матеріалів, включаючи термопласти, матеріали на основі глини, бетон, метал та експериментальні матеріали, такі як скло та матеріали з пам'яттю форми.

Особлива увага приділяється екологічному аспекту 3D-друку в будівництві. Аналізується потенціал цієї технології для зменшення відходів, оптимізації використання матеріалів та енергії, а також можливості створення більш енергоефективних будівельних конструкцій. Розглядаються інноваційні підходи, такі як використання перероблених матеріалів та розробка екологічно чистих будівельних сумішей для 3D-друку.

Розділ «Оцінка ефективності» критично аналізує сучасні стратегії оцінювання 3DP-будівель, зокрема питання стандартизації, моделювання та оцінки життєвого циклу, підкреслюючи необхідність нових підходів до моделювання складних 3DP-структур. Стаття також ґрунтовно розглядає проблеми та перспективи 3DP у будівництві, зокрема питання масштабованості, економічної доцільності та екологічного впливу, наголошуючи на потенціалі цієї технології для створення більш ефективних та стійких будівельних рішень. Це дослідження є першою частиною більш широкого аналізу, що закладає концептуальну основу для подальшого вивчення та впровадження 3D-друку в архітектурі та будівництві.

Постановка проблеми

За минуле десятиріччя наукові розробки у сфері 3D-друку будівель, їх компонентів та частин (елементів будівель (BE (*англ. – building elements*)) фокусувалися на розробці масштабних 3D-друкованих (3DP (*англ. – 3D printed*)) процесів у секторі архітектури, інженерії та будівництва (AEC sector (*англ. – architectural, engineering, and construction*)) за допомогою різноманітних технологій. Це спричинило зростання усвідомлення громадськості, інвестицій від глобальних будівельних компаній у 3DP технології, а також появу стартапів, які спеціалізуються на 3DP. Тим не менше, дослідження, що стосуються 3DP BE, є відносно новою галуззю, яка здобула широку популярність лише за останнє десятиріччя.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На сьогодні існують глибокі наукові роботи щодо 3D-друку в AEC-секторі, які докладно висвітлюють аспекти його практичного використання. Серед них виділяються роботи таких науковців, як Н. Лабранте «Адитивне будівництво: сучасний стан, труднощі та можливості» (Labonnote, 2016), Дельгадо Камачо Д. «Застосування адитивного виробництва в будівництві: перспективний огляд» (Delgado Camacho, 2018) та Т. Д. Нго «Адитивне виробництво (3D-друк): огляд матеріалів, методів і труднощів» (Ngo, 2018). Проте ці дослідження в основному зосереджені на створенні дизайну різних форм, на великі структурні частини чи технічні деталі, не даючи комплексного огляду 3DP компонентів будівництва. Маємо зазначити, що жоден з цих наукових підходів не аналізує повний цикл процесу (від дизайну до виробництва і оцінки ефективності BE 3DP), а також не розглядає взаємозв'язок і критичну оцінку цих аспектів.

Мета статті

Цей аналіз представляє узагальнений огляд поточного розвитку 3D-друку будівель та їх компонентів (BE 3DP). Для зручності сприйняття велика кількість зібраної інформації була розділена автором на три ключові розділи: 1) комп'ютерні методики проектування для 3D-друкованих елементів будівництва; 2) технологічні процеси та матеріали для друку; 3) критерії оцінки ефективності (Leschok, 2023). У цьому аналізі робиться акцент на найновіші підходи до проектування, виробництва та методи оцінки BE 3DP. Автор підкреслює актуальність теми, вказуючи на основні виклики, прогалини у наукових розробках та перспективи для майбутнього. Різноманітні техніки 3DP розглянуто в контексті використаних матеріалів з метою вибору оптимальних для створення великих будівельних компонентів. У першій частині цього аналізу (тобто у цій статті) автор детально розглядає загальну концепцію дослідження, акцентуючи увагу на його ключових аспектах.

Виклад основного матеріалу

Архітектурно-конструктивні елементи будівель, такі як колони, фасади, покрівлі, стіни, є одними з найвідповідальнішими та складними елементами будівлі. Окрім визначення архітектурного виразу будівлі, елементи будівлі – її архітектурно-конструктивна оболонка – є межею між зовнішнім і внутрішнім середовищем, контролюючи потік енергії та матерії ззовні у внутрішній простір (рис. 1). З цієї причини вони мають значний вплив на комфорт користувача, умови навколишнього середовища в приміщенні та енергетичну ефективність будівель (Ghaffarian Hoseini, 2013). Таким чином, покращення ефективності оболонки будівлі має важливе значення для досягнення цілей чистих нульових викидів до 2050 року (IEA, 2021).

