

Сергій Іванов-Костецький¹, Інна Гуменник², Іванна Воронкова³

Національний університет «Львівська політехніка», Львів,

¹ канд. арх., доцент кафедри дизайну архітектурного середовища

e-mail: serhii.o.ivanov-kostetskyi@lpnu.ua

orcid: 0000-0002-6047-609X

² канд. арх., доцент кафедри дизайну архітектурного середовища

e-mail: inna.v.humennyk@lpnu.ua

orcid: 0000-0002-0304-0441

³ канд. арх., доцент кафедри дизайну архітектурного середовища

e-mail: ivanna.s.voronkova@lpnu.ua

orcid: 0000-0003-2711-166X

ШЛЯХИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ У СТВОРЕННІ СУЧАСНИХ ОБ'ЄКТІВ АРХІТЕКТУРИ

© Іванов-Костецький С., Гуменник І., Воронкова І., 2022

<https://doi.org/10.23939/sa2022.01.054>

Авторами запропоновано перелік традиційних будівельних матеріалів для створення об'єктів архітектури, як-от мінеральний важкий бетон з полімерною мікрофіброю та хімічними добавками для регуляції термінів тужавіння в'язучого, а також перспективні матеріали для будівництва, а саме: алюмоборосилікатне скло; різні види пластмас; сплави кераміки зроблені методом селективного лазерного спікання або солі як базового матеріалу для виконання складних реставраційних робіт у процесі реконструкції.

Результатом здійснених теоретичних та прикладних досліджень можна вважати представлені авторами висновки щодо встановлення основних переваг застосування 3D-принтерів у створенні реальних об'єктів архітектури різного функціонального призначення та вибору оптимального методу 3D-друку на конкретній марці технологічного обладнання за найбільш ефективним програмним забезпеченням.

Ключові слова: 3D-принтер, 3D-друк, інноваційна технологія, метод селективного спікання, спосіб лазерної стереолітографії, пошарове екструдкування.

Постановка проблеми

Сучасні інноваційні 3D-технології і пристрої для їхнього застосування у XXI ст. розвиваються динамічно та охоплюють усе більше аспектів у галузі архітектури при створенні будівель та споруд різноманітного призначення. В останні роки у різних частинах світу значну увагу приділено такому різновиду 3D-технологій, як видрук реальних архітектурних споруд на принтерах, в яких використовується метод поетапного створення по цифровій тривимірній моделі, що заздалегідь запроєктована для відповідного об'єкту архітектури. У цій публікації авторами розглядаються різноманітні технології та технічні засоби, їхні переваги та недоліки, а також проаналізовано основні галузі застосування 3D-принтерів в процесі реалізації архітектурних об'єктів із визначенням перспектив розвитку цієї надзвичайно ефективною технології побудови будівель та споруд.

Новою епохою у світовій архітектурній практиці к. XX – поч. XXI ст. стає використання технології 3D-друку (Лунева, Кожевникова, Калошина, 2017). До того ж тривимірний друк має відношення до адитивного виробництва, тобто наведена вище технологія дозволяє створювати об'єкти архітектури шляхом нанесення послідовно одного за другим шарів будівельного матеріалу за раніше заданою шаблоном траєкторією. Виготовлені за допомогою сучасних 3D-принтерів об'єкти архітектури в процесі швидкого виробництва з'являються або вже у готовому до експлуатації вигляді чи в окремих елементах повної заводської готовності, які потім монтуються в проєктованому положенні у складі конкретного будівельного об'єкту.

Найбільш використовуваними в технології 3D-друку є наступні три методи (Крайников, 2014): 1) спосіб спікання (селективного спікання) (SLS); 2) метод лазерної стереолітографії (SLA); 3) спосіб пошарового екструдуювання (LOM).

Головними завданнями названої публікації є здійснення аналізу основних тенденцій, вивчення недоліків та переваг у обраних технологіях 3D-друку та визначення перспективних напрямків реалізації різнопланових архітектурних об'єктів виготовлених на тривимірних принтерах нового покоління.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Реалії будівництва у XXI ст. викликали особливу зацікавленість у використанні новітніх цифрових технологій 3D-друку на промислових принтерах в процесі створення реальних об'єктів архітектури та застосування сучасних будівельних матеріалів при їхній побудові.

