

УДК 624.05:004.94

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.165.1254

ПІДГОТОВЧИЙ ЕТАП БУДІВНИЦТВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

СОПІЛЬНЯК А. М.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
СІРЕНОК К. О.², асп.

^{1*} Кафедра нарисної геометрії та графіки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-80, e-mail: sopilniak.artem@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3067-0529>

² Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-80, e-mail: sirenok.kyrylo@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1231-2338>

Анотація. Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технології будівельного 3D-друку зумовлений зростаючою потребою у швидкому та економічно ефективному зведенні будівель і споруд. Дефіцит кваліфікованих трудових ресурсів, необхідність відновлення пошкодженого житлового фонду та підвищення продуктивності будівельних процесів актуалізують впровадження адитивних технологій у практику будівництва. Попри наявність реалізованих об'єктів у різних країнах, технологія залишається недостатньо регламентованою, а більшість технічних рішень мають експериментальний характер. У зв'язку з цим особливої уваги потребує підготовчий етап будівництва, що передбачає узгодження параметрів матеріалів, цифрового моделювання та налаштування обладнання в межах чітко структурованого підходу. **Мета.** Метою статті є визначення та систематизація основних аспектів підготовчого етапу будівництва із застосуванням технології будівельного 3D-друку, а також оцінка можливості адаптації методик випробувань, регламентованих нормативними документами традиційного будівництва, до умов адитивного виробництва. **Висновок.** У роботі систематизовано складові підготовчого етапу будівництва з урахуванням специфіки технології будівельного 3D-друку та обґрунтовано необхідність комплексного узгодження матеріальних, технологічних і цифрових параметрів процесу. За результатами експериментальних досліджень встановлено вплив вмісту води на екструзійну придатність і міцність матеріалу. Показано, що цифрове моделювання та формування керуючих програм повинні здійснюватися з урахуванням технічних можливостей обладнання, а узгодження геометричних і технологічних параметрів є необхідною умовою забезпечення стабільності процесу друку. Отримані результати підтверджують доцільність системного підходу до організації підготовчого етапу будівництва із застосуванням адитивних технологій та окреслюють напрями їх подальшої стандартизації.

Ключові слова: будівельний 3D-друк; адитивні технології; відновлення пошкоджених будівель; програмне забезпечення для 3D-друку; підготовчий етап будівництва

PREPARATORY STAGE OF CONSTRUCTION USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

SOPILNIAK A.M.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
SIRENOK K.O.², PhD Stud.

^{1*} Department of Descriptive Geometry and Graphics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-80, e-mail: sopilniak.artem@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3067-0529>

² Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-80, e-mail: sirenok.kyrylo@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1231-2338>

Abstract. Problem statement. The rapid development of building 3D printing technology is driven by the growing demand for fast and cost-effective construction of buildings and structures. The shortage of qualified labor, the need to restore damaged housing stock, and the requirement to increase construction productivity necessitate the implementation of additive technologies in construction practice. Despite the existence of completed projects in various countries, the technology remains insufficiently regulated, and most technical solutions are still experimental in nature. Therefore, particular attention should be paid to the preparatory stage of construction, which involves the coordination of material parameters, digital modeling, and equipment setup within a clearly structured approach. **Purpose.** The purpose of this

article is to identify and systematize the key aspects of the preparatory stage of construction using building 3D printing technology, as well as to assess the possibility of adapting testing methods regulated by conventional construction standards to the conditions of additive manufacturing. **Conclusions.** The study systematizes the components of the preparatory stage of construction considering the specifics of building 3D printing technology and substantiates the necessity of integrated coordination of material, technological, and digital parameters. Experimental results confirm the influence of water content on extrusion performance and compressive strength of the material. It is demonstrated that digital modeling and print control program generation must take into account the technical capabilities of the equipment, while the coordination of geometric and technological parameters is essential for ensuring process stability and dimensional accuracy. The findings confirm the feasibility of a systematic approach to organizing the preparatory stage of construction using additive technologies and outline directions for their further standardization.

Keywords: *building 3D printing; additive technologies; restoration of damaged buildings; 3D printing software; preparatory stage of construction*

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток і активне впровадження технології будівельного 3D-друку у світі відбувається на тлі зростання потреби в швидкому та економічно ефективному зведенні об'єктів. Збільшення чисельності населення, дефіцит кваліфікованої робочої сили, а також необхідність відновлення зруйнованого житлового фонду зумовлюють пошук інноваційних рішень у будівельній галузі. Одним із таких рішень є застосування адитивних технологій, що дозволяють автоматизувати окремі технологічні процеси та скоротити строки виконання робіт.