Щоб досягти високого рівня ефективності та функціональності, поточні елементи будівель переоцінюються. Основна увага приділяється розробці інтегрованих будівельних компонентів, адаптованих до використання у будівлі. Звичайні елементи оболонки будівлі зазвичай мають стандартизовані та однорідні властивості, оскільки їх збирають з використанням кількох стандартизованих компонентів масового виробництва. Цей факт обмежує їх здатність пристосовуватись до конкретних умов навколишнього середовища та можливість переробки.



*Рис. 1. Павільйон «Кабіна курйозів» (Cabin of Curiosities) в Окленді (2018).
Архітектори: Rael San Fratello Architects. Глазурована 3D-друкована керамічна система облицювання, яка
служить екраном від дощу. 3D-друкована керамічна система із інноваційними матеріалами добавок для
великомасштабного виробництва: сіль, ґрунт, цемент і шардоне.
Загальний вигляд спереду; елемент фронтону*

Це дослідження структуровано на чотири основних розділи, де кожний, в свою чергу, деталізує та розкриває мету дослідження.

Розділ 1. Розділ розкриває та висвітлює найвідоміші підходи до проектування BE 3DP, детально розглядаючи тему обчислювального проектування та інтеграції продуктивності;

Розділ 2. Розділ присвячений матеріалам і процесам виготовлення. Для кожної групи матеріалів представлені останні розробки щодо виготовлення та інтеграції продуктивності. Кожен підрозділ завершується аналізом прогалин в знаннях, майбутніми можливостями та векторами досліджень.

Розділі 3. У розділі представлені стратегії оцінки ефективності BE 3DP. Моделювання та аналіз життєвого циклу визначені як важливі елементи при проектуванні та будівництві BE 3DP. Крім того, перераховано проблеми перевірки продуктивності BE 3DP за допомогою експериментального прототипування.

Розділ 4. Розділ висвітлює проблеми, обмеження та майбутні можливості BE 3DP.

1. Проектування та дизайн для BE 3DP

3DP (або адитивне виробництво (AM)) пропонує нові можливості з точки зору геометричної свободи та складності. Разом із цими можливостями постають також проблеми проектування процесів 3DP. Традиційні інструменти та методи проектування неадекватні таким складним виробничим процесам.

1.1. Обчислювальний дизайн

Проектування BE 3DP є складним завданням через безліч виробничих та екологічних параметрів, які необхідно інтегрувати в процес. З цієї причини обчислювальні інструменти є обов'язковими для пристосування до підвищеної складності. Такі інструменти повинні враховувати зв'язки між декількома змінними проектування, такими як екологічні показники в ітеративній генерації альтернатив проектування (García-Dominguez, 2020). Параметричне проектування може запропонувати ітераційні рішення за допомогою обчислювальних інструментів, таких як Grasshopper (GH) та Dypato, які безпосередньо інтегровані в програмне забезпечення для 3D-моделювання. Крім того, параметричне проектування часто поєднується з інструментами оптимізації

продуктивності, які полегшують дослідження оптимізованих дизайнів елементів будівлі 3DP. Крім того, із збільшенням обчислювального досвіду архітекторів та інженерів, залучення до прикладних програмних інтерфейсів (API) і комплектів розробки програмного забезпечення (SDK) вже принесло гнучкість у користуванні програмним забезпеченням для моделювання BE 3DP.

1.2. Інтеграція продуктивності

Інтеграція показників ефективності в обчислювальний проєкт є важливою для створення індивідуального для конкретного місця, стійкого та економічно ефективного BE 3DP. Ці показники ефективності можна інтегрувати з інструментами оптимізації, які включають параметри навколишнього середовища, такі як денне світло, а також міцність конструкції, теплопровідні та несучі параметри. Щоб інтегрувати аспекти екологічної ефективності в процес проєктування, необхідно враховували кілька факторів, що залежать від клімату. Наприклад, Ф. Кравейро (Craveiro, 2020) показали, як 3DP-параметри виготовлення бетонних стін можуть включати модуль дизайну матеріалу з різними типами пробково-бетонних заповнювачів. Агрегат має термомеханічні характеристики, призначені для окремих частин геометрії. Крім теплових характеристик, вартість і ефективність виготовлення також можуть бути включені як показники продуктивності у процес проєктування. Інженер С. Мостафаві (Mostafavi, 2016) представив робочий процес проєктування для оптимізованого розподілу матеріалу в роботизованому процесі виготовлення. Подібним чином інженер Р. Набоні (Naboni, 2019) розробив робочий процес алгоритмічного проєктування для матеріальної та структурної топологічної оптимізації на багатьох взаємозалежних масштабах у Trabeculae Pavilion.