Особливу увагу зазначеній проблематиці та досвіду застосування 3D-технологій друку об'єктів архітектури житлово-громадського призначення приділяли представники Західної Європи та Південно-Східної Азії, а саме: архітектори, інженери-конструктори, дизайнери з Нідерландів – Яньяап Рейзенаарс, із Італії – Енріко Діні (Мальшева, Красимилова, 2013), із Франції – Ерік Гебоерсом, Маттео Бальдассарі, із Малайзії – Хасіф Рафій, із Швейцарії – Ів Бехар. Окрім цих знаних фахівців у галузі використання 3D-принтерів у процесі створення об'єктів архітектури, наведеній проблематиці свої дослідження присвятили Торнтон Томасетті, Сиска Хеннісі з китайської компанії WinSun (3D принтер (3dprinter.ua/), 2017) та світові архітектурні бюро: WASP (Італія), Houben & Van Mierlo Architecten (Нідерланди), Skidmore, Owings & Merrill (США), WATG'S Urban Architecture Studio (США), DUS Architects (Нідерланди), Apis Cor (США), Zhuo Da (Китай) (Иноземцев, Королев, Куй, 2018).

Мета статті

Метою публікації є вивчення новітніх технологій 3D-друку об'єктів сучасної архітектури та дослідження досвіду різноманітних прийомів створення і використання будівельних матеріалів нового покоління, у результаті застосування яких у всіх частинах світу з'явилися у XXI ст. креативні будівлі житлово-громадського призначення. У статті зроблено детальний аналіз основних технологій та вибору спеціальних матеріалів для створення об'єктів архітектури широкого спектру застосування.

Виклад основного матеріалу

Науково-технічний прогрес не стоїть на одному місці, а новітні технології в архітектурній практиці сьогодення щоденно розвиваються. Загалом напрямки розвитку нових технологічних рішень в реалізації об'єктів архітектури мають на меті скоротити терміни будівництва, заощадити затрати праці та робочої сили, збільшити період експлуатації будівель та, як підсумок, зекономити фінансові ресурси з отриманням кінцевої економічної вигоди. Водночас основними у зацікавленості новими цифровими технологіями є заходи з охорони навколишнього середовища та забезпечення безпечних умов праці в процесі створення сучасних об'єктів архітектури.

Принцип методу селективного спікання при тривимірному друці полягає в наступному: 3D-принтер робить сконцентрованим променем лазера або сонячного променя розплав робочої суміші зі звичайного будівельного піску (кварцового або шпатового). Автором цього способу став інженер Маркус Кайзер, який запатентував автентичне промислове обладнання для 3D-друку методом селективного спікання. Таке технологічне обладнання дозволяє розплав будівельного матеріалу вкласти у проєктному положенні з відповідних елементів будівлі, які в процесі вистигання розплаву приймають форму потрібну при експлуатації відповідної зони створеної споруди.

Для реалізації другого методу 3D-друку на промислових принтерах об'єктів архітектури, а саме способу лазерної стереолітографії, необхідно мати спеціалізоване лазерне обладнання з ванною, яка облаштована спеціальним столом. Спеціальну зазвичай полімерну композитну суміш у вигляді рідини за допомогою лазерного обладнання спікають шляхом поетапного руху лазерного променя за заздалегідь визначеною проєктом траєкторією. Специфікою наведеного покрокового методу лазерної стереолітографії є той факт, що полімерна суміш повинна мати властивість фотополімеризуватися під дією активного лазерного випромінювання. У подальшому отримані після 3D-друку на відповідному класі принтерів робочих зразків елементу будівлі, стін у ванній із фотополімерною композицією опускають нижче на крок та приступають до формування наступного шару створення відповідного елементу об'єкту архітектури. Деколи такий спосіб 3D-друку називають ще методом напilenня. Провідними в процесі використання 3D-друку таким методом є дослідники *Інституту передової архітектури Каталонії* (IAAC) та фірми (MonoPite UK), яка методом композитного з'єднання виготовляє об'єкти архітектури під назвою Stone Spray Robot. Автором зазначеного прийому в процесі застосування 3D-друку способом компонентного з'єднання елементів, що пошарового виготовленні методом лазерної стереолітографії є дослідник Енріко Діні, що запатентував дану технологію під назвою D-Shape (Мальшева, Красимилова, 2013). Особливістю методів селективного спікання та лазерної стереолітографії при використанні 3D-принтерів на об'єктах архітектури є їхня висока екологічність, бо в процесі їхнього використання при тривимірному друці передбачено застосування сонячної енергії, а головною робочою сумішшю для виробництва є пісок або полімерна композиція, який є цілком безпечним будівельним матеріалом.

