

3. ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ НАЦІОНАЛЬНИМ ГОСПОДАРСТВОМ

DOI: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7>

УДК 620.3:001.895(477)+338.45:69

Згалат-Лозинська Л.О.

кандидат економічних наук, доцент,
докторант кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування,
Київський національний університет будівництва і архітектури

Згалат-Лозинський О.Б.

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділу термомеханічної обробки тугоплавких матеріалів,
Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича
Національної академії наук України

Zgalat-Lozynska Liubov

Kiev National University of Construction and Architecture

Zgalat-Lozynskyy Ostep

I.M. Frantsevych Institute for Problems in Material Science
of the National Academy of Sciences of Ukraine

РОЗВИТОК ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ У БУДІВНИЦТВІ

У статті розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку адитивних технологій в будівельній галузі України. Проведено аналіз ринку адитивних технологій та 3D-друку в будівництві, показано, що розмір світового ринку 3D-друку проявляє сталі тенденції до зростання більш ніж на 14% у 2020–2027 рр. Визначено основні напрями розвитку адитивних технологій у будівництві. Найбільш суттєвою перешкодою на шляху до повноцінного впровадження 3D-друку у будівництві є відсутність нормативної бази його використання. Розглянуто сучасні матеріали та технології для друку будівель та об'єктів інфраструктури в різних країнах світу. Досліджено перспективи розвитку технології 3D-друку в будівельній галузі у світі та в Україні. Показано, що для виконання таких проєктів потрібно залучення як державної підтримки, так і приватних інвесторів, а також фінансування досліджень із розроблення та впровадження нових матеріалів та адитивних технологій.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк, 3D-принтер, будівництво, інновації.

Постановка проблеми. Останніми десятиліттями спостерігається стрімкий розвиток адитивних технологій, що охопили майже всі галузі виробництва. Адитивні технології знайшли своє застосування в автомобілебудуванні, авіаційній промисловості, виготовленні побутової техніки, одязі й навіть вирощуванні штучних органів. Устаткування для 3D-друку змінило уявлення про швидке прототипування та серійне виробництво. З 90-х рр. минулого століття індустрія адитивних технологій розвивалася стрибкоподібно, але ні лазерне спікання, ні фотополімеризація, ні електронно-променева плавка не змогли довести свою ефективність в галузі будівництва. Вже у 2014 р. стався прорив: приватні компанії США й Китаю майже одночасно почали роботу над створенням устаткування, що об'єднує переваги екструзії та методу бага-

топотокового моделювання, в результаті чого з'явилися 3D-принтери для друку бетоном [1]. Роботи над створенням тривимірного принтера, який зможе друкувати окремі елементи або навіть відразу цілий будинок, майже одночасно почали групи вчених з Нідерландів, США, Китаю, Англії [1–6]. Усі вони зіткнулися з однією й тією ж проблемою: матеріали, які використовуються традиційно для 3D-друку, не підходять для будівництва, і навпаки, будматеріали ніяк не годяться як матеріал для принтера. Ідеальний матеріал має бути дрібнодисперсним, міцним, повинен швидко застигати й давати можливість надавати підсумковому виробу будь-якої, навіть найскладнішої форми. Безумовно, 3D-друк все активніше використовуватиметься у будівництві. Зацікавленість у нових технологіях існує в Україні, але виконання таких проєктів