1.3. Деталізований проєкт виготовлення

Матеріали та методи виготовлення є важливими параметрами для виготовлення BE 3DP з віртуального проєкту у фізичний прототип. Процес, за допомогою якого поведінка матеріалу, параметри виготовлення та геометрія інтегруються в метод обчислювального проєктування, відомий як планування траєкторії інструменту або нарізка. Розрізання – це процес контурної обробки 3D-моделі кінцевого об'єкта (наприклад, формат файлу STL) на окремі шари. З цієї інформації на основі шару створюється кінцевий шлях інструменту, наприклад G-код. Старі процеси 3DP створюють виробничі дані та траєкторії за допомогою власного програмного забезпечення для нарізки. Деяке програмне забезпечення для нарізки підтримує новий формат даних, який називають файлом додаткового виробництва (AMF). AMF містить додаткову інформацію порівняно зі стандартним форматом файлу тріангуляції. Шляхи друку часто створюються на основі налаштованих обчислювальних інструментів для нових процесів, таких як бетон 3DP або великомасштабна екструзія полімерів. Шлях інструмента можна визначити за допомогою коду робота, наприклад RapidCode або KRL, який містить шлях друку, орієнтацію інструмента, швидкість і прискорення (Leschok, 2023).

2. Процеси виробництва, матеріали та застосування

2.1. Термопласти

Полімери можна 3D-друкувати за допомогою різноманітних процесів, таких як екструзія матеріалу, стереолітографія, багатоструменевий синтез, PolyJet, селективне лазерне спікання та цифрова обробка світла (Arefin, 2021). Ці процеси використовують різні полімерні базові матеріали для створення 3D-геометрії, починаючи від малих і закінчуючи великомасштабними прототипами (рис. 2). Ця частина дослідження присвячена процесам екструзії матеріалів, які використовують термопластичні полімери для створення тривимірних об'єктів. Основна перевага цієї технології полягає в тому, що це єдина технологія 3DP, яка може створювати напівпрозорі або майже прозорі компоненти у великих масштабах. Термопластична екструзія використовує полімерні нитки або гранульовані полімерні матеріали як сировину для 3D-друку. Найбільшу установку для екструзії термопластів на сьогодні можна знайти в Компанії Thermwood (30×6,7×3 м). Ці системи актуальні для архітектури завдяки розмірам виготовлення та продуктивності (до 68,0 кг/год) і конкурентоспроможній ціні установки.

2.2. Матеріали на основі глини

3DP матеріалів на основі глини містить широкий спектр підходів до будівництва екологічно чистих елементів будівлі. Матеріали на основі глини належать до глини, саману, глини та утрамбованої глини (Goma, 2022). Ці матеріали, як правило, складаються з глини, гравію, піску, мулу та води, іноді з додатковими волокнами та стабілізаторами. Техніка виготовлення цих матеріалів залежить від типу матеріалу та вимог до обробки (Perrot, 2018) (рис. 3). Саман і зелену глину можна використовувати при допомозі екструзії матеріалу, ущільнення та формування (Wolf, 2022). Кераміку можна виготовляти в два етапи: спочатку глиняне зелене тіло виготовляється цифровим способом, а потім обпалюється на другому етапі для затвердіння. Оскільки кераміка потребує процесу спікання, вони можуть бути виготовлені за допомогою струминної обробки сполучного матеріалу, цифрової обробки світла, плавлення шару порошку, екструзії матеріалу та ламінування листів. У BE 3DP з матеріалів на основі глини є перевагою, оскільки можна використовувати місцеві матеріали. Вони можуть варіюватися від дрібних елементів, таких як плитка або цегла (Abdallah, 2021), до великих зовнішніх стін (Cucinella, 2021).

