

Комишев Д. Г., професор, академік Інженерної академії України, спеціально призначений експерт школи будівництва (North Minzu University, dmytrokomyshev@outlook.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6162-1532>), **Белятинський А. О., професор (North Minzu University, <https://orcid.org/0000-0002-2158-512X>)**

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ: 3D-ДРУК БУДІВЕЛЬ, МОБІЛЬНІ ПРОГРАМИ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

Стаття містить огляд світового досвіду використання адитивних технологій у будівельній сфері на засадах використання 3D-друку будівель. Застосування 3D-друку дозволяє реалізувати архітектурні проекти будь-якої складності, зменшити обсяг виробничих відходів, скоротити дефіцит житлового фонду та знизити матеріальні, енергетичні та трудові витрати на будівництво. У статті аналізуються основні види і специфікація 3D-принтерів, що використовуються для друку будівель та споруд, та їх відмінні характеристики. Також досліджено питання про матеріали, які застосовуються для виготовлення будівельної суміші. Окрема увага приділена оцінці сучасного стану 3D-друку у світі. Основними завданнями дослідження є: популяризація адитивних технологій в Україні, сприяння впровадженню інноваційних методів будівництва та розробка рекомендацій і практичних форматів використання 3D-друку будівель.

Ключові слова: будівельне виробництво; адитивні технології; 3D-друк; будівельний принтер; екструдкування; будівельний майданчик.

Постановка проблеми. Сьогодні будівництво є ключовою галуззю, яка відіграє важливу роль у розвитку економіки та забезпеченні комфорту населення. Ця сфера є однією з провідних у створенні робочих місць, як у межах країни, так і на міжнародному рівні. Водночас сучасні стандарти у будівництві передбачають удосконалення технологій та значні зміни у будівельному процесі. Незважаючи на повільний рух змін, поступово у використанні

будівельних матеріалів та технологій відбувається інновація, що покращує комфорт, екологічність та економічність використання. Наприклад, застосування адитивних технологій у будівництві, таких як 3D-друк на будмайданчиках, є перспективним напрямком, який дозволяє зменшити потребу у робочій силі та мінімізувати ризики на виробництві.

Технологія 3D-друку у будівництві приваблює увагу експертів уже декілька років. Важливо відмітити, що наразі будівельна галузь ще не досягла повної автоматизації. Використання 3D-принтерів у цій сфері відкрило можливості не лише для створення дрібних елементів, таких як будівельні блоки чи декоративні деталі, але й для зведення більш масштабних та захисних конструкцій. Цей підхід дозволяє будувати складніші об'єкти з меншими витратами часу, матеріалів та праці. Незважаючи на вже існуючі успішні проекти малих архітектурних форм і індивідуальних житлових будинків, здійснені за допомогою цієї технології, як в Україні, так і за кордоном, її дослідження та розвиток все ще необхідні. Це допоможе розширити область застосування технології, поліпшивши якість будівельних робіт.

Аналіз останніх публікацій на тему дослідження. У сучасних наукових дослідженнях: Андрійчук О., Оласюк П. [1], Шатов С., Савицький М., Голубченко О., Мацюк І., Шляхов Е. [5], Хагер І., Голонка А., Путановіч Р. [8], присвячених новітнім технологіям у будівельній галузі, визначено, що однією з ключових сучасних технологій є 3D-друк бетону, також відомий як адитивне виробництво. Це включає друк 3D-елементів будівель на місці будівництва, використовуючи комп'ютеризовану цифрову модель.

Значення та вплив 3D-принтерів на виробництво бетонних конструкцій та підвищення ефективності будівельних проектів були детально розглянуті у ряді наукових публікацій Кухудзай Р. [10], Тей Ю., Панда Б., Пол С., Нур М., Тан М. Леонг К. [14], Вулфс Р. Дж. М., Босс Ф., Салет Т. [16]. Ці дослідження показали, що адитивне виробництво може принести значну економію ресурсів, зокрема, зменшити трудомісткість та час виконання робіт. Окрім того, такі методи позитивно впливають на екологічну безпеку, зменшуючи кількість відходів будівельних матеріалів, викидів парникових газів та споживання енергії. Ці фактори в сукупності вважаються важливими для успішної реалізації будівельних проектів.

Згідно з дослідженнями Ліпсон Н., Курман М. [11], Згалат-

Лозинський О. Згалат-Лозинська Л. [17], однією з головних цілей у секторі будівництва є встановлення такої моделі виробничого процесу, яка забезпечить оптимальну ефективність та раціональність у використанні ресурсів, а також створить умови для економічно ефективного виробництва. Використання адитивних технологій, включаючи будівельний 3D-принтер, вважається одним із можливих способів досягнення цих завдань.

Мета роботи. Дослідити та оцінити вплив інноваційних технологій на галузь будівництва, з особливим акцентом на 3D-друк будівель, використання мобільних програм та застосування штучного інтелекту.

Задачі дослідження:

– проаналізувати сучасний стан і потенціал 3D-друку у будівництві, зокрема, оцінити його переваги та обмеження, а також можливості для масового використання.

– розглянути вплив штучного інтелекту на будівельну галузь, включаючи його застосування в автоматизації, покращення процесів проектування та управління будівельними проектами.

– оцінити потенційні виклики та перешкоди, які можуть виникати при інтеграції цих інноваційних технологій в будівельну індустрію.

– запропонувати напрямки для подальших досліджень та розвитку в області застосування інноваційних технологій у будівництві.