Саме цей третій метод 3D-друку, т.зв. спосіб виробництва об'єктів архітектури методом пошарового екструдювання, є найбільш поширеним варіантом 3D-принтерів у реальному виготовленні будівель та споруд. Його принцип полягає в тому, що до екструдера (робочого сопла) промислового 3D-принтера скеровують швидкотверднучу дрібнозернисту суміш із важкого бетону з відповідними мінеральними, хімічними та армуючими добавками. Додатки, що вводяться у таку бетонну суміш, повинні забезпечити всі необхідні проєктні експлуатаційні характеристики майбутньої будівельної конструкції створюваного об'єкту архітектури. Уперше подібну технологію 3D-друку запропонував у 2012 році професор Бехрох Хошневіс із Південно-Каліфорнійського університету та представив свою ідею створення на місці будівництва гігантського 3D-принтера, що за своєю конструкцією нагадує конструкцію мостового крану (Рудяк, Чернышев, 2016). Найбільшого прогресу у використанні методу пошарового екструдювання в 3D-друці досягнула китайська компанія Win Sun, яка в 2014 р. приступила до масового виробництва об'єктів архітектури, що виготовлені зі суміші будівельного сміття, дрібнозернистого бетону та спеціальних добавок. Практично це був перший досвід створення бюджетного житла як об'єктів архітектури для серійного масового будівництва (3D принтер (3dprinter.ua/), 2017).

Значною мірою розповсюдження наведених вище методів 3D-друку залежить від застосованих при цьому принтерів для виготовлення в реальності об'єктів архітектури. Найбільш поширеними конструктивними вирішеннями 3D-принтерів є варіанти у вигляді мостового крану та у вигляді стріли маніпулятора (Мустафін, Барышников, 2015). Проаналізований авторами матеріал, що представлений в наступних таблицях, був презентований та обговорений на Міжнародній науковій конференції під назвою "6th World multidisciplinary civil engineering, architecture: urban

planning symposium” у 2021 р. в Празі (Чехія) (Ivanov-kostetskyi, Gumennyk, Voronkova, 2021). У табл. 1 і табл. 2 наведено базові технічні параметри, провідні виробники, переваги та недоліки в галузі застосування існуючих на сьогодні 3D-принтерів, які використовуються в архітектурній практиці в різних країнах світу. Представили в наведеному аналізі технології тривимірного друку провідні фірми, які активно зараз працюють в галузі реалізації архітектурних об'єктів методом 3D-друку. Перший варіант їхньої реалізації, коли 3D-принтер розташовується безпосередньо на будівельному майданчику та процес зведення відбувається зазвичай способом пошарового нанесення бетонної суміші на мінеральному зв'язному за траєкторією заданого заздалегідь розробленим проєктом. А в другому випадку об'ємні елементи складових будівлі друкуються на 3D-принтері в індустріальних заводських умовах, а вже потім готові фрагменти будівлі транспортуються на будівельний майданчик, де останні монтуються у традиційний спосіб вже безпосередньо на об'єкті будівництва. До того ж сильно вражає швидкість створення на 3D-принтері готового об'єкту архітектури, який становить в середньому до 24 годин часу, тобто за одну добу готова тривимірно друкowana будівля (табл. 1, табл. 2).

У сьогоднішніх умовах у результаті 3D-друку зазвичай виготовляється лише несучий каркас будівлі або споруди (стіни, перекриття, фундаменти, сходові марші та площадки, елементи покриття і даху). Наразі 3D-принтери не в змозі повністю замінити працю спеціалістів всіх будівельних спеціальностей, але, безперечно, в скорому майбутньому цей факт обов'язково станеться. При цьому завдяки технології тривимірного друку реально з'являються умови позбутися від певної одноманітності при типовій забудові міських кварталів, оскільки методом комп'ютерного моделювання можливо значно урізноманітнити архітектурну виразність будівель, що можуть монтуватись з набору готових елементів, заздалегідь виготовлених на промислових 3D-принтерах.