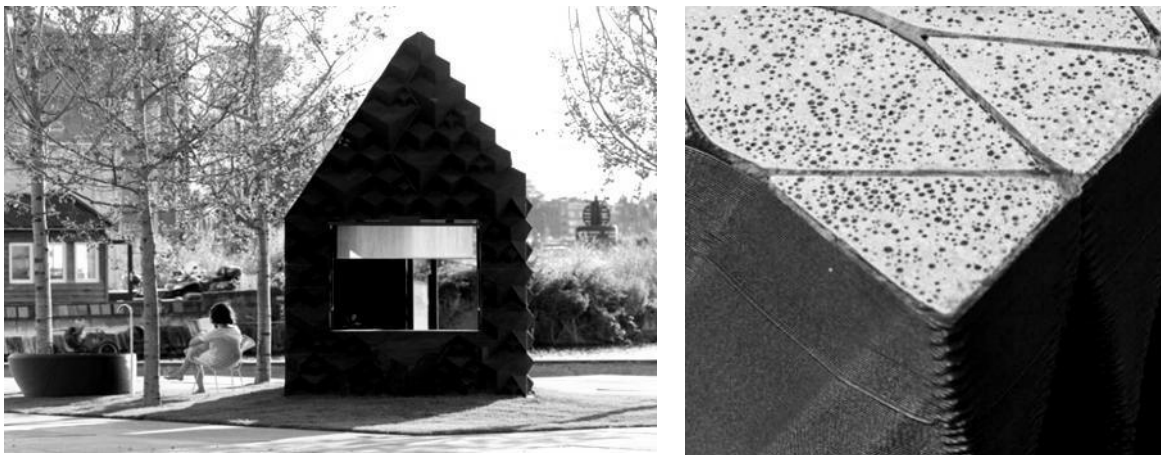


Рис. 2. Павільйон «Міська кабіна» (Urban Cabin) в Амстердамі (2015).
Архітектори: DUS Architects. Полімерний 3D-друкований фасад у поєднанні з литим легким полістиролбетоном. Загальний вигляд спереду; елемент стіни в розрізі

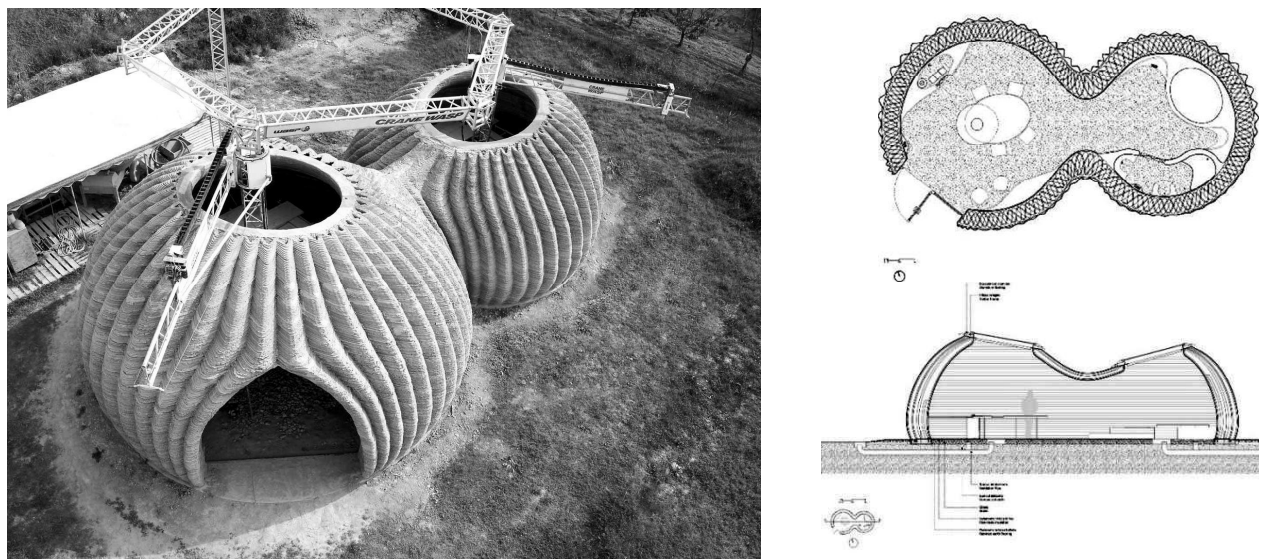


Рис. 3. Технологія TECLA та 3D-друкований будинок із глини (2021).
Архітектори: Маріо Кучінілла (Mario Cucinella Architects). Будинок, побудований із сирі землі у процесі екструзії матеріалу. Загальний вигляд зверху під час будівництва, план та розріз

2.3. Бетон

За останні два десятиліття 3DP бетону привернуло підвищену увагу дослідницької спільноти, а також промисловості. Зрілість цього методу 3DP демонструється великою кількістю стартапів (наприклад, Xtree, Aeditve, COBOD, WASP) і будівельних компаній, які зосереджуються на цій специфічній частині 3DP для АЕС, таких як PERI та SICA. Бетон може бути 3DP з використанням різних підходів, таких як 3DP на основі екструзії, торкретування, заливання бетону в опалубку 3DP, обрана активація цементу або 3DP пінобетону (Furet, 2019) (рис. 4). Повний огляд різних методів виготовлення бетону 3DP можна знайти в роботі Т. Ванглер та ін. «Цифровий бетон: можливості та виклики» (Wangler, 2016). Вплив бетону 3DP на навколишнє середовище значною мірою визначається його зв'язуючим агентом і схемою будівництва, що використовується. Високий вміст цементу в бетоні 3DP збільшує втілену енергію друкованого об'єкта, тому досліджуються альтернативні сполучні речовини (Mohammad, 2020). Паралельно досліджується потенціал перероблених заповнювачів (Xiao, 2020, 2021).