Виклад результатів дослідження. На сьогодні існує кілька термінів, які описують цю технологію: 3D-друк будівель, зведення конструкцій за допомогою трирозмірного 3D-принтера, створення будівель за допомогою адитивного методу, а також зведення будівель методом екструдуювання. Використання 3D-друку у будівництві застосовується як для простих, так і для складних архітектурних форм, виробництва збірних елементів будівель, створення малих архітектурних форм та благоустрою територій. Сучасні цифрові моделі будівель інтегруються в будівельне виробництво, де 3D-принтери використовуються для виготовлення будівельних конструкцій шляхом екструдуювання бетонної суміші, наносячи її шар за шаром згідно з програмним контуром будівельної конструкції, тим самим «друкуючи» будівлю. Пошарове екструдуювання наразі є домінуючим методом більшості будівельних

принтерів. Процес полягає в тому, що робоче сопло або екструдер 3D-принтера видавлює швидкотверднучу бетонну суміш з добавками, які покращують властивості майбутньої конструкції [11].

Технологія 3D-друку будинків втілюється за допомогою 3D-принтера, що має форму крана-маніпулятора і встановлюється безпосередньо на будівельному майданчику. Ці 3D-принтери мають структуру, яка нагадує звичайні струминні принтери, що використовуються в офісах. На комп'ютері встановлюють спеціальне програмне забезпечення, яке передає принтеру дані про кінцевий розмір проекту. Після врегулювання всіх параметрів запускається принтер, і на будівельному майданчику роботизований кран-маніпулятор починає формувати конструкцію відповідно до проектного плану. Для друку часто використовуються такі матеріали, як рідкі метали, пластик, цемент, а також інші матеріали, які мають здатність затвердіти і застигнути після охолодження [17].

Програмне забезпечення надсилає команди пристрою, вказуючи, де і як надрукувати матеріал. Починається процес накладання матеріалу шарами відповідно до плану, тим самим формуючи конструкцію. Екструдер витісняє швидкозатвердіваючу бетонну суміш з різноманітними добавками. Кожен наступний шар розміщується на попередній, створюючи вертикальну структуру. Нижні шари бетону в результаті ущільнюються, збільшуючи їх здатність витримувати вагу надбудованих шарів, тим самим формуючи міцність всієї конструкції [8]. Кожен наступний шар наноситься 3D-принтером поверх попереднього, що дозволяє сформувати задану конструкцію (рис. 1).

На сучасному етапі адитивні технології, які розвинулися від 3D-друку макетів і швидкого прототипування до виробництва готових продуктів для різноманітних промислових секторів, залучають все більше інвестицій. Підвищений інтерес до цих технологій обумовлений рядом факторів: високий ступінь автоматизації виробничих процесів, поліпшення якості продукції, прискорення циклів створення, можливість оптимізації CAD-моделей, зменшення обсягу виробничих відходів. Ці аспекти є ключовими для розвитку концепції «цифрових фабрик» майбутнього, яка передбачає цифровізацію проектування, виробництва, тестування, а також адитивне виробництво деталей і продукції в цілому. Існують два основних методи формування шару в адитивних технологіях: «Bed Deposition» та «Direct Deposition».

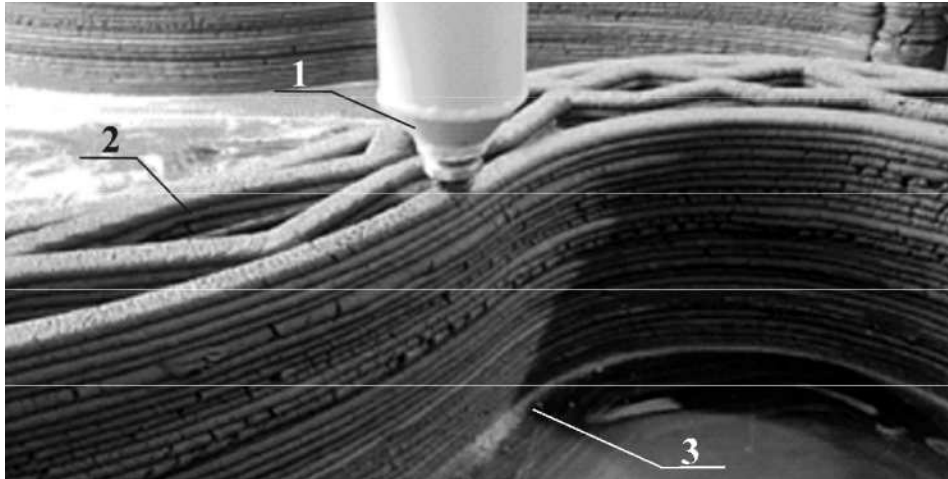


Рис. 1. Виготовлення огорожувальних конструкцій способом пошарового екструдуння за допомогою 3D-принтера: 1 – сопло (екструдер); 2 – огорожувальна конструкція, що виготовляється; 3 – основа [8]

«Bed Deposition» – це клас технологій, де на робочу поверхню наноситься шар порошку. Виготовлення виробу відбувається шар за шаром за допомогою джерела тепла: лазера (SLM), електронного променя (EBM), світла (DLP, SLA) або з використанням допоміжної речовини (Binder Jetting), згідно з поточним перерізом CAD-моделі. Після цього, надлишки порошку видаляються, робоча платформа зміщується і процес повторюється [16].

«Direct Deposition» – метод, при якому матеріал подається безпосередньо у місце зведення, згідно з CAD-моделлю. Як зазначено в [12], вартість опалубки становить від 35 до 60% від загальної вартості бетонних конструкцій. Можливість будувати бетонні конструкції без опалубки є важливою перевагою у плані зниження витрат, прискорення виробництва та архітектурної свободи, а також полегшення монтажу інженерних комунікацій. Адитивні технології відносять до класу екологічних технологій через майже повну відсутність відходів виробництва. Високий рівень автоматизації та роботизації дозволяє реалізувати проекти в агресивних умовах без ризику для здоров'я персоналу. Технологія Contour Crafting (CC) є однією з адитивних будівельних технологій, яка придатна для зведення великомасштабних об'єктів (рис. 2) [14].