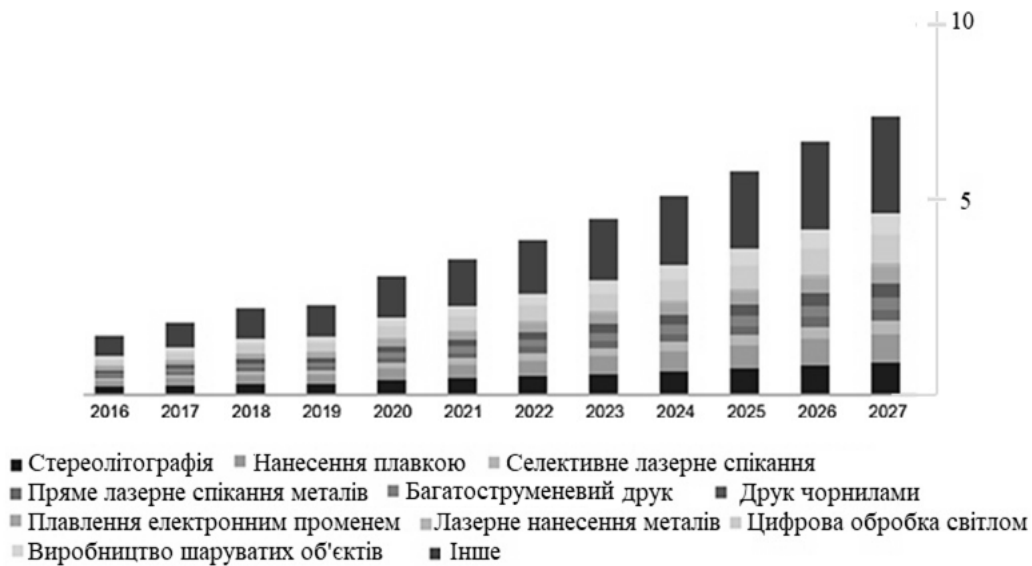


Рис. 1. Обсяг ринку 3D-друку в Північній Америці за технологіями, 2016–2027 рр., млрд. дол. США [10]

потребує залучення державних і приватних інвесторів, а також проведення досліджень із розроблення та впровадження матеріалів та технологій, що можуть бути успішно адаптовані до наших кліматичних умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями дослідження та впровадження адитивних технологій у будівництві займаються українські та зарубіжні науковці, зокрема Р. Бусвел [3], Д. Делгадо, П. Клайтон, В. О'Брієн [4], М. Джинджер, А. Паоліні, С. Колмансбергер, Е. Ранк [5], Ф. Сартіпі [6], О.В. Андрійчук [7], А.А. Петришина [8], О.В. Струтинська [9]. Незважаючи на значний доробок цих авторів, технологічні та економіко-правові питання впровадження адитивних технологій у будівельну галузь України потребують подальшого наукового розроблення.

Формулювання цілей статті. Метою статті є аналіз сучасного стану адитивних технологій у будівництві та визначення перспектив впровадження техноло-

гій 3D-друку в будівельну галузь України.

Виклад основного матеріалу. Аналіз світового ринку адитивних технологій дав змогу з'ясувати, що розмір світового ринку 3D-друку у 2019 р. оцінювався в 11,58 млрд. дол. США і, як очікується, зросте більш ніж на 14% у 2020–2027 рр. (рис. 1).

У світовому масштабі у 2018 р. було відправлено 1,42 млн. одиниць 3D-принтерів, очікується, що ця кількість сягне 8,04 мільйонів одиниць до 2027 р. [10]. Останніми роками спостерігається інтенсифікація науково-дослідних робіт у галузі тривимірного друку, а також зростаючий попит на застосування прототипів у різних галузях промисловості, зокрема в автомобільній, космічній, будівельній, військовій галузях, охороні здоров'я, що є факторами, які, як очікується, приведуть до зростання ринку.

Згідно з останніми дослідженнями, Азіатсько-Тихоокеанський регіон (АТР) – це найбільший за величиною та темпами зростання ринок будівництва із застосуванням технологій 3D-друку (рис. 2).

Наявність великої кількості виробників робить АТР найважливішим ринком, де застосовують 3D-друк для будівництва. Також зростання цього ринку пояснюється високим попитом на будівництво із застосуванням 3D-технологій, розвинутою інфраструктурою та виробництвом техніки для 3D-друку. Китай та Таїланд розглядаються як основна частина ринку АТР, на якому будуть стрімко розвиватися технології 3D-друку. Індія, Японія, Південна Корея та інші азіатські країни були взяті до уваги як перспективні країни АТР, оскільки ця інноваційна технологія ще не продається в цих країнах. Однак науково-дослідні роботи з розроблення та впровадження 3D-друку інтенсивно проводяться в

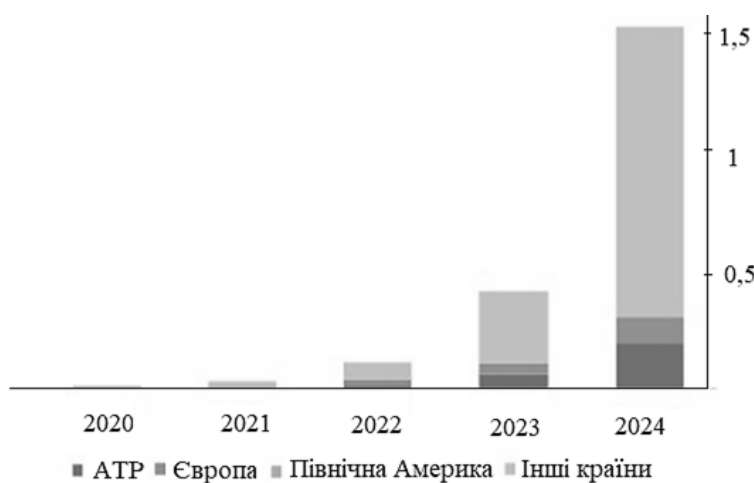


Рис. 2. Ринок технологій 3D-друку в будівництві, млрд. дол. США [10]