2.4. Метал

Метал 3DP поступово впроваджується в будівельній, біомедичній, аерокосмічній, автомобільній та морській промисловості (Buchanan, 2019). Для цієї техніки зазвичай використовують метал і сплави у вигляді порошку або дроту (Das, 2016). Ці матеріали розплавляються джерелом високої енергії в пошаровому осадженні з утворенням твердої частини. Для металу 3DP можна використовувати різні процеси. Самими демонстраційними методами є сплавлення порошкового шару, пряме осадження енергії (DED), струменеве сполучне, ламінування листів, екструзія матеріалу та стереолітографія (Duda, 2016). Для великомасштабного виготовлення кілька проєктів продемонстрували потенціал металевого 3DP з DED як одним із найпоширеніших методів (рис.5). Наприклад, NASA 3DP з DED, камерою ракетної тяги, як частина проєкту Rapid Analysis and Manufacturing Propulsion Technology. MX3D виготовив металевий міст із дротяно-дуговим адитивним виробництвом (WAAM), що також є технікою DED (Gardner, 2020). Подібним чином художник Роланд Снукс разом з RMIT Architecture Tectonic Formation Lab і FormX Technology виготовили за допомогою WAAM масштабний металевий арт-об'єкт «Залишки майбутньої архітектури» (Remnants of a Future Architecture).

2.5. Альтернативні процеси

У цьому пункті представлено експериментальні матеріали та технології виготовлення, які, хоча й актуальні для BE 3DP застосування, все ще знаходяться на ранній стадії розробки та не досягли масштабу, актуального для архітектури. Такі обмеження вказують на те, що ці процеси належать до категорії майбутнього потенціалу. Альтернативні методи цього пункту включають 3D-друк на склі, самовідновлення (Gomez, 2021), самоочищення (Behera, 2022), уловлювання CO₂ (Gutierrez, 2021) і матеріали з пам'яттю форми (SMM). Як правило, SMM, також відомий як розумні матеріали, є матеріалами, які досліджуються найбільше, і їх класифікують як процеси 4D-друку. SMM реагують на різні активації механізми, такі як попередній натяг, або зміни вологи, температури, світла, струму або рівня pH.

2.5.1. Матеріали з пам'яттю форми

Виробничі принципи включають стратегії дизайну, спрямовані на модифікацію матеріалу та посилення геометрії. Наприклад, інженер Г. Юа досліджував 4D-друк для кліматично-специфічної оболонки будівлі. Двосторонній ефект пам'яті форми полімеру 3DP був проаналізований у маломасштабному прототипі, який продемонстрував надійну оборотність зміни форми (Yi, 2021). Іншим дизайнерським потенціалом для фасадного застосування є 3D-друк полімерів на текстилі, створюючи активні мембранні елементи та структури. Динамічне затінення для фасадів було досліджено з використанням 4D-друкованих актуаторів, які реагують на різні рівні вологості (Correa, 2015). Результати підтверджують потенціал механізмів із самозапуском для адаптивного дизайну фасадів.



Рис. 4. Двоповерховий будинок «Катр С» в Бельгії (2020).
Тривимірний друк бетону на місці: новий спосіб будівництва будинків. Університет Ghent, Veneens Construction & Interior, Saint-Gobain Weber Veatix. 3D-друкований будинок з різними стратегіями ізоляції. Загальний вигляд спереду; елемент стіни в розрізі



Рис. 5. Серійний вузол параметричного фасаду проєкту «HivE» в Німеччині (2021).
3D-друковані вузли фасадів з оптимізованою топологією «N-AM_Li3». Вузли параметрично генеруються за допомогою розробленого Lithium Designers GmbH (керівник док. А. Мохсен) програмного забезпечення «Li3M». Загальний вигляд вузла; змонтований каркас фасаду

2.5.2. 3D-друк скла

Незважаючи на сумнозвісні труднощі у формуванні скла через необхідні високі температури, воно було досліджено як матеріал для 3DP (Kotz, 2017).