Для 3D-друку можуть застосовуватися такі матеріали, як полімери, керамічний шлікер та бетон. Під час екструзії матеріалу

шпателі, розміщені на подаючому соплі, забезпечують створення рівної поверхні. Висота кожного шару визначається розмірами шпателя і повинна бути такою, щоб дозволити верхнім шарам починати затвердівати, маючи достатню несучу спроможність. Технологія «Contour Crafting» (CC) передбачає можливість проектування інженерних комунікацій всередині стінних порожнин, а також, за допомогою спеціального обладнання, прикріпленого до рами, автоматизувати роботи з прокладання цих комунікацій.

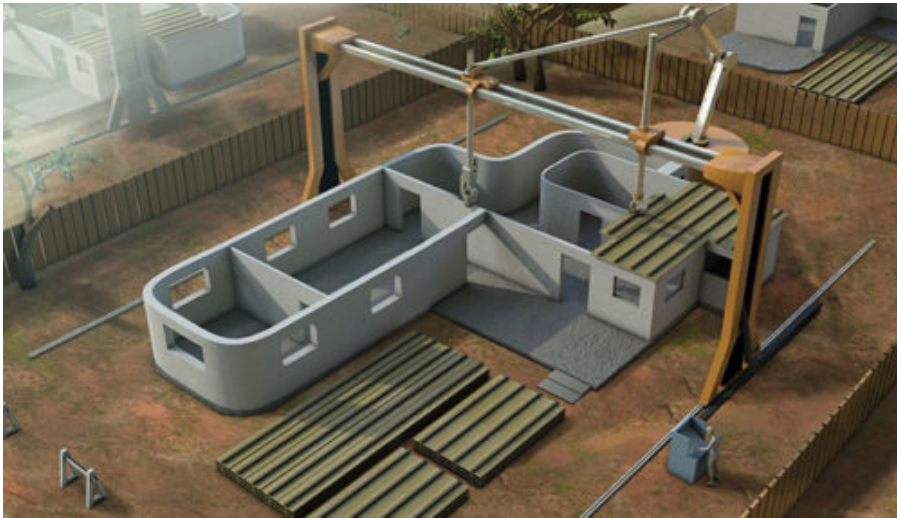


Рис. 2. 3D-Установка 3D-друку будівлі за технологією «Contour crafting» [15]

Пізніше була розроблена інша технологія будівельного 3D-друку, названа «Concrete Printing» (CP). Сама CP працює за аналогічним принципом з технологією CC, базуючись на пошаровій екструзії будівельної суміші. Основна відмінність від CC полягає в тому, що в методі CP на екструдері відсутні шпателі (рис. 3), що дозволяє створювати більш складні геометричні форми [13].



Рис. 3. Процес 3D-будівництва за технологією Concrete Printing [15]

Завдяки цій характеристиці, метод «Concrete Printing» (CP) вважається одним з найбільш перспективних у будівництві. Зростаюча потреба у створенні унікальних форм будівель і споруд робить цей напрямок все більш пріоритетним у цій галузі. CP працює за принципом, схожим на технологію CC, тобто заснований на пошаровій екструзії будівельної суміші. Відмінність від CC полягає в тому, що в CP на екструдері відсутні шпателі, що дозволяє створювати більш складні геометричні контури. Однак, відсутність шпателів на екструдері призводить до необхідності додаткової обробки поверхні надрукованої споруди.

Іншою відмінною технологією в адитивному будівництві є «D-Shape». Цей апарат працює на принципі зв'язування порошку, дозволяючи затверджувати шари матеріалу за допомогою сполучного. Шари піску наносяться з урахуванням необхідної товщини, після чого друкуюча головка розпилює краплі сполучної речовини, забезпечуючи затвердіння піску. Цей пристрій розміром 4x4 метри може створювати великі конструкції об'ємом до 6 кубометрів (рис. 4). Процес друку за допомогою цієї технології складається з трьох етапів: 1) розробка 3D-моделі об'єкта; 2) побудова об'єкта; 3) остаточна обробка об'єкта. Програмне забезпечення CAD-CAM та мобільний додаток керують процесом будівництва, виконуючи сканування поверхні та розпилення сполучної речовини.



Рис. 4. Будівельний 3D «D-Shape» принтер [6]

Відрізняючись від методів, описаних раніше, у цій технології екструдер подає не готову будівельну суміш, а клейову речовину на пісок чи інший порошковий матеріал. Під час друку об'єкта шар порошку товщиною 5–10 мм розподіляється рівномірно по друкарській області. Потім на цю поверхню наноситься клейова речовина, після чого наноситься черговий шар порошку відповідної товщини, і процес повторюється до завершення друку. На останньому етапі опорний шар порошку видаляється, а поверхня об'єкта піддається шліфуванню та поліруванню.

«World's Advanced Saving Project» (WASP) – це ініціатива, створена групою італійських дослідників та інженерів, метою якої є розробка технологій 3D-друку. WASP виготовляє професійні принтери з метою сприяння розвитку і застосування цієї технології, оптимізації виробничих процесів з метою вирішення проблеми енергоефективності, що є актуальною у сучасному світі. WASP розробили великогабаритний будівельний принтер «Big Delta» заввишки 12 м [2] (рис. 5).