На сьогодні об'єкти, зведені методом будівельного 3D-друку, реалізуються в ряді країн, що підтверджує практичну можливість та технологічну доцільність використання даного підходу. Водночас, попри наявність позитивного досвіду, технологія залишається недостатньо регламентованою на нормативному рівні. Значна частина технічних рішень має експериментальний або індивідуальний характер, що ускладнює стандартизацію процесів та стримує її широкомасштабне впровадження.

Особливого значення в умовах переходу від експериментального застосування до системного впровадження технології набуває підготовчий етап будівництва, оскільки саме на цьому етапі закладаються основні організаційно-технологічні рішення, що визначають подальший розвиток усього процесу зведення об'єкта. Узгодження параметрів матеріалів, цифрового моделювання та налаштування обладнання повинно здійснюватися в межах чітко структурованого підходу.

Аналіз публікацій. Питання застосування технології будівельного 3D-друку активно висвітлюються у сучасних наукових дослідженнях, де основну увагу зосереджено на реологічних властивостях сумішей, параметрах екструзії та забезпеченні формостійкості надрукованих конструкцій. Так у роботі [6] узагальнено технологічні проблеми екструзійного 3D-друку на основі аналізу літературних джерел і експериментальних досліджень, проведених у Великій Британії, Франції, Данії та США. Авторами визначено критично важливі взаємозв'язки між властивостями матеріалів, виробничими параметрами та проєктними рішеннями, а також окреслено напрями подальших досліджень у цій сфері.

Серед вітчизняних науковців проблематику матеріалів для будівельного 3D-друку досліджував професор Микола Савицький. Так, в роботі [5] здійснено оцінювання фізико-механічних характеристик бетонів шляхом випробування зразків-кубів, відібраних безпосередньо з надрукованих конструкцій, а також виготовлених в інвентарних формах, що дало можливість встановити вплив технології пошарового формування на показники міцності матеріалу.

У низці досліджень [1; 2; 9] також представлено результати розроблення спеціалізованих сумішей для 3D-друку з підвищеними показниками екструзійної придатності та ранньої міцності. Водночас застосування таких матеріалів може супроводжуватися збільшенням трудомісткості, вартості та логістичних

ускладнень через використання спеціалізованих або малодоступних компонентів.

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить про активний розвиток матеріалознавчих і технологічних аспектів будівельного 3D-друку, тоді як питання комплексної організації підготовчого етапу будівництва з урахуванням узгодження матеріальних, технологічних і цифрових параметрів потребують подальшої систематизації, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

Мета статті та задачі дослідження. Метою даної статті є розгляд та викладення основних аспектів підготовчого етапу будівництва з використанням технології 3D-друку, дослідження окремих фізико-механічних характеристик матеріалів з використанням методик регламентованих нормативними документами традиційного будівництва та оцінка можливості їх адаптації до умов адитивного виробництва.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

– Проаналізувати склад і зміст робіт підготовчого етапу будівництва за традиційною технологією та визначити перелік робіт з урахуванням застосування будівельного 3D-друку.

– Визначити фізико-механічні характеристики матеріалів, що є визначальними для технології екструзійного друку, шляхом проведення лабораторних випробувань та апробації на спеціалізованому обладнанні.

– Обґрунтувати оптимальний склад будівельної суміші з урахуванням вимог технологічності та міцності.

– Проаналізувати програмне забезпечення для цифрового моделювання об'єктів і формування керуючих програм друку, здійснити їх порівняльну оцінку та розглянути сучасну світову практику застосування.

– Узагальнити взаємозв'язок матеріальних, технологічних і цифрових складових підготовчого етапу будівництва із застосуванням адитивних технологій.

Виклад матеріалу. Важливим етапом кожного будівельного процесу та будівництва взагалі є підготовчий етап. У загальному сенсі підготовчий етап будівництва – це сукупність організаційних, технічних та проектних заходів, спрямованих на створення необхідних умов для виконання будівельних робіт. Так в традиційному будівництві підготовчий етап охоплює наступні процеси: вибір та аналіз будівельного майданчику; проектування об'єкту будівництва; вибір будівельних матеріалів і технологій; створення умов для початку будівництва, що полягає у забезпеченні організаційної, технічної та документальної готовності, необхідної для переходу до виконання основних будівельних робіт. Дані види робіт визначені та регламентуються відповідною нормативно-технічною документацією.