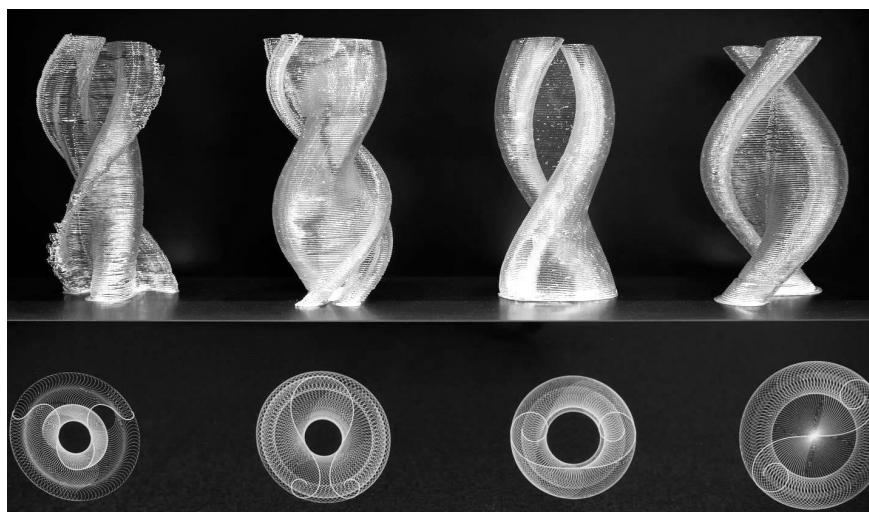


Рис. 6. Надруковані елементи із 3D-скла (2022).
Скло 3DP, Maple Glass Printing Ltd. Демонстрація комерціалізації технології 3D-друку з переробленого скла. Презентаційний матеріал

Тривимірний друк скла включає різноманітні методики: стереолітографія (SLA) і цифрова обробка світла (DLP), селективне лазерне спікання/плавлення, пряме написання чорнилом і фотополімеризація в кубі (Zhang, 2021). Ці методи дозволяють виготовляти складні компоненти з високою роздільною здатністю для оптичних і мікрофлюїдних застосувань (див. рис. 6).

3. Оцінка ефективності 3DP елементів будівель та фасадів

Сучасні дослідження в галузі 3D-друку в архітектурі та будівництві демонструють ітераційні робочі процеси, які інтегрують основні характеристики фасадів у процес проектування. Переглянуті дослідження підкреслюють труднощі, пов'язані з інтеграцією та вимірюванням показників ефективності елементів будівлі та фасадів 3DP. Незалежно від комбінації матеріалів і технологій, дослідники та дизайнери стикаються з подібними проблемами, коли справа доходить до кількісної оцінки термооптичних характеристик, стійкості до погодних умов і довговічності елементів, виконаних 3DP.

3.1. Показники ефективності та нормативи

Оскільки для елементів будівлі та фасадів 3DP не встановлено жодного конкретного стандарту виготовлення, дотримання існуючих норм є складним завданням, і потрібне широке тестування (Pessoa, 2021). Тому для ефективної оцінки продуктивності слід використовувати комбінацію аналітичних, обчислювальних та експериментальних методів. Окрім продуктивності, вплив на навколишнє середовище стає вирішальним аспектом у дизайні елементів будівлі та фасадів (Wiberg, 2019). Застосування LCA (Оцінка життєвого циклу (*англ. Life cycle assessment*)) до будівельних компонентів 3DP зараз знаходиться на ранній стадії. Однак деякі дослідження показують, що процес виготовлення мінімально впливає на загальний вплив компонентів на навколишнє середовище (Agustí-Juan, 2017).

3.2. Необхідність нових підходів до моделювання

Як було зазначено в попередньому пункті, проблеми оцінки продуктивності деталей 3DP пов'язані зі складною взаємодією між матеріалом, геометрією та виготовленням. На першому рівні властивості матеріалів 3DP залежать від процесу виготовлення. Екструзія та подальше пошарове осадження матеріалу спричиняють зміни у властивостях матеріалу та анізотропії, тому термічні, механічні, електричні та оптичні характеристики матеріалу 3DP відрізняються від поведінки твердого матеріалу (Zohdi, 2021). Крім того, геометрична нерегулярність (неточність), спричинена АМ (Адитивне виробництво), може мати важливий вплив на їх механічну поведінку (Laghi, 2021). Для елементів будівлі та фасадів 3DP структурна анізотропія була ґрунтовно досліджена, і різні дослідження демонструють, як це можна проваджувати в дизайні майбутніх компонентів (Kyvelou, 2020). Вплив параметрів виготовлення на інші властивості, такі як теплопровідність, оптичні властивості та електричну ізоляцію, в основному досліджується за межами будівельної області. Моделювання продуктивності 3DP-компонентів будівлі може отримати значну користь від впровадження добре відомих методів з інших галузей, таких як автомобільна, аерокосмічна промисловість та інженерія матеріалів.

Висновки

4.1. Оцінка дизайну та продуктивності

Ми визначили, що більшість рецензованих статей, як правило, встановлюють робочі процеси та методології для конкретних проектів, оскільки до цього часу не існує комплексного стандартизованого програмного забезпечення для проектування, друку чи інструменту оцінки. Більшість досліджень проводиться за допомогою власно розроблених процесів, включаючи апаратне забезпечення, матеріали для друку та програмне забезпечення. Цей процес призводить до відсутності узагальненої бази даних для дослідників для порівняння властивостей матеріалів, параметрів друку або вимірювань продуктивності.