Рис. 5. 3D-принтер «Big Delta» [6]

Однією з цілей WASP є зведення конструкцій з матеріалів, доступних у регіоні будівництва. Для досягнення цієї мети необхідний мобільний механізм з низьким споживанням енергії. Незважаючи на свої значні габарити, монтаж такого механізму займає близько години, при цьому для живлення принтера можна використовувати сонячні панелі. Завдяки обертовому соплу, матеріал не лише видавлюється, але і змішується при виході, що робить конструкцію більш міцною. Також WASP розробили новий дизайн екструдера, який може втягувати надлишки екструдованого матеріалу [1].

Дослідження врахували можливість інтеграції кількох функцій сучасних будівельних машин і механізмів під час розробки Digital Construction Platform (DCP) – прототипу мобільного 3D-принтера (рис. 6).



Рис. 6. Мобільний будівельний 3D-принтер DCP [3]

За допомогою мобільного будівельного 3D-принтера DCP була створена експериментальна кругла стіна діаметром 15 метрів та висотою 3,6 метра, використовуючи метод без опалубки та монтажну піну, що швидко твердне. Згідно з ілюстрацією, DCP представляє собою гідравлічний кран на гусеницях із чотирма ступенями свободи, оснащений екструдером, ковшем, зварювальним агрегатом і штангою. Наявність таких робочих інструментів свідчить про багатофункціональність цього винаходу. Так, будівельний 3D-принтер може друкувати огорожувальні конструкції з фібробетону, пінополіуретану або пінопласту, виконувати роботи з ґрунтом, зварювати арматурні каркаси чи сітки, а також при потребі розколювати лід [9]. На відміну від раніше розроблених 3D-принтерів, описаних у першій частині статті, DCP отримує енергію від акумуляторів та сонячних панелей, розміщених на верхній частині багатофункціонального пристрою. Його можна використовувати для виконання найскладніших будівельних робіт [3].

Наразі вчені працюють над створенням датчиків наближення, які підвищать безпеку роботи багатофункціонального будівельного обладнання. Це дозволить уникати можливих зіткнень з об'єктами, що знаходяться на будівельних майданчиках, а також з людьми.

Принтери-маніпулятори використовують роботизовану руку для переміщення друкарської головки. Вони є мобільними та характеризуються підвищеною гнучкістю (див. рис. 7). Кранові принтери зовні схожі на баштові крани і встановлюються у центрі

будівельного об'єкта, а не навколо його периметру, як у попередніх розробках. Основною перевагою є спрощення процесу підготовки та встановлення обладнання на будівельному майданчику [5].



Рис. 7. Будівельний 3D-принтер-маніпулятор [12]

З точки зору використання матеріалів, 3D-друк є економічнішим. Адитивні процеси, на відміну від віднімальних, передбачають використання меншої кількості матеріалів порівняно з традиційними методами виробництва.

Використання CAD-інструментів із застосуванням штучного інтелекту. Головною частиною принтера є друкарська головка. Після активації обладнання воно переміщується відповідно до заданої траєкторії, наносячи будівельний матеріал, який плавиться та заливається у відсік принтера, так щоб кожен новий шар накладався на попередній. Після охолодження шари з'єднуються, формуючи міцні блоки та створюючи цілісний виріб. 3D-друк відкриває широкі можливості для виробництва будівельних деталей та виробів із різноманітних матеріалів (рис. 8). Новітні методи конструювання базуються на генеративному проектуванні, яке використовує методи штучного інтелекту. Такі інструменти приймають специфікації та вхідні дані, потрібні для проектування, та автоматично генерують можливі варіанти геометрії, враховуючи властивості матеріалів, навантаження і навіть вартість [9].

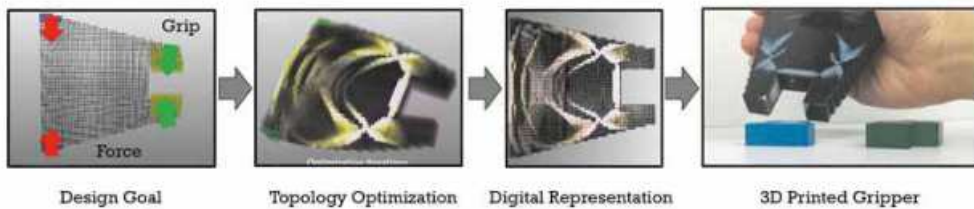


Рис. 8. Засувка оптимізації топології з II під час роботи будівельного 3D-принтера [13]

Новий функціонал є дуже зручним для користувачів, але ефективність цього методу залежить від того, наскільки кваліфікованим є сам користувач. Він повинен не лише точно розуміти, що включати до специфікацій та вхідних даних, але й здатний вибрати найкращі рішення, які пропонує система. Інтелектуальна CAD-технологія цього типу розширює можливості проєктувальників та економить їх час, оскільки вони більше не повинні вручну розробляти численні варіанти. На даний момент, інструменти генеративного проєктування, швидше за все, запропонують форму деталі, яку отримати за допомогою традиційних виробничих процесів буде досить складно [10]. Проте, ці інструменти можуть ефективно комбінуватися з адитивними процесами, такими як 3D-друк.

Як і будь-яка стіна, зведена за допомогою традиційних методів, огорожувальна конструкція, створена за допомогою 3D-принтера, повинна відповідати вимогам міцності та теплоізоляції. Основною перевагою конструкцій, зведених методом пошарової екструзії, є можливість створення складних геометричних форм стін. Для армування матеріалу, що використовується у 3D-друку, можна додавати композитну арматуру або укладати арматурні стрижні чи сітку між шарами. Проблема вертикального армування розв'язується шляхом встановлення стрижневої арматури у порожнечках з подальшим їх заповненням матеріалом з низьким коефіцієнтом теплопровідності (рис. 9).