Японії та Індії, що робить ці країни потенційними ринками збуту цієї технології [10].

Одними з ключових гравців на ринку будівництва з використанням технології 3D-друку є “Yingchuang Building Technique” (Китай), “XtreeE” (Франція), “Apis Cor” (Росія), “Monolite UK” (UK), “CSP s.r.l.” (Італія), “CyBe Construction” (Нідерланди), “Sika” (Швейцарія), “MX3D” (Нідерланди), “Contour Crafting” (Каліфорнія) та “ICON” (Техас). Основними стратегіями, прийнятими основними гравцями для підвищення доходів від бізнесу, є нові проєкти, партнерства, розширення, спільне підприємство та інвестиції.

Дослідження ринку 3D-друку в будівельній галузі дає змогу виділити такі тенденції, які вплинуть на його зростання в майбутньому [4; 10].

1) Інвестиції. Компанії інвестуватимуть у 3D-технології для друку в будівельному секторі з огляду на такі причини, як економічна ефективність, менше часу на будівництво; скорочення людських зусиль та помилок через людське втручання на будівельних майданчиках; зростання частки САПР (комп'ютерне проєктування) в будівельному проєкті.

2) Розвиток технологій. Галузь 3D-друку постійно розвивається та є однією з найбільш інноваційних у сучасному світі. В ній поєднуються як нові рішення в галузі будівельної техніки та матеріалів, так і сучасні дизайнерські рішення. Наприклад, за допомогою технології “C-Fab” створюються несучі міжкімнатні перегородки, меблі та виставкові конструкції. “Mesh Mold” – це також сучасна технологія, яка продемонструвала потенціал поєднання функціональних, естетичних якостей та міцності 3D-структур.

3) Світові катастрофи. Нині проводяться інтенсивні дослідження щодо адаптації технології 3D-друку для виготовлення конструкцій, які спеціально випробовуються для схильних до катастроф (землетрусів, смерчів) територій. Для 3D-друку використовуються спеціальні роботи “Cazza's X1 3D”, що є машинами, які побудовані за стартап-проєктом у Каліфорнії спеціально для зон катастроф.

4) Дослідження космосу. Технології 3D-друку в будівництві можуть використовуватися людством для дослідження космосу. NASA запустила програму з дослідження 3D-друку в космосі для вивчення перспективних технологій будівництва будинків на Місяці чи Марсі.

Аналіз використання 3D-друку для будівельних робіт свідчить про те, що виробники не дотримуються єдиної концепції в процесі виробництва пристроїв для 3D-друку будівельних елементів, адже вони можуть бути мобільним або стаціонарним, нагадувати кран на гусеничному ході, систему балок і шарнірів, брендспойт із сервоприводами [11]. Дійсно важливо лише те, на яку висоту і за якою траєкторією пристрій здатний укласти будівельний матеріал.

Перші машини для 3D-друку використовувалися для створення малогабаритних архітектурних форм. Сучасна ж техніка може будувати малоповерхові житлові будинки. Відносно проблематичним є друк перекриттів у повітрі, а поверховість будівель залежить

від габаритів машини. Проте побудувати житловий будинок з міжкімнатними перегородками, дверними та віконними отворами, розводкою під прокладення інженерних комунікацій можна за одну добу [1; 3].

Піонером у галузі будівництва з використанням 3D-друку є китайська компанія “WinSun Decoration Design Engineering”. Її розробкою є стаціонарний велетенський пристрій довжиною 150 метрів та шириною 10 м, що друкує за методом екструзії. Принтер “WinSun” може лише за декілька годин звести з нуля будівлю заввишки до шести метрів. Для приготування будівельної суміші використовуються сталь, скловолокно, бетон, будівельне сміття й цемент [11; 12]. Звичайно, в результаті виходить максимально просте, невибагливе житло, але його створення обходиться в два рази дешевше за традиційні технології будівництва.