4.2. Зрілість виробництва та потенційна комерціалізація

За останні кілька років технології 3DP стали більш зрілими та комерційно доступними. Існує тенденція відходу від власно розробленого обладнання для 3D-друку до комерційно доступних систем, що досі перешкоджало відтворюваності та порівнянності експериментальних результатів.

Тепер дослідження можна зосередити на більш пов'язаних із елементами будівель та фасадами дослідженнях, таких як розробка матеріалів, випробування стійкості до погодних умов або старіння об'єктів ЗДР. Крім того, комерціалізація великомасштабного ЗДР-обладнання дозволить полегшити доступ і розширити дослідницьку діяльність, що зрештою збільшить порівняльні дослідження та обмін даними.

4.3. Стійкість і вплив

Нагальна проблема декарбонізації будівельного сектору веде будівельну галузь до більш продуктивних і стійких будівельних компонентів і систем. Автор вважає, що ЗДР може сприяти цьому переходу, створюючи високоефективні фасадні компоненти для конкретного місця з низьким впливом на навколишнє середовище.

4.4. Висновок

Питання про справжню додану цінність ЗДР для застосування при виготовленні елементів будівель та фасадів залишається відкритим, оскільки потенційні переваги потребують вирішення проблем щодо масштабованості та економічної виправданості. Автор вважає, що така недостатня розробка пов'язана з тим, що широкомасштабні методи ЗДР лише нещодавно стали доступними для широкої аудиторії.

References

- Abdallah Y. K., Estévez A. T. (2021). 3D-printed biodigital clay bricks. *Biomimetics*, 6, p. 59. URL: <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040059>
- Agustí-Juan I., Habert G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *J. Clean. Prod.*, 142, p. 2780–2791. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.190>
- Arefin A. M. E., Khatri N. R., Kulkarni N., Egan P. F. (2021). Polymer 3D printing review: materials, process, and design strategies for medical applications. *Polymers*, 13, p. 1499. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13091499>
- Behera A., Rajak D. K., Jeyasubramanian K. (2022). Chapter 19 - fabrication of nanostructures with excellent self-cleaning properties. S. Thomas, N. Kalarikkal, A.R. Abraham (Eds.). *Design, Fabrication, and Characterization of Multifunctional Nanomaterials*, Elsevier, p. 449-478. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820558-7.00014-5>
- Buchanan C., Gardner L. (2019). Metal 3D printing in construction: a review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Eng. Struct.*, 180, p. 332-348. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>
- Correa D., Papadopoulou A., Guberan C., Jhaveri N., Reichert S., Menges A., Tibbits S. (2015). 3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations, *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2, p. 106–116. URL: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>
- Craveiro F., Nazarian S., Bartolo H., Bartolo P. J., Pinto Duarte J. (2020). An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials. *Addit. Manufact.*, 33, p. 101146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101146>
- Cucinella M. (2021). TECLA Technology and Clay 3D Printed House / Mario Cucinella Architects. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/960714/tecla-technology-and-clay-3d-printed-house-mario-cucinella-architects> [Date of reference: 16.10.2023].
- Das S., Bourell D. L., Babu S. S. (2016). Metallic materials for 3D printing. *Mater. Res. Soc. (MRS) Bull.*, 41, p. 729–741. URL: <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.217>
- Delgado Camacho D., Clayton P., O'Brien W. J., Seepersad C., Juenger M., Ferron R., Salamone S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry – a forward-looking review. *Autom. Constr.*, 89, p. 110–119. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>
- Duda T., Raghavan L.V. (2016). 3D metal printing technology. *Int. Fed. Automat. Control-PapersOnLine*, 49, p. 103–110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>
- IEA. Building Envelopes – *Tracking Report*. – Retrieved from <https://www.iea.org/reports/building-envelopes> (2021). [Date of reference: 16.10.2023].
- Furet B., Poullain P., Garnier S. (2019). 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. *Addit. Manufact.*, 28, p. 58–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.002>
- García-Dominguez A., Claver J., Sebastián M.A. (2020). Integration of additive manufacturing, parametric design, and optimization of parts obtained by fused deposition modeling (FDM). *A methodological approach. Polymers.*, 12, p. 1993. URL: <https://doi.org/10.3390/polym12091993>
- Gardner L., Kyvelou P., Herbert G., Buchanan C. (2020). Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *J. Constr. Steel Res.*, 172, p. 106233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106233>
- Ghaffarian Hoseini A., Berardi U., Ali G., Makaremi N. (2013). Intelligent facades in low-energy buildings. *Int. J. Environ. Clim. Change*, 2, p. 437–464. URL: <https://doi.org/10.9734/BJECC/2012/2912>