Аналіз представлених технологій 3D-друку та наведеного переліку фірм, що використовують тривимірні принтери в процесі виготовлення будівель та споруд з різних будівельних матеріалів, свідчить про те, що найбільш затребуваним матеріалом в таких технологіях є різноманітні легкобетонні дрібнозернисті та цементно-піщані бетонні суміші, а також прослідковується застосування матеріалів вторинної переробки будівельних процесів (рециклінгу) та використання спеціальних опалубних систем на основі полімерних складів. Водночас має місце висока варіативність у міцносних параметрах будівельних конструкцій та елементів несучого каркасу, що виготовлені за допомогою промислових 3D-принтерів. Зазначений факт дає можливість суттєво розширити галузі застосування тривимірного друку при створенні об'єктів архітектури широкого спектру та різноманітного функціонального призначення. Наступною перевагою в тривимірному друці можна вважати той факт, що за допомогою 3D-принтера реально відтворити будь-які архітектурні задуми. Нідерландський архітектор Яньяп Рейзенаарс здійснив на 3D-принтері надрукував будівлю дуже незвичної конфігурації: Landscape House, яка має вигляд стрічки Мебіуса (рис. 1). У цій будівлі архітекторові вдалося реалізувати дві паралельні поверхні споруди, що виявилися згорнутими у нескінченні стрічки Мебіуса, де кожна із створених поверхонь виступала, то в якості стелі, то підлоги. До того ж їхні зовнішні сторони будівлі переходять то назовні, то навпаки.



Рис. 1. Будівля Landscape House у формі стрічки Мебіуса, створена Яньяпом Рейзенаарсом (Нідерланди)

Другою цікавою особливістю, надрукованою на промисловому тривимірному принтері “D-Shape” будівлею авторства Енріко Діні (Італія) з піску змішаного зі спеціальним зв’язним в цій будівлі є той факт, що згаданий архітектурний об’єкт виявився однією з наймасштабніших споруд у світі, які виготовлені за технологіями 3D-друку.

Таблиця 1

Аналіз технічних параметрів у тривимірному друці будівель у сучасній архітектурі

№ з/п	Фірма-розробник 3D-принтера	Матеріал, що використано в архітектурному об’єкті	Параметри міцності матеріалу, МПа		Густина матеріалу, кг/м ³
			Міцність на згин	Міцність на стиск	
1.	WinSun (Китай)	Цементно-піщана суміш, відходи будівельного сміття після рециклінгу та стугальні добавки	8,2	35,0	2200
2.	Contour Crafting Corporation (США)	Високоміцна цементна суміш або склофібробетон з додаванням каоліну	-	більше 30,0	2350
3.	Bet Abram (Словенія)	Торкрет бетон з піщано-гравійним заповнювачем	-	-	2300
4.	Loughborough University (Великобританія)	Цементний дрібнозернистий бетон	13,0	110,0	2250
5.	Sy Be Construction (Нідерланди)	Цементно-піщаний бетон на мінеральному зв’язному	6,0	45,0	2250
6.	Vatiprint 3D (Франція)	Пінополіуретанова опалубка, що заповнена цементним бетоном	-	0,16	30
7.	MIT Media Lab (США)	Пінополіуретанова опалубка, що заповнена цементним бетоном	-	-	-
8.	DUS Architects (Нідерланди)	Вторинний пластик як опалубка, що заповнена легкою бетонною сумішшю	-	-	-

Таблиця 2

Переваги та недоліки технологічних рішень для виготовлення будівель на 3D-принтерах

№ з/п	Фірма-розробник 3D-принтера	Переваги при даному способі 3D-друку будівлі	Недоліки при такому способі 3D-друку будівлі
1	2	3	4
1.	WinSun (Китай)	Використовує відходи будівельного виробництва та дисперсне армування фіброю	Потребує значних виробничих площ та персоналу для обслуговування процесу
2.	Contour Crafting Corporation (США)	Висока варіативність у виборі матеріалу армування	Нерівність в отриманій поверхні, наявність нефункціональної опалубки
3.	Bet Abram (Словенія)	Наявність у складі бетону спеціальних протиусадкових хімічних добавок	Нерівність використаної опалубки
4.	Loughborough University (Великобританія)	Висока міцність конструктивів, армування конструкцій	Нерівність вертикальних поверхонь стін