На сучасному етапі розвитку будівельної галузі важливу роль відіграють технології інформаційного моделювання та інноваційні методи будівництва. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є застосування технології 3D-друку в будівництві. Технологія 3D-друку являє собою процес формування суцільних тривимірних об'єктів практично довільної геометричної конфігурації на основі цифрової моделі. В даний час найбільш поширеним методом 3D-друку бетону є пошарове нанесення ниток пластичного матеріалу, що деформується, методом екструзії. [7]. Екструзія являє собою процес, за якого матеріал продавлюється через сопло та укладається у задану позицію відповідно до траєкторії переміщення друкувальної головки в просторі. Даний метод був уперше запропонований доктором Борохом Хошневісом у 2004 році та запатентований під торговельною маркою Contour Crafting. [1]. Використання зазначеної інноваційної технології дозволяє розширити ступінь автоматизації будівельного виробництва шляхом інтеграції автоматизованих систем будівництва з технологією інформаційного моделювання. Створена цифрова модель об'єкту може безпосередньо передаватися на друкуючий апарат за допомогою спеціальної

системи команд G-code, визначаючи параметри його роботи для відтворення змодельованого об'єкта в натуральну величину.

Проте відносна новизна та інноваційний характер цієї технології, а також підвищення рівня автоматизації, зумовлюють необхідність виконання додаткових кроків на етапі підготовки до будівництва. Зокрема, поряд із підготовчими процесами, характерними для традиційних методів будівництва, при адитивному виробництві будівельних об'єктів особливої уваги потребують підбір і дослідження матеріалів, а також моделювання об'єктів з урахуванням особливостей даної технології і налаштування параметрів процесу друку. Слід зазначити, що дані процеси взаємопов'язані і можуть впливати один на одного.

Однією з визначальних характеристик сумішей для будівельного 3D-друку є їх удобоукладальність. У технології адитивного виготовлення вона визначається здатністю матеріалу забезпечувати безперебійну подачу та прокачування через екструзійну систему і сопло друкуючої головки з одночасним швидким набором початкової структурної стійкості після нанесення. Консистенція суміші має бути підібрана таким чином, щоб забезпечувалася стабільна екструзія матеріалу на робочу поверхню без закупорювання сопла та розривів потоку, а також збереження заданої геометрії шару і форми надрукованого елемента після укладання.

Підбір оптимальної удобоукладальності сумішей для будівельного 3D-друку здійснюється експериментальним шляхом. У зв'язку з відсутньою нормативною регламентацією методик випробувань саме для адитивних технологій, на практиці використовують адаптовані експериментальні підходи та випробувальні процедури, запозичені з традиційних технологій виготовлення будівельних розчинів і бетонів.

Для контролю даного параметра було використано експеримент зі струшувальним столиком, який регламентується стандартом

ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Відповідно до вимог стандарту на диск столика встановлюється форма-конус зазначених розмірів, яку заповнюють розчином із ущільненням штикуванням. Після зняття форми виконують 30 ударів-струшувань із періодичністю один удар за секунду. Після завершення випробування вимірюють діаметр розтікання розчину, який фіксують та порівнюють із нормативними значеннями. У ході підбору оптимального показника зручності укладання було проведено серію експериментальних випробувань, яка включала приготування будівельного розчину, виконання пробного друку сумішшю на будівельному 3D-принтері, а також фіксацію величини розтікання розчину на струшувальному столику.

Для приготування будівельного розчину використовували готову суху суміш, до складу якої входили портландцемент, мінеральні заповнювачі, модифікуючі добавки, фіброволокно та вода. Регулювання показника зручності укладання здійснювали шляхом зміни водоцементного співвідношення без застосування пластифікуючих добавок. Зазначений підхід було обрано з метою мінімізації кількості змінних факторів та виключення впливу хімічних добавок на процеси тужавлення і формування міцності матеріалу.

Початковий вміст води визначали відповідно до вимог випробування на струшувальному столику, згідно з якими величина розтікання розчину повинна становити 106–115 мм. Отриманий склад перевіряли на здатність до екструзії на будівельному 3D-принтері, за результатами чого було встановлено недостатню текучість суміші та незадовільну прохідність через сопло принтера, що свідчить про надмірну жорсткість консистенції розчину.