Використання армуючих волокон у бетоні дозволяє подолати один із ключових недоліків матеріалу – слабку міцність на розтяг і вигин. Це стає можливим завдяки тому, що армуючі волокна поглинають напруження розтягу, збільшуючи таким чином опір розтягуванню на 250%. Додатково, ці волокна сприяють

рівномірному розподілу вологи у бетоні, що знижує внутрішні напруження і подвоює тріщиностійкість, а також збільшує ударну в'язкість бетону в 12 разів [13]. Окрім цього, значно покращується деформативність, морозостійкість, жаростійкість, водонепроникність, і корозійна стійкість бетонних конструкцій, роблячи фібробетон ідеальним для використання в 3D-друку (рис. 10).



Рис. 9. Використання композитної арматури в будівництві [9]



Рис. 10. Використання фібробетону у будівельному 3D-друці [14]

Базальтова арматура, вважаючись композитним матеріалом майбутнього, здобуває популярність у багатьох країнах і, за

прогнозами, скоро займе важливе місце в будівельній індустрії. Хоча концепція «композитного матеріалу» не є новою для спеціалістів, метал продовжує залишатися важливим у використанні. Композитна арматура – це неметалевий стрижень, створений зі скла, базальту, вуглецевих або арамідних волокон, поєднаних з полімерними сполуками (рис. 11).

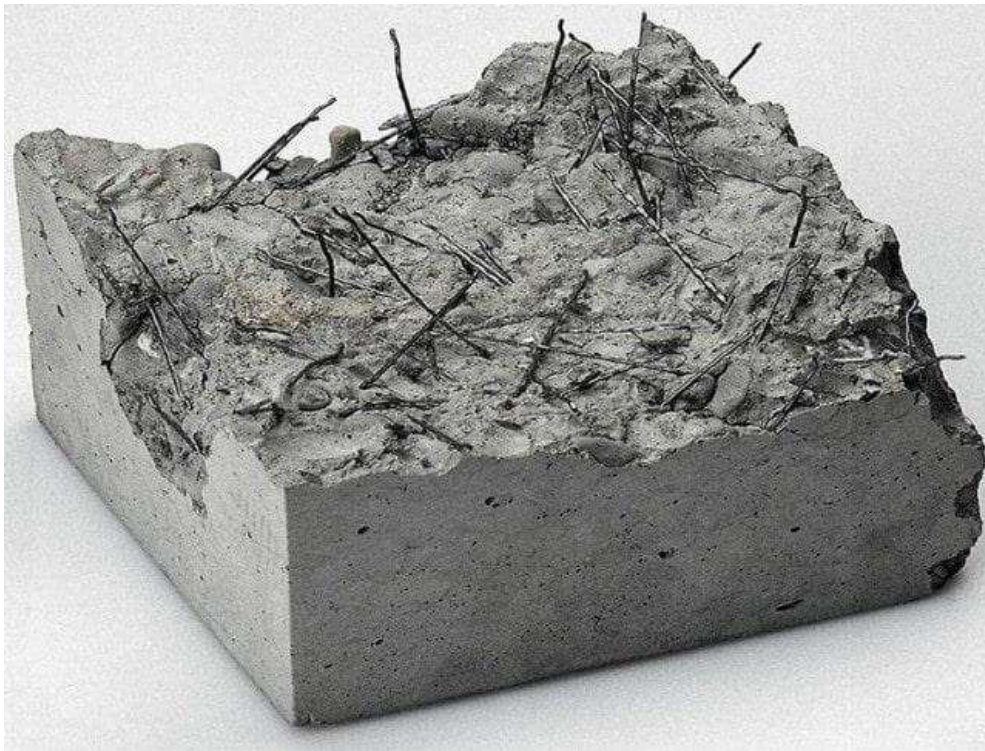


Рис. 11. Зовнішній вигляд фібробетону [11]

На відміну від скловолна, яке давно присутнє на ринку, базальтова арматура є відносно новим продуктом, що швидко здобуває довіру і все частіше використовується у різноманітних проектах. Базальтова арматура виробляється з безперервного базальтового ровінгу і має зовнішній вигляд стрижня з безперервною спіральною ребристістю, створеною обмоткою базальтовим обплетенням, просоченим високоміцним полімером [7].

Вимоги до матеріалів, які використовуються як «чорнила» для будівельного 3D-друку методом пошарової екструзії, мають велике значення. Склад таких будівельних «чорнил» (сировинної суміші)

грає ключову роль у технології 3D-друку. Вони можуть містити такі матеріали як портландцемент, гіпс, різні в'яжучі, модифіковані активними мінеральними та хімічними добавками – такі як цементно-волокнисті (фіброцементні), гіпсоволокнисті, гіпсоцементно-волокнисті та інші. Для успішного пошарового укладання «чорнила» важливо, щоб суміш набирала міцність при уповільненій кінетиці початкового структуроутворення. Крім того, сировинна суміш повинна мати тиксотропні та адгезійні властивості, бути легко укладеним принтером, але при цьому не розтікатися під впливом наступних шарів і мати низькі деформації усадки під час твердіння [5].

Дисперсне армування сировинних сумішей, використовуваних як «будівельні чорнила» для 3D-друку, сприяє покращенню фізико-механічних характеристик затверділого композиту, зменшенню усадочних деформацій, підвищенню тріщиностійкості тощо. Важливим є проведення досліджень, спрямованих на розробку рецептур будівельних «чорнил» для 3D-принтерів, що забезпечують високі технологічні, експлуатаційні властивості та тривалий термін служби. Проведений огляд практик 3D-друку будівель виявив, що в області будівництва одним з найефективніших методів є пошарове екструдювання. Основні переваги та недоліки технологій 3D-друку у будівельній галузі представлені в таблиці 1.