Продовження табл. 2

1	2	3	4
5.	Sy Be Construction (Нідерланди)	Висока міцність та армування конструкцій будівлі	Наявність нерівностей на вертикальній поверхні стін
6.	Batiprint 3D (Франція)	Швидкий процес тужавіння, забезпечення рівної вертикальної поверхні	Відносно низькі характеристики міцності та потребує захисту від зовнішніх факторів впливу
7.	MIT Media Lab (США)	Мобільний екструдер; опалубка, що виконує функції зовнішнього армування конструкції	Неконтрольовані геометричні розміри; поверхня, що потребує захисту від атмосферних зовнішніх факторів впливу
8.	DUS Architects (Нідерланди)	Можливість використання вторинної сировини	Довготривалий процес виготовлення зовнішньої та внутрішньої опалубки

Окрім представлених вище технологічних прийомів 3D-друку, які орієнтовані на реалізацію будівель безпосередньо на будівельному майданчику, дуже цікавим є досвід китайської компанії Zhuo Da, яка збудувала двоповерховий будинок методом укрупнювального модульного монтажу за 3 години. Водночас виготовлені в заводських умовах готові модулі оздоблюють зсередини декоративними фактурами під мармур, граніт або дерево; облаштовують інженерними мережами, сантехнічними приладами та вбудованими меблями. Доставлені модулі повної заводської готовності на об'єкті монтуються в умовах будівельного майданчика, після чого отримуємо готову будівлю на 90 %, в якій треба завершити тільки ділянки, де з'єднуються, привезені на об'єкт, модульні елементи (рис. 2). Особливістю зведеного за технологією 3D-друку при виготовленні на виробничих потужностях Zhuo Da є той факт, що надрукований будинок в стані витримувати землетрус до 9 балів і має підвищену вогнестійкість із покращеними показниками теплопровідності (Иноземцев, Королев, Куй, 2018).



Рис. 2. Загальний вигляд двоповерхового будинку, зведеного компанією Zhuo Da за допомогою 3D-принтера


На сьогоднішній час реалізації об'єктів архітектури, що створені за допомогою 3D-принтерів у цілому світі, заважає лише відсутність узгодженої політики в галузі розробки низки нормативних документів і адекватних норм та будівельних правил, які би систематизували умови для функціонування існуючих приладів для тривимірного друку та сформулювали необхідні вимоги, що регулюють усі відомі технологічні прийоми і методи створення будівель та споруд для умов сучасної архітектурної практики. У табл. 3 авторами представлено найбільш відомі об'єкти

архітектури у світі, що створені за допомогою тривимірного друку при використанні промислових 3D-принтерів шляхом застосування наведених вище методів побудови та застосування різноманітних будівельних матеріалів. До переліку цих 12-ти відомих у світі об'єктів архітектури входять будівлі та споруди створені за допомогою 3D-друку на території всіх континентів світу в період з 2003 по 2019 рр. (Architime.ru (architime.ru/), 2020) (табл. 3).

Аналіз даних, що наведено в табл. 3, дає право констатувати той факт, що технології тривимірного друку використовують в архітектурній світовій практиці для різноманітних за функціональним призначенням об'єктів як для будівництва житлово-громадських будівель, так і для реставраційних робіт для сьогодення та майбутнього в сучасній архітектурі.