Пробний друк сумішей виконували із використанням будівельного 3D-принтера порталного типу, оснащеного шнековою системою подачі матеріалу. Друк здійснювали через сопло діаметром 25 мм при фіксованій швидкості переміщення друкувальної головки 60 мм/с, висоті шару 25 мм та висоті розміщення друкуючої

голівки над робочим полем 40 мм. Параметри друку протягом усіх експериментальних досліджень залишалися незмінними.

Подальший підбір оптимального вмісту води здійснювали шляхом поетапного його збільшення. Кожен дослідний склад

піддавали перевірці на здатність до стабільної екструзії та забезпечення формостійкості при нанесенні наступних шарів. Паралельно визначали величину розтікання розчину на струшувальному столику. Для зручності сприйняття інформацію було зведено в таблицю 1.



а



б

Рис. 1. Результати проведення експерименту зі струшувальним столиком: а – дослід № 1 – розтікання розчину 113 мм; б – дослід № 2 – розтікання розчину 185 мм

Таблиця 1

Результати експериментального підбору водовмісту суміші для 3D-друку

№ досліду	Маса сухої суміші, кг	Вміст води, л	Величина розтікання розчину, мм	Екструзійна придатність
1	1	0,16	113	Незадовільна
2	1	0,165	120	Обмежено придана
3	1	0,175	147	Задовільна
4	1	0,185	172	Задовільна
5	1	0,19	185	Оптимальна

Отже, на підставі отриманих результатів встановлено, що дослідні зразки № 1 та 2 характеризувалися підвищеною жорсткістю та недостатньою рухливістю, що ускладнювало проходження суміші через сопло екструдера. При цьому суміш, що подавалася через сопло, мала нерівномірну структуру та укладалася переривчасто.

Екструзійна придатність зразків № 3 та 4 була покращеною: суміш подавалася більш стабільно, однак під час друку лінійних елементів спостерігалось утворення локальних розривів шару, що свідчило про необхідність подальшого коригування складу суміші.



а



б

Рис. 2. Перевірка на здатність до екструзії суміші шляхом друку на будівельному 3D принтері: а – незадовільна екструзійна придатність; б – оптимальна екструзійна придатність

Встановлено, що при вмісті води 0,19 л на 1 кг сухої суміші отриманий розчин забезпечує необхідні технологічні властивості: екструзія відбувається стабільно та безперервно, а сформовані шари зберігають геометричну стійкість.

Не менш важливим процесом підготовки до будівництва та безпосереднього зведення об'єктів є контроль міцнісних характеристик матеріалів. Застосування технології 3D-друку, яка відноситься до інноваційних методів зведення будівельних об'єктів, потребує особливої уваги до вивчення впливу технологічних параметрів на фізико-механічні властивості матеріалу. Зокрема, зміна показників удобоукладальності суміші, часу її тужавлення, а також параметрів процесу друку може суттєво впливати на кінцеву міцність матеріалу.

Таким чином, при дослідженні показника зручності укладання будівельної суміші здійснювався відбір зразків для фіксації його міцнісних властивостей.

Згідно із загальноприйнятим визначенням будівельних термінів, суміш в'язучої речовини, дрібного заповнювача (піску), води та, за необхідності, добавок називається будівельним розчином. Оскільки склад матеріалу, що використовувався для будівельного 3D-друку, відповідає зазначеному визначенню, а спеціалізована нормативна база для випробування матеріалів, що використовуються в

технології будівельного 3D-друку, перебуває на стадії формування, під час проведення досліджень застосовували положення стандарту традиційного будівництва ДСТУ Б В.2.7-239:2010.

Так керуючись положеннями даного стандарту були виготовлені 3 серії по 3 зразки-куби в кожній з розміром ребер 70,7 мм. Куби виготовляли зі складів дослідних зразків № 1, 3 та 5, що характеризувалися вмістом води 0,16 л/кг, 0,175 л/кг та 0,19 л/кг сухої суміші відповідно. У віці 28 днів зберігання регламентованого зазначеним стандартом зразки-куби були зважені, розмічені та обміряні в характерних перерізах для визначення їх об'ємної ваги та геометричних параметрів. На наступному етапі підготовлені зразки встановлювали між опорними плитами випробувального преса П-125 таким чином, щоб навантаження передавалося рівномірно по всій площі граней. Навантаження на зразки прикладали безперервно та рівномірно зі швидкістю зростання напруження 4 кН/с до моменту руйнування. Максимальне зусилля, отримане в момент руйнування зразка, фіксували для подальшого розрахунку межі міцності розчину на стиск. Отримані результати вимірів та випробувань були зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Геометричні характеристики зразків та результати випробувань на стиск