Технологічні переваги застосування 3D-друку у будівництві включають швидке зведення будівель, зниження трудових витрат, широкі архітектурні можливості, істотне скорочення строків завершення проекту, мобільність устаткування, гнучкість у виборі товщини та конфігурації стін, відсутність потреби в опалубці, високу точність виготовлення конструкцій та здатність працювати в умовах обмеженого простору. З економічного погляду, однією з переваг 3D-друку у будівництві є зниження загальних витрат на реалізацію будівельного проекту.

Використання 3D-принтерів у будівництві одноповерхових будівель надає можливість реалізації складніших архітектурних деталей та елементів. У останні роки адитивні технології активно досліджуються та розвиваються, створюються будівельні принтери, здатні зводити цілі квартали або вулиці. Завдяки зменшенню частки ручної праці та частковій автоматизації процесів можливе виключення впливу людського фактора [4]. Принтери мають переваги в плані організації роботи: апарат може функціонувати

кожен день будь-яку кількість годин при дотриманні необхідних умов та забезпеченні належного обслуговування.

Таблиця 1

Переваги та недоліки технології 3D-друку будівель (сформовано авторами)

Кри-терії	Переваги	Недоліки
Технологічні	<ul style="list-style-type: none"> • Висока швидкість будівництва будівлі; • Низькі трудовитрати; • Необмежені архітектурні можливості • Значне скорочення термінів здачі об'єкту; • Мобільність обладнання; • Вільний вибір товщини та конфігурації стін; • Відсутність опалубки; • Висока точність виготовлення конструкцій; • Можливість проведення робіт у обмежених умовах; • Скорочення вартості будівництва будівлі. 	<ul style="list-style-type: none"> • Відсутність нормативної бази; • Відсутність кваліфікованих спеціалістів; • Складність підбору складу бетонної суміші; • Складність підбору складу «друку» горизонтальних конструкцій (плит перекриття тощо) у проектному положенні; • Технологічні перерви; • Відставання за швидкістю суміжних будівельно-монтажних робіт; • Спеціальні вимоги до будівельного майданчика; • Складність експлуатації 3D-принтера при негативній температурі; • Відсутність чіткої методики армування конструкцій; • Обмежена зона «друку»; • Спеціальні умови для забезпечення нормальної роботи будівельного 3D-принтера; • Складність транспортування та налаштування 3D-принтера; • Висока вартість бетонної суміші.
Економічні	<ul style="list-style-type: none"> • Зменшення будівельного сміття; • Невеликий період будівельних робіт. 	<ul style="list-style-type: none"> • Висока вартість 3D-принтера та його ремонту (за потреби); • Додаткові витрати на намет, що захищає будівельний майданчик від природних впливів; • Утилізація залишків бетонної суміші після промивання системи 3D-принтера.
Екологічні	<ul style="list-style-type: none"> • Можливість використання будівельних матеріалів, у виробництві яких використовувалися техногенні відходи. • Зниження ринкової вартості 1 м². 	<ul style="list-style-type: none"> • Збільшення частки машинної праці.
Соці-альні	<ul style="list-style-type: none"> • Висока безпека праці. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ставлення будівельних організацій, що склалося, до традиційних технологій будівництва.

У сучасних наукових дослідженнях та винаходах у галузі 3D-друку для будівництва можна виділити наступні напрямки розвитку:

– удосконалення конструкції будівельних принтерів та їх

компонентів;

– розробка оптимальних рецептур сумішей, які використовуються як «чорнила» для принтерів;

– вдосконалення технічних методів застосування будівельного принтера для створення окремих елементів чи конструкцій будівлі.

Для ефективного запровадження 3D-друку у масове будівництво, включаючи одноповерхові споруди, ключовим фактором та умовою є якість використовуваних матеріалів і сумішей, а також технологічні схеми будування об'єкта. Варто також зазначити, що багато 3D-принтерів мають відносно компактні розміри, що робить пристрої зручними для транспортування та швидкого збирання на будівельному майданчику.

Контроль якості та її управління відіграють ключову роль для гарантування безпеки, відповідності стандартам, тривалості служби, економічної вигоди та задоволення потреб клієнтів у випадку будівель, створених за допомогою 3D-друку. Ефективний контроль якості сприяє популяризації та прийняттю технології 3D-друку у будівництві. Розвиток та застосування систем управління якістю на основі штучного інтелекту у будівельній та інфраструктурній галузях може привести до перевероту у способах планування, виконання та контролю проектів. Інтеграція автоматизації, моніторингу в режимі реального часу, прогностичної аналітики та прийняття рішень на підставі даних може суттєво покращити стандарти якості в галузі, знизити ризики та підвищити ефективність проектів. Це важливий крок до створення більш продуктивного, сталого та надійного майбутнього будівництва та розвитку інфраструктури. Потрібна подальша робота з розробки відповідних стандартів і нормативів, а також створення системи управління, моніторингу та контролю якості на основі штучного інтелекту, яка називається AIQMS (система управління якістю з використанням штучного інтелекту).

Висновки. Згідно з аналізом досвіду використання адитивних технологій для зведення будівель та споруд за допомогою будівельного 3D-принтера, слід відзначити основний недолік – обмежену можливість зведення лише вертикальних конструкцій та роботу в обмеженій зоні. Також, налаштування та калібрування будівельного 3D-принтера в робочому положенні вимагають часу та зусиль під час підготовчого етапу. Визначено, що адитивна технологія 3D-друку будівель має значні переваги: знижує трудомісткість робіт, зменшує ризик виробничого травматизму,

підвищує автоматизацію та швидкість будівництва, а також сприяє зменшенню відходів виробництва.