Таблиця 3

**Об'єкти архітектури, реалізовані у світі в період
з 2003 до 2019 рр. за методами 3D-друку**

№ з/п	Назва, країна та фірма будівництва об'єкту архітектури	Коротка характеристика об'єкту архітектури.	Візуалізації надрукованих на 3D-принтерах будівель та споруд
1	2	3	4
1.	Pod Skyscraper (житлова будівля), м.Токіо (Японія). Розробник-архітектор Хасіф Рафій.	Багатоповерховий житловий комплекс із 3D-принтером, який розташований на верхньому поверсі хмарочосу.	
2.	Комплекс котеджних будинків масового будівництва у містах Латинської Америки (Бразилія, Колумбія, Болівія), дизайн-студія Fuseproject. Архітектор Ів Бехар.	Одноповерхові однородинні будинки для бюджетного заселення.	
3.	Gaia (будівля з екологічно чистих матеріалів), м. Масса-Ломбарда (Італія), 3D-принтер марки Crane Wasp Автори – архітектурне бюро WASP.	Об'єкт архітектури, створений із відходів переробки рису (солома, рослинне лушпиння).	
4.	Milestone (житлові будівлі для оренди), м. Ейндговен (Нідерланди), Технологічний університет Ейндговена Архітектурне бюро – Houben & Van Mierlo Architecten.	Будинки “вільної форми та текстури” для організації оренди одноповерхового житла.	

Продовження табл. 3

1	2	3	4
5.	<p>Skidmore (виставковий павільйон в ландшафті), м. Сکیدмор (США). Лабораторія Oak Ridge, архітектурна фірма Skidmore, Owings & Merrill (SOM).</p>	<p>Виставковий павільйон, виготовлений із полімерних матеріалів. Будівля працює за принципом пасивного дому.</p>	
6.	<p>Curve Appeal (житлова будівля складної конфігурації), м. Чикаго (США), Розробник WATG'S Urban Architecture Studio.</p>	<p>Дугоподібна структура контуру будівлі, що виготовлена з вуглецевого волокна та скляних віконних панелей.</p>	
7.	<p>Mobile Europe (житлова будівля з функціональним фасадом), м. Амстердам (Нідерланди). Архітектурне бюро DUS Architects.</p>	<p>Будівля для житла з фасадом з спеціальної пластмаси, яка виготовлена на біологічній основі (рослинна і лляна олія).</p>	
8.	<p>Dubai Future Foundation (офісна будівля), м. Дубаї (ОАЕ), Автори: Торнтон Томасетті, Сиска Хеннісі (компанія WinSun, Китай).</p>	<p>Офісна будівля з білим фасадом футуристичного вигляду зроблена методом пошарової екструзії з бетонної дрібнозернистої суміші.</p>	
9.	<p>Житловий одноповерховий будинок, м. Ступіно (Росія), Компанія Aris Cor (США). Інженер-розробник Нікіта Чен-Юн-Тай.</p>	<p>Уперше в Росії, що був виготовлений методом 3D-друку з багатошарового екструзійного бетону. Загальна площа будівлі – 38 м². Будівництво здійснювалося 24 години при від'ємній температурі - 20°C.</p>	
10.	<p>Офісна будівля, м. Дубаї (ОАЕ), Компанія Aris Cor (США).</p>	<p>Найбільша у світі будівля, створена за допомогою 3D-друку, що надрукована безпосередньо на будівельному майданчику.</p>	

1	2	3	4
11.	Житлова будівля, каркас та інтер'єр якої надруковані на 3D-принтері, м. Сучжоу (Китай), (компанія WinSun, Китай)	Особняк, що роздрукований одночасно з несучим каркасом будівлі, внутрішніми перегородками та влаштованими інженерними мережами.	
12.	Скульптура, що відновлена під час реставраційних робіт, м.Париж (Франція), Архітектурно-реставраційне бюро Concr3De, архітектори – Ерік Гебоерсом, Маттео Бальдассарі.	Під час реставрації собору "Нотр-Дам де Парі". Фігура горгулії Стрикаса, що була знищена під час пожежі. Використано суміш із зібраного та збереженого на місці будівельного матеріалу.	

Висновки

Здійснений у публікації аналіз досвіду створення об'єктів архітектури у світі при використанні 3D-принтерів дозволяє констатувати, що така технологія виготовлення будівель та споруд має як суттєві переваги, так і деякі недоліки.

До проблемних питань, що виникають у процесі впровадження 3D-друку в реалізації сучасних архітектурних об'єктів, можна віднести наступне:

- відсутність узгодженої позиції у нормативній базі практично всіх країн світу, що використовують технології тривимірного друку;
- висока вартість технологічного обладнання для 3D-друку об'єктів архітектури;
- певні обмеження в габаритах будівель та споруд, що регламентовані відповідними розмірами промислових 3D-принтерів;
- особливі умови для організації та обмеження в розмірах будівельних майданчиків, що залежать від використовуваного спеціального додаткового технологічного обладнання;
- відсутні універсальні рецептури складів будівельних (бетонних, полімерних) сумішей, які варто було би застосовувати в процесі 3D-друку об'єктів архітектури масового використання.