Серія	Марка зразка	Об'єм (V), мм ³	Маса, г	Об'ємна вага, кг/м ³	Робоча площа (S), см ²	Руйнівне навантаження (P), Н
1	1 ₁	357 627	751	2 100	48,99	220 000
	1 ₂	342 792	750	2 188	47,61	146 250
	1 ₃	350 035	761	2 174	47,95	169 400
2	2 ₁	347 865	753	2 165	49,00	160 600
	2 ₂	352 799	756	2 143	49,69	110 600
	2 ₃	335 651	729	2 172	47,61	155 600
3	3 ₁	350 385	727	2 075	49,35	98 750
	3 ₂	337 977	699	2 068	47,94	108 750
	3 ₃	330 683	677	2 047	46,58	103 750

Міцність визначали шляхом ділення руйнівного навантаження на робочу площу

зразка-куба, яку приймали як середнє арифметичне значення площ верхньої та

нижньої основ. Зображення процесу випробувань наведено на рисунку 3,

результати обчислень зведені до таблиці 3.



а



б

Рис. 3. Процес випробування дослідних зразків: а – розташування зразка на пресі, б – зразки після випробування

Таблиця 3

Результати визначення міцності зразків на стиск

Серія	Марка зразка	Міцність зразка на стиск (R), МПа	Середня міцність розчину в серії, МПа
1	1 ₁	44,91	36,98
	1 ₂	30,72	
	1 ₃	35,33	
2	2 ₁	32,78	29,24
	2 ₂	22,26	
	2 ₃	32,68	
3	3 ₁	20,01	21,66
	3 ₂	22,69	
	3 ₃	22,27	

Аналізуючи отримані дані можна добігти закономірного висновку, що збільшення кількості води забезпечує покращення технологічних властивостей суміші, однак призводить до зниження показників міцності матеріалу.

Як було зазначено раніше, дослідження та підбір матеріалів є важливою складовою підготовки до будівельного 3D-друку та створюють передумови для стабільної реалізації технологічного процесу. Разом із цим значну роль відіграють процеси цифрового моделювання об'єктів і налаштування параметрів друку, що забезпечуються спеціалізованим програмним забезпеченням.

Взагалі пріоритетними програмними комплексами для створення об'єктів за технологією будівельного 3D-друку є

системи, що реалізують принципи об'ємного моделювання. Серед програмного забезпечення, що використовується для розроблення цифрових моделей об'єктів, можна виділити AutoCAD 3D, ArchiCAD та SketchUp. Особливої уваги потребують програмні комплекси Revit та Rhinoceros, які найбільш широко застосовуються у сфері цифрового будівництва.

Програмний комплекс Revit реалізує принципи інформаційного моделювання будівель (BIM), що дозволяє не лише формувати тривимірну модель об'єкта, а й інтегрувати в неї інформаційні параметри конструкцій, матеріалів та технологічних процесів. Це забезпечує можливість комплексного аналізу об'єкта ще на стадії проектування та підготовки до будівельного 3D-друку.

Програмний комплекс Rhinoceros орієнтований на створення складних криволінійних та параметричних форм, що дозволяє моделювати об'єкти з підвищеною геометричною складністю та розширювати архітектурні можливості технології будівельного 3D-друку.

Але при моделюванні об'єктів для будівельного 3D-друку необхідно враховувати конструктивні та технологічні особливості друкуючого обладнання, що визначають геометричні обмеження конструкції, параметри формування шарів та безперервність процесу друку.

До основних таких особливостей належать:

- геометричні параметри друкуючої головки – розмір та форма сопла, що необхідно враховувати при визначенні товщини конструктивних елементів та мінімальних габаритів деталей;
- об'єм резервуару (бункера) для суміші, який визначає можливий об'єм конструкцій, що можуть бути надруковані без зупинки процесу;
- розміри робочої зони принтера, що визначають максимальні габарити об'єкта.