Не лише китайці, але й США досягли певного прогресу у друці будівель. Компанія інженерів під керівництвом емігранта з України Андрія Руденка створила робочий прототип принтера, який дає змогу зводити будинки швидше за аналогічне рішення Китаю, при цьому будівля може розташовуватися навіть на нерівній, горбистій місцевості. Символічний замок, повністю надрукований командою Андрія Руденка, вже знаходиться в одному з парків Міннесоти, і дослідження продовжуються [2; 7]. У США провідні позиції в технологіях 3D-друку займає “Apis Cor.” яка використовує апарат для адитивного друку, що виглядає як компактний кран, який вибудовує будівлю навколо себе. Така машина друкує сумішшю на основі бетону. Після завершення робіт пристрій розбирається або витягається за допомогою вантажопідйомного устаткування. Виробник стверджує, що його розробка економить до 70%. Компанія “Apis Cor.” надрукувала житловий будинок площею 38 м² за 24 години. Вартість будівельних робіт склала трохи більше десяти тисяч доларів, отже, собівартість створення квадратного метра становить 263 дол. [12].

Передові моделі 3D-принтерів комплектуються додатковою стрілою для забезпечення прискореної подачі матеріалу та електропідйомниками, щоби друкувати на готовому фундаменті. Товщина нанесення суміші, конфігурація будівлі, створення багатокамерних стін, автоматичне змішування інгредієнтів і подача в екструдер – усі деталі друку вносяться за допомогою спеціального програмного забезпечення, а підготовка займає не більше 30 хвилин [8; 9].

Іншим напрямом розвитку адитивних технологій пішли нідерландські фахівці. Вони спрямували зусилля на друк будматеріалів, а саме цегли. В результаті був виготовлений продукт, що дістав назву “PolyBricks”. Головна особливість цегли полягає в тому, що елементи для монтажу не вимагають клею або цементного розчину, адже з'єднання відбувається за допомогою системи пазів, що нагадують конструктор Lego. Це дає змогу будувати будинки з інноваційної цеглини не лише швидше, але й дешевше за збереження надійності та стійкості [4].

Традиційно у будівельному 3D-принтері матеріал екструдуються з насадки, встановленої на крані, «козлі» або

закріпленої на роботизованому маніпуляторі, який друкує заданий макет шар за шаром. Техніка на основі екструзії використовується переважно для будівельних робіт на місці й дає змогу використовувати звичайні будівельні матеріали, такі як бетон, геополімер, цемент, гіпс та глина. Для зведення міцних, зносостійких несучих конструкцій методом 3D-друку використовуються бетонні суміші з добавками. Найбільш затребуваними на ринку матеріалів для 3D-друку є чистий бетон, водостійкий гіпс (для облицювальних робіт), суміш зі скляним волокном (для друку об'ємних елементів), з геополімерами з промислових відходів (для крихких конструкцій), суміш з фіброволокном (для друку виробів витягнутої форми), протиморозна суміш (для роботи при від'ємних температурах), з пластифікатором (для отримання рівної поверхні), модифікований гіпс (для декоративного друку).

З огляду на те, що в будівництві за технологією 3D-друку домінує метод екструзії, це сприяє зростанню попиту на цементні суміші, що використовуються для 3D-друку та спецобладнання для 3D-друку. Отже, зростання попиту на адитивні технології в будівництві стимулює інші галузі, зокрема промисловість будівельних матеріалів, хімічну та машинобудівну галузі.

Британські інженери в ході довготривалих досліджень розробили спеціальний цемент, який за допомогою екструзування дає змогу наплавити шари один на інший, за рахунок чого можна створювати міцні об'єкти довільного розміру та форми. Технологія дає змогу зводити будівлю без опалубки, що дає можливість будувати відразу весь будинок безпосередньо на будівельному майданчику, без подальшого переміщення [1; 2; 4]. Щоби міцність конструкції відповідала проектному рівню, використовується вертикальне й горизонтальне армування. Горизонтальний зміцнюючий пояс встановлюється між шарами, вертикальний – після часткового затвердіння складу. Арматура фіксується й заливається бетоном. Існують принтери, які спочатку розпиляють поліуретан, формуючи «камеру», а потім заливають бетон всередину.