Визначено, що відсутність нормативної бази для проектування та будівництва за допомогою цієї технології на даний момент не становить серйозної перешкоди для реалізації складних проектів. Це обумовлено необхідністю покращення якості отримуваної будівельної продукції та розширенням можливостей даної технології.

Доведено, що ефективний розвиток адитивних технологій у зведенні будівель та споруд з використанням будівельного 3D-принтера потребує всебічних досліджень, які б зосереджувалися на створенні ефективних «будівельних чорнил» на різних основах, а також вивченні їхньої структури та властивостей. Для інтеграції адитивних технологій у масове будівництво, особливо одноповерхових будівель, потрібно зосередитися на розвитку моделювання, формуванні вимог до застосування цих пристроїв та контролі за якістю отримуваної суміші. Виконання цих кроків сприятиме глибшому дослідженню та залученню уваги до цієї важливої теми.

Підкреслено, що різноманітні цифрові технології становлять найефективніший засіб для підвищення продуктивності та ефективного використання ресурсів у будівельній індустрії. Саме завдяки цим технологіям можлива автоматизація процесів та значне зниження вартості будівництва. Ця галузь потребує більш глибокого дослідження та розвитку для створення інноваційних рішень, які б підвищили ефективність на різних етапах будівництва. Незважаючи на існуючі проблеми, використання 3D-технологій у будівництві пропонує ряд переваг, серед яких: швидкість і точність виконання робіт; простота у експлуатації; відносно низька вартість будівель та споруд; мінімізація використання ручної праці; підвищення безпеки на робочому місці. Прогрес у будівельній галузі не зупиняється, регулярно впроваджуються нові високотехнологічні методи, серед яких 3D-друк будівель та споруд. Ця технологія за короткий час привернула увагу багатьох великих будівельних компаній. Однак, перспектива розвитку 3D-друку в будівництві та його масове впровадження можливі лише за умови вирішення низки проблем, згаданих у цій статті.

1. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування технології 3D-друку в будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2015. Вип.

3. С. 11–18. **2.** Іванов-Костецький С., Гуменник І., Воронкова І. Шляхи застосування технологій 3D-друку у створенні сучасних об'єктів архітектури. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Архітектура.* 2022. № 1(7). С. 54–64. URL: <https://doi.org/10.23939/sa2022.01.054>. (дата звернення: 02.11.2023).
- 3.** Кірик К. Р., Журавська Н. Є., Стефанович П. І. Перспективи розвитку 3D будівництва та його вплив на навколишнє середовище. *SWorld Journal.* 2023. Issue 18. Part 1. С. 77–87. DOI: 10.30888/2663-5712.2023-18-01-076.
- 4.** Македон В. В., Ільченко Н. О. Кон'юнктура світового ринку ІТ-послуг в умовах економіки 4.0. *Ефективна економіка.* 2021. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8525> (дата звернення: 02.11.2023). DOI: 10.32702/2307-2105-2021.1.8.
- 5.** Шатов С. В., Савицький М. В., Голубченко О. І., Мацюк І. М., Шляхов Е. М. Дослідження варіантних рішень обладнання для 3D-друку будівельних виробів. *Український журнал будівництва та архітектури.* 2022. № 1(007). С. 80–88. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.80.836
- 6.** 3D printer g-code commands: full list & tutorial. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-codecommands-list-tutorial/>. (дата звернення: 02.11.2023).
- 7.** Additive intelligent manufacturing / By Sun Xiaoyan, Wang Hailong, Ling Xiqiang. Beijing. *China Building Materials Industry Press.* 2022. Pp. 58–84.
- 8.** Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering.* 2016. Vol. 151. Pp. 292–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>. (дата звернення: 02.11.2023).
- 9.** Key Technologies of 3D Printing of cement based Materials / Written by Ma Guowei, Wang Li, Beijing. *China Building Materials Industry Press.* 2020. Pp. 056–077.
- 10.** Kuhudzai R. J. Apis Cor Is Ready to Scale Up The 3D-Printed Home & Building Sector With Its Advanced Compact Mobile Robot Tech. URL: <https://cleantechnica.com>. (дата звернення: 02.11.2023).
- 11.** Lipson H., Kurman M. Fabricated. The New World of 3D Printing. Indiana : Wiley, 2013. 320 p.
- 12.** Makedon V., Mykhailenko O., & Dzyad O. Modification of Value Management of International Corporate Structures in the Digital Economy. *European Journal of Management Issues.* 2023. № 31(1). Pp. 50–62. URL: <https://doi.org/10.15421/192305>. (дата звернення: 02.11.2023).
- 13.** Pershakov V., Bieliatynskiy A., Bakulin E., Bakulina V., Bolotov G., Porovuch I. Тенденції розвитку світового висотного будівництва. *Revista Española de Derecho Constitucional.* 2016. № 61. Pp. 62–72.
- 14.** Tay Y., Panda B., Paul S, Noor M., Tan M. Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping.* 2017. No. 12 (3). Pp. 261–276. URL: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>. (дата звернення: 02.11.2023).
- 15.** The Construction Industry With Additive Manufacturing: An Opportunity Analysis And Ten-year Forecast. SmarTech Analysis. URL: <https://www.smartechanalysis.com/reports/additive->

manufacturing-in-construction. (дата звернення: 02.11.2023). **16.** Wolfs R. J. M., Boss F. P., Salet T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119. Pp. 132–140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>. (дата звернення: 02.11.2023). **17.** Zgalat-Lozynskyy Ostap & Zgalat-Lozynska Liubov. Development and implementation of innovative 3D printing technologies in construction. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Ser. Economy and Management*. 2020. No.70. DOI: 10.30888/2663-5712.2023-18-01-076.