Важливим етапом будівництва є належна організація будівельного процесу. На відміну від традиційного будівництва, у якому послідовність і графік виконання робіт визначаються проектною документацією, технологічними картами та календарними графіками, технологія будівельного 3D-друку потребує інтеграції зазначених даних в єдину цифрову систему з подальшою передачею їх до друкувального обладнання. Реалізація такої інтеграції забезпечується спеціалізованим програмним забезпеченням – слайсерами.

До основних функцій програм-слайсерів належать формування та оптимізація траєкторії руху друкувальної головки, встановлення швидкості її переміщення, регулювання швидкості подачі суміші, налаштування параметрів екструзії та геометрії пошарової побудови конструкції. Як було зазначено раніше, керування друкувальним обладнанням здійснюється за допомогою управляючого коду G-code. Саме

програма-слайсер формує цей код, який є цифровим алгоритмом реалізації проектною моделі та забезпечує трансформацію геометричних даних у керований виробничий процес.

У зв'язку з обмеженим поширенням адитивних технологій у будівництві ринок програмного забезпечення у сфері слайсінгу залишається недостатньо розвиненим. Провідні компанії галузі, зокрема ICON (США), COBOD International (Данія), Apis Cor (США/OAE), використовують власні програмні продукти, адаптовані до їхнього обладнання та технологічних рішень. У відкритому доступі переважно представлені слайсери, розроблені для 3D-друку полімерними матеріалами, зокрема Slic3r, PrusaSlicer, Simplify3D, Cura та Orca Slicer. Під час проведення експериментальних спроб друку були використані два останні слайсери із зазначеного переліку – Cura та Orca Slicer. Вибір зумовлений їх поширеністю у практиці застосування великоформатного екструзійного обладнання а також можливістю оперативного параметричного налаштування режимів друку. Інтерфейс зазначених програм забезпечує наочну візуалізацію траєкторій руху та дозволяє швидко коригувати технологічні параметри без безпосереднього редагування керуючого коду.

Разом із тим слід зазначити, що через відмінність реологічних та фізико-механічних характеристик цементних композицій від полімерних матеріалів використання зазначених програм у будівельному адитивному виробництві можливе лише після адаптації параметрів екструзії та стратегій формування траєкторій друку з урахуванням специфіки бетонних сумішей.

Висновки

У ході виконання роботи було реалізовано комплекс заходів підготовчого етапу будівництва з адаптацією до інноваційної технології будівельного 3D-друку. Досліджено основні характеристики сумішей, що застосовуються

в адитивному будівництві, зокрема показники удобоукладальності та міцності, а також встановлено їх взаємозалежність. Крім того, проаналізовано програмне забезпечення, що використовується для цифрового моделювання та підготовки керуючих програм, і оцінено можливість його адаптації до потреб будівельного 3D-друку.

У процесі дослідження удобоукладальності встановлено, що при використанні традиційних методів оцінювання та граничних параметрів, визначених нормативними підходами, екструзійна придатність суміші є недостатньою. Зокрема, при замішуванні 1 кг сухої суміші з додаванням 0,16 л води зафіксовано недостатню текучість та незадовільну прохідність матеріалу через сопло принтера, що свідчить про надмірну жорсткість консистенції. Експериментальним шляхом встановлено, що для забезпечення оптимальної удобоукладальності співвідношення води до сухої суміші має становити 0,19 л на 1 кг.

Для складів із вмістом води 0,16; 0,175 та 0,19 л/кг проведено випробування на стиск шляхом руйнування зразків-кубів на лабораторному пресі П-125. За результатами випробувань отримано значення межі міцності на стиск 36,98 МПа; 29,24 МПа та 21,66 МПа відповідно. Встановлено, що збільшення водовмісту позитивно впливає на технологічні характеристики суміші (екструзійність, формування шару), проте супроводжується зниженням показників міцності матеріалу, що підтверджує наявність компромісу між технологічністю

та конструкційною надійністю.

Окрему увагу в роботі приділено цифровому моделюванню об'єктів та підготовці їх до реалізації методом будівельного 3D-друку. Проаналізовано основні програмні комплекси, що застосовуються для створення цифрових моделей, а також програмне забезпечення для формування керуючих програм друку. Встановлено, що процес моделювання не може здійснюватися ізольовано від технологічних можливостей обладнання. Під час формування геометрії об'єкта та налаштування параметрів друку необхідно враховувати конструктивні особливості принтера. Узгодження цифрової моделі з технічними параметрами обладнання є необхідною умовою забезпечення стабільності процесу друку, геометричної точності конструкції та технологічної надійності її виготовлення.