Більшість моделей для 3D-друку призначена для експлуатації в закритому приміщенні. У цехового устаткування є вагомий недолік: надруковані елементи потрібно транспортувати на будмайданчик. Зараз активно розробляють мобільні пристрої, які можуть використовуватися прямо на будівельній ділянці для друку по фундаменту. Щоб зберегти характеристики формуючої суміші, над об'єктом споруджується захисний ковпак, а в суміш додаються присадки. Завдяки використанню такої технології 3D-друку витрати матеріалів знижуються на 30–70% порівняно з класичною технологією.

Серед успішних прикладів впровадження технології 3D-друку в будівництві слід назвати перший у світі залізобетонний міст у Амстердамі (Нідерланди), зроблений за допомогою об'ємного 3D-друку. Аналогічний проект утілили в життя в Іспанії. Міст зроблений із залізобетону. Довжина конструкції становить 12 м. Інженери працювали над проектом 15 років [6; 12]. Компанія “HuaShang Tengda” за 45 днів надрукувала

приватний будинок площею 400 м². На виробництво несучих конструкцій було витрачено 20 т бетону марки С30, з якого зробили опалубку завтовшки 250 мм. Сейсмічні випробування довели, що будівля здатна витримати землетрус силою 8 балів за шкалою Ріхтера [12].

В Об'єднаних Арабських Еміратах будується місто, призначене для тренування космонавтів-колонізаторів в умовах, наближених до реальності. Перед тим як майбутні колонізатори відправляться освоювати Марс, їм належить побудувати колонію на Землі. Проект називається “Mars Science City”. Стіни господарських будівель зведуть з піску за допомогою 3D-принтера [6; 7].

NASA спільно з армією США й компанією “Caterpillar” працює над технологією швидкого зведення експедиційних конструкцій з підготовленої суміші та випадкових підручних матеріалів для будівництва казарм, барикад, бар'єрів, мостів, загороджувальних перешкод [6].

Головними перевагами будівельних принтерів є мінімальні терміни (порівняно з традиційними способами виконання робіт) та ефективність логістичних операцій.

3D-друк має потенціал до революції в галузі. Деякі компанії вже почали працювати з цим нововведенням. Французька компанія з глобальною присутністю “Voxygues” є однією з таких компаній. У партнерстві з Університетом Нанта вона побудувала перший в Нанті 3D-будинок. Завдяки 3D-технології будинок площею 95 м² став реальністю лише за три дні через руку поліартікульованого робота: дві поліуретанові стіни з бетоном, залитим між ними. Цей процес має низку переваг, включаючи можливості вільної форми та швидкість виконання. Також теплоізоляція вже встановлена в кінці будівельного процесу [1].

Основними перевагами технології 3D-друку в будівництві є забезпечення узгодженості між робочими місцями, підвищення продуктивності праці, вдосконалення організації виробництва, забезпечення міцності та довговічності будівель чи елементів інфраструктури, зниження собівартості продукції, зменшення матеріальних відходів та можливість швидкого впровадження нових матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками [1]. Впровадження технологій 3D-друку в будівництво також змінить робоче середовище, зменшивши кількість аварій на виробництві завдяки автоматизації процесу [3].

Однак, незважаючи на наявні переваги технології 3D-друку в будівництві, його широке використання стримує низка факторів, таких як:

- відносно висока вартість сучасних моделей будівельних 3D-принтерів;
- проблематичність впровадження 3D-технологій у комплексний процес будівництва, ремонту та реконструкції;
- відсутність нормативно-правових актів та стандартів для 3D-друку будівель та елементів інфраструктури.

Найбільш суттєвою перешкодою на шляху до повноцінного впровадження 3D-друку у будівництві є відсутність нормативної бази його використання.

Наявні стандарти для традиційних будівельних процесів та матеріалів відпрацьовувались десятиліттями, але вони не підходять та не можуть бути адаптовані для технології 3D-друку в будівництві. Це питання залишається відкритим та потребує особливої уваги як з боку держави, так і з боку розробників 3D-технологій. Наблизити технологію 3D-друку до масового використання можуть системи, які постійно слідкуватимуть та перевірятимуть вироблений матеріал, щоб уникнути ситуації, коли надрукований хмарочос виявиться абсолютно ненадійним.

Якщо припустити, що питання нормативного забезпечення будуть вирішені, потенційні вигоди від 3D-друку для будівельної галузі величезні: підвищення продуктивності праці, зниження витрат на її оплату, покращення безпеки праці, а також унікальність збудованих конструкцій, які сьогодні просто неможливо збудувати з технічних та економічних причин.