Незважаючи на наведені вище негативні аспекти впровадження 3D-принтерів, при створенні об'єктів архітектури необхідно констатувати, що тривимірний друк в архітектурній світовій практиці має низку суттєвих переваг. До їх переліку потрібно віднести: 1) високу швидкість та точність у процесі реалізації будівель; 2) простоту при експлуатації вже створених об'єктів архітектури; 3) відносно невисоку вартість будівництва будівель і споруд; 4) мінімізацію використання ручної праці під час будівництва; 5) забезпечення комфортних та безтравматичних умов праці; 6) можливість здійснювати утилізацію відходів промисловості будівельних матеріалів під час створення об'єктів архітектури; 7) екологічність створених архітектурних об'єктів за рахунок застосування в 3D-друці безпечних та природних будівельних матеріалів.

Бібліографія

3D принтер (3dprinter.ua), 2017. Компанія WinSun совершила переворот в строительной 3D-печати. URL: <<https://3dprinter.ua/kompanija-winsun-sovershila-perevorot-v-stroitelnoj-3d-pechati/>> (дата звернення: 09.03.2021).

Иноземцев А. С., Королев Е. В., Куй З. Т., 2018. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве. *Вестник МГСУ*. № 13(7). С. 863–876. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.7.863-876>

Крайников Д., 2014. Обзорная статья по 3D строительным технологиям Портал Habr (habr.com/ru). URL: <<https://habr.com/ru/post/224299/>> (дата звернення: 09.03.2021).

Лунева Д. А., Кожевникова Е. О., Калощина С. В., 2017. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития. *Вестник ПНИПУ “Строительство и архитектура”*. № 8(1). С. 90–101. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.1.08>

Мальшева В. Л., Красмирова С. С., 2013. Лазерная стереолитография – новый подход к строительству сооружений. *Журнал магистров ПНИПУ*. № 2. С. 202–208.

Мустафин Н., Барышников А., 2015. Новейшие технологии в строительстве. 3D принтер. *Региональное развитие: электронный научно-практический журнал*. № 8(12) (econpapers.repec.org/) URL: <<https://cyberleninka.ru/article/n/noveyshie-tehnologii-v-stroitelstve-3d-printer>> (дата звернення: 09.03.2021).

Рудяк К. А., Чернышев Ю. О., 2016. Возведение зданий методом послойного экструдирования. *Современные концепции развития науки: материалы Международной научно-практической конференции*. Казань. С. 147–151.

Architime.ru (architime.ru/), 2020. Топ-10 зданий, напечатанных на 3D-принтере. URL: <https://www.architime.ru/specarch/top_10_3d_print_buildings/3d_print.htm> (дата звернення: 09.03.2021).

Ivanov-Kostetskiy S., Gumennyk I., Voronkova I., 2021. Innovative trends in architecture – creating full-scape buildings with the 3D print technology. *6th World multidisciplinary civil engineering, architecture: urban planning symposium (WMCAUS 2021). Abstract book. IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. Prague, Czech Republic, 30 August – 3 September 2021. Prague, Vol. 1203. P. 209. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/2/022099>

Reference

3D printer (3dprinter.ua), 2017. Kompaniya WinSun sovershila perevorot v stroitelnoj 3D-pechati. URL: <<https://3dprinter.ua/kompanija-winsun-sovershila-perevorot-v-stroitelnoj-3d-pechati/>> (data zvernennya: 09.03.2021).

Inozemcev A. S., Korolev E. V., Kuj Z. T., 2018. Analiz sushestvuyushih tehnologicheskikh reshenij 3D-pechati v stroitelstve. *Vesnik MGSU*. No. 13(7). S. 863–876. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.7.863-876>

Krajnikov D., 2014. Obzornaya statya po 3D stroitelnyim tehnologiyam Portal Habr (habr.com/ru). URL: <<https://habr.com/ru/post/224299/>> (data zvernennya: 09.03.2021).