REFERENCES:

1. Andriichuk O. V., Olasiuk P. Ya. Zastosuvannia tekhnolohii 3D-druku v budivnytstvi. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunku v budivnytstvi*. 2015. Vyp. 3. S. 11–18.
2. Ivanov-Kostetskyi S., Humennyk I., Voronkova I. Shliakhy zastosuvannia tekhnolohii 3D-druku u stvorenni suchasnykh ob'ektiv arkhitektury. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Ser. *Arkhitektura*. 2022. № 1(7). S. 54–64. URL: <https://doi.org/10.23939/sa2022.01.054>. (дата звернення: 02.11.2023).
3. Kiryk K. R., Zhuravska N. Ye., Stefanovych P. I. Perspektyvy rozvytku 3D budivnytstva ta yoho vplyv na navkolyshnie seredovyshe. *Sworld Journal*. 2023. Issue 18. Part 1. S. 77–87. DOI: 10.30888/2663-5712.2023-18-01-076.
4. Makedon V. V., Ilchenko N. O. Koniunktura svitovoho rynku IT-posluzh v umovakh ekonomiky 4.0. *Efektivna ekonomika*. 2021. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8525> (дата звернення: 02.11.2023). DOI: 10.32702/2307-2105-2021.1.8.
5. Shatov S. V., Savytskyi M. V., Holubchenko O. I., Matsiuk I. M., Shliakhov E. M. Doslidzhennia variantnykh rishen obladnannia dlia 3D-druku budivelnykh vyrobiv. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*. 2022. № 1(007). S. 80–88. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.80.836
6. 3D printer g-code commands: full list & tutorial. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-codecommands-list-tutorial/>. (дата звернення: 02.11.2023).
7. Additive intelligent manufacturing / By Sun Xiaoyan, Wang Hailong, Ling Xiqiang. Beijing. *China Building Materials Industry Press*. 2022. Pp. 58–84.
8. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>. (дата звернення: 02.11.2023).
9. Key Technologies of 3D Printing of cement based Materials / Written by Ma Guowei, Wang Li, Beijing. *China Building Materials Industry Press*. 2020. Pp. 056–077.
10. Kuhudzai R. J. Apis Cor Is Ready to Scale Up The 3D-Printed Home & Building Sector With Its Advanced Compact Mobile Robot Tech. URL: <https://cleantechnica.com>. (дата звернення:

02.11.2023). **11.** Lipson H., Kurman M. Fabricated. The New World of 3D Printing. Indiana : Wiley, 2013. 320 p. **12.** Makedon V., Mykhailenko O., & Dzyad O. Modification of Value Management of International Corporate Structures in the Digital Economy. *European Journal of Management Issues*. 2023. № 31(1). Pp. 50–62. URL: <https://doi.org/10.15421/192305>. (data zvernennia: 02.11.2023). **13.** Pershakov V., Bieliatynskiy A., Bakulin E., Bakulina V., Bolotov G., Porovuch I. Тенденції розвитку світового висотного будівництва. *Revista Española de Derecho Constitucional*. 2016. № 61. Pp. 62–72. **14.** Tay Y., Panda B., Paul S, Noor M., Tan M. Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017. No. 12 (3). Pp. 261–276. URL: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>. (data zvernennia: 02.11.2023). **15.** The Construction Industry With Additive Manufacturing: An Opportunity Analysis And Ten-year Forecast. SmarTech Analysis. URL: <https://www.smartechanalysis.com/reports/additive-manufacturing-in-construction>. (data zvernennia: 02.11.2023). **16.** Wolfs R. J. M., Boss F. P., Salet T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119. Pp. 132–140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>. (data zvernennia: 02.11.2023). **17.** Zgalat-Lozynskyy Ostap & Zgalat-Lozynska Liubov. Development and implementation of innovative 3D printing technologies in construction. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Ser. Economy and Management*. 2020. No.70. DOI: 10.30888/2663-5712.2023-18-01-076.

Komyshv D. H., Professor, Specially appointed expert from the School of Civil Engineering (North Minzu University, Academician of the Engineering Academy of Ukraine), **Bieliatynskiy A. O., Professor** (North Minzu University)

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: 3D PRINTING OF BUILDINGS, MOBILE PROGRAMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article contains an overview of the world experience of using additive technologies in the construction sector based on the use of 3D printing of buildings. The use of 3D printing allows you to implement architectural projects of any complexity, reduce the amount of production waste, reduce the housing stock deficit, and reduce material, energy, and labor costs for construction. Additive technologies are quite common in industry today. However, the construction industry is very conservative and lags behind other

industries in the application of 3D printing. The implementation of additive technologies in the process of constructing buildings and structures is a process that requires a significant share of R&D, however, in addition to universities and scientific groups, large companies are also conducting their developments in this field, whose interest is obvious - 3D printing of buildings can radically change the real estate market and related industries. The article analyzes the main types and specifications of 3D printers used for printing buildings and structures, and their distinctive characteristics.

It was determined that the basics of realizing the possibilities of 3D-additive technologies are related to overcoming the existing limitations in architecture, design, material science and technological equipment. It can be argued that an innovative breakthrough in this field is possible only on the basis of real cooperation between architects, designers, material scientists and designers. The scale and complexity of the tasks are determined by the fact that practical principles and technical solutions have been formed for managing all stages of the 3D printing life cycle: during the design of construction objects, depending on the purpose; at the technological stage of printing; during operation of construction objects in different conditions. The question of the materials used for the production of the construction mixture was also investigated. Special attention is paid to the assessment of the current state of 3D printing in the world. The main tasks of the research are: popularization of additive technologies in Ukraine, promotion of implementation of innovative construction methods and development of recommendations and practical formats for the use of 3D printing of buildings.

***Keywords:* construction production; additive technologies; 3D printing; construction printer; extrusion; construction site.**