Також широкому впровадженню технологій 3D-друку в будівництві суттєво перешкоджають висока вартість будівельного 3D-принтера для друку малоповерхових будівель, потреба у спеціалістах по роботі з принтером і додаткові витрати на підготовчі та фінішні роботи [1].

Технології 3D-друку потребують подальшого дослідження та пошуку нових рішень для їх широкого впровадження в будівництво. Незважаючи на те, що адитивні технології широко використовуються в інших галузях економіки, процес 3D-друку в будівництві потребує вдосконалення як з правової, так і з технологічної сторін перш ніж він справді трансформує будівельну галузь. Нині ці технології тільки починають розвиватись, але без стандартизованого тестування та контролю якості вони не можуть бути впроваджені. Крім того, більшість технологій 3D-друку складають патентовані або закриті для загального доступу фірмами-розробниками, що суттєво стримує розвиток цього напрямку та ускладнює уніфікацію обладнання, технологій та матеріалів [1].

Щодо використання адитивних технологій в Україні, то наша держава теж не надто відстає від світового тренду. Ще наприкінці 90-х минулого століття група вчених в Інституті проблем матеріалознавства НАН України займалась розробленням технології селективного лазерного спікання (Selective laser Sintering) керамічних порошків на основі тугоплавких сполук [13; 14]. Зараз в Україні існує декілька стартапів із розроблення 3D-принтерів для друку керамічними та металевими матеріалами. Найбільш відомими з них є Українсько-Американська фірма “Kwambio” (Одеса) та «Червона хвиля» (Київ).

Стартап “Kwambio” розробили свою технологію 3D-друку за методом вприскування в'язучого (“binder jetting”), створити 3D-принтер і почали друкувати вироби на фабриці в Одесі. Компанія «Червона хвиля» побудувала пілотну систему “xBeam 3D Metal Printing”, що є експериментальним 3D-принтером, який почав друкувати широкий спектр виробів зі звичайного промислового дроту, спростивши процес виготовлення деталей.

Українська фірма “PassivDom” спроектувала та продемонструвала будинок, створений за допомогою 3D-принтера. «Розумний будинок» – так назвали його автори проєкту. Основними перевагами такого проєкту є унікальність будинку та його повна автономність. Згідно із заявами розробників, із застосуванням технології 3D-друку будівля зводиться не більше ніж за добу. У створенні каркасу можна застосовувати матеріали, що не піддаються корозії (склопластик, вуглеводневе волокно) [7]. Також в Україні існує багато фірм та ентузіастів 3D-друку, які займаються розвитком нових та впровадженням уже наявних адитивних технологій. Найближчим часом цілком реально ми побачимо перші будинки, побудовані в нашій країні за технологією 3D-друку.

Нині існує декілька напрямів розвитку адитивних технологій, які потенційно цікаві для будівельної галузі та можуть бути впроваджені в Україні: це 3D-друк будинків за індивідуальним планом та елементів інфраструктури; 3D-друк елементів інтер'єру за дизайнерським проєктом; 3D-друк інструменту та запасних частин для будівельної техніки.

Як ми бачимо, технології 3D-друку в будівництві є інноваційними та здатними відповідати на запити сьогодення, але є низка питань, на які все ще немає відповіді. Незрозуміло, які наслідки буде мати впровадження 3D-друку в будівництві. Чи будуть виробники, які працюють за традиційними технологіями, чинити перепони просуванню технології? Досить гострим є питання того, чи замінить використання технології 3D-друку в будівництві робітників-будівельників?

Висновки. Технології 3D-друку застосовуються різною мірою в оборонній, аерокосмічній, автомобільній, медичній галузях та багатьох інших секторах економіки. Передові матеріали, що досліджуються в лабораторіях, поєднуються з технологією 3D-друку, а вдосконалені комп'ютерні алгоритми зробили 3D-технологію дуже доступною. Все це вказує на те, як 3D-друк став проривною технологією сьогодення.

У будівельній галузі 3D-друк можна використовувати для створення будівельних компонентів або для «друку» цілих будівель. Техніку 3D-друку може бути застосовано для вирішення кризи житла в різних частинах світу. 3D-машини, які використовують звичайні джерела енергії, такі як вітер або сонячна енергія, були розроблені для сприяння впровадженню інноваційних технологій навіть у тих районах, які позбавлені електроенергії. Споруди є екологічно чистими.