Таким чином, підготовка до початку будівництва із застосуванням технології будівельного 3D-друку є комплексним багатофакторним процесом. Вона потребує узгодження підбору та підготовки матеріалів із цифровими процесами моделювання та слайсінгу. Проведене дослідження показало, що матеріальні властивості суміші, параметри програмного забезпечення та технічні можливості обладнання повинні розглядатися у взаємозв'язку. Подальший розвиток технології доцільно пов'язувати з уніфікацією параметрів обладнання та складів сумішей, що сприятиме підвищенню стабільності та передбачуваності результатів друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. І., Марчук В. В. Ефективні будівельні розчини для 3D-принтерів. *Будівельні матеріали та виробу*. 2019. № 101. С. 16–21. DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03.
2. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3D принтеру. *Будівельні матеріали та виробу*. 2021. № 102. С. 14–19. DOI: 10.48076/2413-9890.2021-102-02.
3. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 22 с.
4. ДСТУ Б В.2.7-239:2010. Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 38 с.
5. Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. В. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D-друку будівельних конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 2 (263–264). С. 59–68. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622.

6. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D-printing using concrete extrusion : a roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
7. Kloft H., Empelmann M., Hack N., Herrmann E., Lowke D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. *Civil Engineering Design*. 2020. Vol. 2. Pp. 131–139. DOI: 10.1002/cend.202000022.
8. Konoplianyk O., Sopilnyak A., Sirenok K., Sereda S., Yarova T. Constituent components of 3D printing in construction : mixture, reinforcement and their main characteristics. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 534. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202453401009.
9. Le T. T., Austin S. A., Lim S., Buswell R. A., Law R., Gibb A. G. F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45 (8). Pp. 1–12. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
10. Wangler T., Roussel N., Bos F. P., Salet T. A. M., Flatt R. J. Digital concrete : a review. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123. P. 105780. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105780.

REFERENCES

1. Dvorkin L.Y., Zhitkovskiy V.V., Stepasiuk Y.I. and Marchuk V.V. *Efektivni budivelni rozchyny dlia 3D- prynteriv* [Effective construction mortars for 3D-printers]. *Budivelni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2019, no. 101, pp. 16–21. DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03. (in Ukrainian).
2. Dvorkin L.Y., Marchuk V.V. and Ziatyuk Y.Y. *Tsementno-shlakovi sumishi dlia 3D prynteru* [Cement-slag mixtures for 3D-printer]. *Budivelni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2021, no. 102, pp. 14–19. DOI: 10.48076/2413-9890.2021-102-02. (in Ukrainian).
3. DSTU B V.2.7-187:2009. *Budivelni materialy. Tsementy. Metody vyznachennia mitsnosti na zghyn i stysk* [Building materials. Cements. Methods for determination of flexural and compressive strength]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2009, 22 p. (in Ukrainian).
4. DSTU B V.2.7-239:2010. *Budivelni materialy. Rozchyny budivelni. Metody vyprobuvan* [Building materials. Construction mortars. Test methods]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2010. 38 p. (in Ukrainian).
5. Savytskyi M.V., Konoplianyk O.Y., Myslytska A.O. and Liasota O.V. *Vyznachennia fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk betoniv dlia 3D-druku budivelnykh konstruksii* [Determination of physical and mechanical characteristics of concretes for 3D printing of building structures]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 2 (263–264), pp. 59–68. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622. (in Ukrainian).
6. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z. and Dirrenberger J. 3D-printing using concrete extrusion : a roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018, vol. 112, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
7. Kloft H., Empelmann M., Hack N., Herrmann E. and Lowke D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. *Civil Engineering Design*. 2020, vol. 2, pp. 131–139. DOI: 10.1002/cend.202000022.
8. Konoplianyk O., Sopilnyak A., Sirenok K., Sereda S. and Yarova T. Constituent components of 3D-printing in construction : mixture, reinforcement and their main characteristics. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 534, p. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202453401009.
9. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. and Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012, vol. 45 (8), pp. 1–12. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
10. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M. and Flatt R.J. Digital concrete : a review. *Cement and Concrete Research*. 2019, vol. 123, p. 105780. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105780.

Надійшла до редакції: 18.02.2026.

Прийнято після рецензування: 01.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.