- Gomez E. F., Wanasinghe S. V., Flynn A. E., Dodo O. J., Sparks J. L., Baldwin L. A., Tabor C. E., Durstock M. F., Konkolewicz D., Thrasher C. J. (2021). 3D-printed self-healing elastomers for modular soft robotics. *Am. Chem. Soc. Appl. Mater. Interf.*, 13, p. 28870–28877. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06419>
- Gomaa M., Jabi W., Soebarto V., Xie Y. M. (2022). Digital manufacturing for earth construction: a critical review. *J. Clean. Prod.*, 338, p. 130630. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130630>
- Gutierrez D. B., Caldona E. B., Espiritu R. D., Advincula R. C. (2021). The potential of additively manufactured membranes for selective separation and capture of CO₂. *Mater. Res. Soc. Commun.*, 11, p. 391–401. URL: <https://doi.org/10.1557/s43579-021-00062-8>
- Kotz F., Arnold K., Bauer W., Schild D., Keller N., Sachsenheimer K., Nargang T. M., Richter C., Helmer D., Rapp B.E. (2017). Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature.*, 544, p. 337–339. URL: <https://doi.org/10.1038/nature22061>
- Kyvelou P., Slack H., Daskalaki Mountanou D., Wadee M. A., Britton T. B., Buchanan C., Gardner L. (2020). Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. *Mater. Des.*, 192, p. 108675. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108675>
- Labonnote N., Rønquist A., Manum B., Rütther P. (2016). Additive construction: state-of-the-art, challenges and opportunities. *Autom. Constr.*, 72, p. 347–366. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
- Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Girelli V.A., Trombetti T. (2021). On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of wire-and-arc additively manufactured planar elements. *J. Constr. Steel Res.*, 178, p. 106490. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106490>
- Leschok M., Cheibas I., Piccioni V., Seshadri B., Schlüter A., Gramazio F., Kohler M., Dillenburger B. (2023). 3D printing facades: Design, fabrication, and assessment methods. *Autom. Constr.*, 152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104918>
- Mohammad M., Masad E., Al-Ghamdi S.G. (2020). 3D concrete printing sustainability: a comparative life cycle assessment of four construction method scenarios. *Buildings.*, 10, p. 245. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings10120245>
- Mostafavi S., Bier H. (2016). Materially informed design to robotic production: A robotic 3D printing system for informed material deposition. Reinhardt D., Saunders R., Burry J. (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 2016. Springer International Publishing, Cham, p. 338–349. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_27
- Naboni R., Brescghello L., Kunic A. (2019). Multi-scale design and fabrication of the trabeculae pavilion. *Addit. Manufact.*, 27, p. 305–317. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.005>
- Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B*, 143, p. 172–196. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Pessoa S., Guimarães A. S., Lucas S. S., Simões N. (2021). 3D printing in the construction industry – a systematic review of the thermal performance in buildings. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 141, p. 110794. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794>
- Perrot A., Rangeard D., Courteille E. (2018). 3D printing of earth-based materials: processing aspects. *Constr. Build. Mater.*, 172, p. 670–676. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>
- Wiberg A., Persson J., Ölvander J. (2019) Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software. *Rapid Prototyp. J.*, 25, p. 1080–1094. URL: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0262>
- Wolf A., Rosendahl P.L., Knaack U. (2022). Additive manufacturing of clay and ceramic building components. *Autom. Constr.*, 133, p. 103956. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103956>
- Xiao J., Zou S., Ding T., Duan Z., Liu Q. (2021). Fiber-reinforced mortar with 100% recycled fine aggregates: a cleaner perspective on 3D printing. *J. Clean. Prod.*, 319, p. 128720. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128720>
- Xiao J., Zou S., Yu Y., Wang Y., Ding T., Zhu Y., Yu J., Li S., Duan Z., Wu Y., Li L. (2020). 3D recycled mortar printing: system development, process design, material properties and on-site printing. *J. Build. Eng.*, 32, p. 101779. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101779>
- Yi H., Kim Y. (2021). Prototyping of 4D-printed self-shaping building skin in architecture: design, fabrication, and investigation of a two-way shape memory composite (TWSMC) façade panel. *J. Build. Eng.*, 43, p. 103076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103076>
- Zhang D., Liu X., Qiu J. (2021). 3D printing of glass by additive manufacturing techniques: a review. *Front. Optoelectron.*, 14, p. 263–277. URL: <https://doi.org/10.1007/s12200-020-1009-z>
- Zohdi N., Yang R. (2021). Material anisotropy in additively manufactured polymers and polymer composites: a review. *Polymers.*, 13, p. 3368. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13193368>