У середньостроковій перспективі за ступенем розвитку та дозрівання технології очікується, що компанії, які спеціалізуються на 3D-друці та розробляють адитивні технології для будівництва, стандартизують свої продукти та будуть виготовляти 3D-принтери, які легко збираються й транспортуються. Це дасть суттєвий поштовх у розвитку адитивних технологій, розширивши використання 3D-друку на будівельних майданчиках. Найбільш вірогідним варіантом розвитку адитивних технологій найближчим часом є те, що 3D-друк стане додатковим інструментом будівництва, а не повністю замінить його.

Список літератури:

1. Hamidreza Gh.S., Corker J., Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 93. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005> (дата звернення: 27.03.2020).
2. 3D Print Lewis Grand Hotel Erects World's First 3D Printed Hotel, Plans to Print Thousands of Homes in the Philippines Next. 2019. URL: <https://3dprint.com/94558/3d-printed-hotel-lewis-grand> (дата звернення: 27.12.2019).
3. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction / R.A. Buswell, R.C. Soar, M. Pendlebury, A.G. Gibb, F.T. Edum-Fowte, T. Thorpe. *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*. Rotterdam. The Netherlands. 2005. P. 141–150. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (дата звернення: 27.03.2020).
4. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward – looking review / D. Delgado, P. Clayton, W.J. O'Brien, C. Seepersad, M. Juenger, R. Ferron, S. Salamone. *Automation in Construction*. 2018. № 89. P. 110–119. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301620> (дата звернення: 27.03.2020).
5. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*. 2019. № 141(9). P. 1–13.
6. Sartipi F., Sartipi A. Brief review on advancements in construction additive manufacturing. *Journal of Construction Materials*. 2020. № 1. P. 2–4.
7. Андрійчук О.В., Оласюк П.Я. Застосування 3D-технологій у будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2015. Вип. 3. С. 11–18.
8. Петришина А.А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього. *Актуальні задачі сучасних технологій* : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів (25-26 листопада 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 26–27.
9. Струтинська О.В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування. *Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання*. 2018. № 20. С. 88–94.
10. The Construction Industry With Additive Manufacturing: An Opportunity Analysis And Ten-year Forecast. *SmartTech Analysis*. URL: <https://www.smartechanalysis.com/reports/additive-manufacturing-in-construction> (дата звернення: 27.03.2020).
11. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*. 2017. № 83. P. 247–258.
12. 5 Top Additive Manufacturing Startups Impacting The Construction Industry. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-additive-manufacturing-startups-impacting-the-construction-industry> (дата звернення: 27.03.2020).
13. Ragulya A.V., Zgalat-Lozynskyy O.B. Laser Sintering of Multilayer Gradient Materials. *Functional Gradient Materials and Surface Layers*, Springer. 2001. P. 151–159.
14. Selective laser sintering II. Sintering multilayer refractory composites / A.V. Ragulya, V.P. Stetsenko, V.M. Vereshchak, V.P. Klimenko, V.V. Skorokhod. *Powder metallurgy and metal ceramics*. 1998. № 37. P. 577–582.

References:

1. Hamidreza Gh.S., Corker J., Fan M. (2018) Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, vol. 93, pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005> (accessed 27 March 2020).
2. 3D Print Lewis (2019) Grand Hotel Erects World's First 3D Printed Hotel, Plans to Print Thousands of Homes in the Philippines Next. *3D Print Lewis*. Available at: <https://3dprint.com/94558/3d-printed-hotel-lewis-grand> (accessed 27 December 2019).
3. Buswell R.A., Soar R.C., Pendlebury M., Gibb A.G., Edum-Fowte F.T., Thorpe T. (2005) Investigation of the potential for applying freeform processes to construction. *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*. Rotterdam. The Netherlands, p. 141–150. Available at: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (accessed 27 March 2020).
4. Delgado 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. *Automation in Construction*, no. 89, pp. 110–119. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301620> (accessed 27 March 2020).
5. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. (2019) Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, no. 141(9), pp. 1–13.
6. Sartipi F., Sartipi A. (2020) Brief review on advancements in construction additive manufacturing. *Journal of Construction Materials*, no. 1, pp. 2–4.
7. Andriichuk O.V., Olasiuk P.Ya. (2015) Zastosuvannia 3D tekhnologii u budivnytstvi. Application of 3D technologies in construction [Application of 3D technologies in construction]. *Modern technologies and methods of calculation in construction*, vol. 3, pp. 11–18.
8. Petryshyna A.A. (2015) Tendentsii rozvytku tryvymirnogo druku, obladnannia ta materialiv dlia noho [Trends in the development of three-dimensional printing, equipment and materials for it]. *Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students: Actual Problems of Modern Technologies (Ukraine, Ternopil, November 25-26, 2015)*. Ternopil, pp. 26–27.
9. Strutynska O.V. (2018) Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku tekhnologii tryvymirnogo modeliuvannia ta drukuvannia [Current state and prospects of development of three-dimensional modeling and printing technologies]. *Scientific journal of NPU named after M.P. Drahomanov. Series 2: Computer-based learning systems*, no. 20, pp. 88–94.