Luneva D. A., Kozhevnikova E. O., Kaloshina S. V., 2017. Primenenie 3D-pechati v stroitelstve i perspektivy ee razvitiya. *Vesnik PNIPU “Stroitelstvo i arhitektura”*. No. 8(1). S. 90–101. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.1.08>

Malysheva V. L., Krasimirova S. S., 2013. Lazernaya stereolitografiya – novyj podhod k stroitelstvu sooruzhenij. *Zhurnal magistriv PNIPU*. No. 2. S. 202–208.

Mustafin N., Baryshnikov A., 2015. Novejshie tehnologii v stroitelstve. 3D printer. *Regionalnoe razvitie: elektronnyj nauchno-prakticheskij zhurnal*. No. 8(12) (econpapers.repec.org/) URL: <<https://cyberleninka.ru/article/n/noveyshie-tehnologii-v-stroitelstve-3d-printer>> (data zvernennya: 09.03.2021).

Rudyak K. A., Chernyshev Yu. O., 2016. Vozvedenie zdaniy metodom poslojnogo ekstrudirovaniya. *Sovremennye koncepcii razvitiya nauki: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-praktichnoj konferencii*. Kazan. S. 147–151.

Architime.ru (architime.ru/), 2020. Top-10 zdaniy, napechatannyh na 3D-printere. URL: <https://www.architime.ru/specarch/top_10_3d_print_buildings/3d_print.htm> (data zvernennya: 09.03.2021).

Ivanov-Kostetskiy S., Gumennyk I., Voronkova I., 2021. Innovative trends in architecture – creating full-scape buildings with the 3D print technology. *6th World multidisciplinary civil engineering, architecture: urban planning symposium (WMCAUS 2021). Abstract book. IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. Prague, Czech Republic, 30 August – 3 September 2021. Prague, Vol. 1203. R. 209. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/2/022099>

Serhii Ivanov-Kostetskyi¹, Inna Gumennyk², Ivanna Voronkova³,

Lviv Polytechnic National University, Lviv

¹ PhD, associate professor at the Department of Architectural Environment Design

e-mail: serhii.o.ivanov-kostetskyi@lpnu.ua

orcid: 0000-0001-8239-942X

² PhD, associate professor at the Department of Architectural Environment Design

e-mail: inna.v.humennyk@lpnu.ua

orcid: 0000-0002-0304-0441

³ PhD, associate professor at the Department of Architectural Environment Design

e-mail: ivanna.s.voronkova@lpnu.ua

orcid: 0000-0003-2711-166X

WAYS OF APPLYING 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF MODERN ARCHITECTURAL OBJECTS

© Ivanov-Kostetskyi S., Gumennyk I., Voronkova I., 2022

The authors analyzed the available technological solutions for 3D print in the process of constructing real architectural structures; presented the relevant data on technical parameters of the contemporary three-dimensional printers; the problems for the development of the technology have been conceptualized, as well as the choice of optimal materials and engineering structures with regard for peculiarities of selected methods of layer-wise extrusion or making buildings parts with their further assembling into the final structure.

The authors suggested a list of traditional construction materials to create architectural projects such as mineral heavy weight concrete with the polymer disperse fiber and chemical additives to regulate the terms for hardening astringency, and the promising other materials to produce buildings such as structural glass, various kinds of plastics, ceramic alloys (produced through selective laser sintering), and salt as a basic material to make complex restoration works in the reconstruction process.

The outcome of the undertaken theoretical and applied research is presented by the authors in the findings concluding about key benefits from using 3D printers in creating real architectural facilities for various functions, and the choice of an optimal 3D print method on the specific brand of manufacturing machinery with the most efficient software. The authors identified the application areas of the most optimal, economically and structurally justified construction materials fitting the selected technology to build an architectural structure on a 3D printer. The approach can help create relatively inexpensive, aesthetically and functionally interesting architectural facilities for various purposes. In the process of their construction, they entail minimum costs in terms of labor and material resources. It offers broad perspectives to apply 3D printers in the world's architectural practices.

Key words: 3D printer, 3D printing, innovative technology, selective laser sintering method, laser stereolithography method, multilayer extrusion.