10. The Construction Industry With Additive Manufacturing: An Opportunity Analysis And Ten-year Forecast. *SmarTech Analysis*. Available at: <https://www.smartechanalysis.com/reports/additive-manufacturing-in-construction> (accessed 27 March 2020).
11. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. (2017) Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*, no. 83, pp. 247–258.
12. 5 Top Additive Manufacturing Startups Impacting The Construction Industry. Available at: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-additive-manufacturing-startups-impacting-the-construction-industry> (accessed 27 March 2020).
13. Ragulya A.V., Zgalat-Lozynskyy O.B. (2001) Laser Sintering of Multilayer Gradient Materials. *Functional Gradient Materials and Surface Layers*, Springer, pp. 151–159.
14. Ragulya A.V., Stetsenko V.P., Vereshchak V.M., Klimenko V.P., Skorokhod V.V. (1998) Selective laser sintering II. Sintering multilayer refractory composites. *Powder metallurgy and metal ceramics*, no. 37, pp. 577–582.

РАЗВИТИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В статье рассмотрены современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий в строительной отрасли Украины. Проведен анализ рынка аддитивных технологий и 3D-печати в строительстве, показано, что размер мирового рынка 3D-печати проявляет постоянные тенденции к росту более чем на 14% в 2020–2027 гг. Определены основные направления развития аддитивных технологий в строительстве. Наиболее существенным препятствием на пути к полноценному внедрению 3D-печати в строительстве является отсутствие нормативной базы ее использования. Рассмотрены современные материалы и технологии для печати зданий и объектов инфраструктуры в разных странах мира. Исследованы перспективы развития технологии 3D-печати в строительной отрасли в мире и в Украине. Показано, что для выполнения таких проектов нужно привлечение как государственной поддержки, так и частных инвесторов, а также финансирование исследований по разработке и внедрению новых материалов и аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-принтер, строительство, инновации.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

In the article the modern state of additive technologies in building industry and prospects of its development in Ukraine are examined. A market of additive technologies and 3D-printing analysis is conducted. It is shown that in construction size of world market 3D-printing in 2019 estimated in 11.58 milliards of USD and shows permanent tendencies to the growth more than on 14% in a period from 2020 to 2027. The most fast-growing market of construction with the use of technologies 3D-printing is the Asia-Pacific region. The basic directions of additive technologies development in construction is: 3D - printing of houses and elements of infrastructure; 3D-printing of elements of interior; 3D-printing of instrument and awaiting-parts for a building technique. The basic advantages of 3D-printing technology in construction are providing of coordination between workplaces, increase of efficiency of labour, organization of production, providing of durability and longevity of building or elements of infrastructure, decline of unit cost, diminishing of material wastes and possibility of rapid introduction of new materials with high operating descriptions. While by the most substantial obstacle on a way to valuable introduction 3D-printing in construction there is absence of regulatory framework. The growth of demand on additive technologies in construction stimulates other industries of production such as chemical and machine-building industry. At the market of construction by the technology of 3D-printing prevails the method of extrusion, it assists the height of demand on concrete material which is used for 3D-printing and special equipment for 3D-printing. Modern materials and technologies are considered for printing of building and objects of infrastructure in the different countries of the world. Successes are investigational in development of technology 3D-printing in construction industry in the world and in Ukraine. It is shown that for implementation of such projects it is needed by bringing in of both state support and private investors, and also financing of researches on development of new materials and additive technologies.

Key words: additive technologies, 3D-printing, 3D-printer, construction, innovations.