

УДК 624
**АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ: 3D ДРУК БУДІВЕЛЬ,
РОЗРОБКА МАТЕРІАЛІВ**

Юлія Ковальчук,

канд. техн. наук, доцент кафедри хімії, доцент
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Василь Дудник,

аспірант кафедри технологій будівельних конструкцій і виробів
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Віра Гречанюк,

д-р хім. наук, завідувач кафедри хімії, професор
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Олександр Яменко,

канд. хім. наук, начальник департаменту технічного сервісу клієнтів
ТОВ з іноземними інвестиціями «Хенкель Баутехнік», м. Київ

Будівельна галузь зараз переживає значні зміни, оскільки інформаційне моделювання будівель (BIM), цифрове проектування та автоматизація будівництва чинять сильний тиск на традиційні технології. Поява передових технологій у поєднанні з вимогами часу до більш стійких і ресурсозберігаючих методів і тенденцій щодо футуристичних конструкцій спричиняє зміни в масштабі та розподілі будівництва. Такі підходи, як автоматизація процесів, пропонують великий відступ від звичайних методів будівництва. Так, адитивні технології, які стрімко розвиваються знайшли своє застосування у будівництві, зокрема друкування будинків на 3D-принтерах.

Застосування 3D-друку дозволяє реалізувати архітектурні проекти будь-якої складності, зменшити обсяг виробничих відходів, скоротити дефіцит житлового фонду та знизити матеріальні, енергетичні та трудові витрати на будівництво.

Використання 3D-друку у будівництві застосовується як для простих, так і для складних архітектурних форм, виробництва збірних елементів будівель, створення малих архітектурних форм та благоустрою території.

Технологія 3D-друку будинків втілюється за допомогою 3D-принтера, що має форму крана-маніпулятора і встановлюється безпосередньо на будівельному майданчику.

У 2014 році розпочалася справжня революція в будівельній галузі, коли був надрукований перший будинок, що відкрив нову главу в будівельних технологіях.

Зростає кількість досліджень використання 3D – принтерів у будівельному секторі, однак ця сфера все ще перебуває на ранній стадії розвитку матеріалів, масштабу та загальної вартості проекту. Друк будівельних матеріалів вимагає складу суміші, в якому час схоплювання пасти, стабільність

форми перших кількох шарів і міжшарове з'єднання між шарами ретельно контролюються та досліджуються.

Основними технологіями 3D друк, розроблених для будівельної галузі, є «Bed Deposition», «Direct Deposition», «Contour Crafting», «Concrete Printing», «DShape», які відрізняються між собою методом нанесення шарів будівельного матеріалу та кожна з яких має свої переваги та недоліки [1].

Будівельні суміші, які використовуються як «чорнила» для будівельного 3D-друку методом пошарової екструзії, мають велике значення. Склад таких будівельних сировинних сумішей грає ключову роль у технології 3D-друку. Вони можуть містити такі матеріали як портландцемент, гіпс, різні в'язучі, модифіковані активними мінеральними та хімічними добавками – такі як цементно-волокнисті (фіброцементні), гіпсоволокнисті, гіпсоцементно-волокнисті та інші. При пошаровому укладанні будівельної суміші важливо, щоб вона набирала міцність при уповільненій кінетиці початкового структуроутворення. Крім того, сировинна суміш повинна мати тиксотропні та адгезійні властивості, бути легко укладеним принтером, але при цьому не розтікатися під впливом наступних шарів і мати низькі деформації усадки під час твердіння.

Література про 3D-друк бетону значно зросла за останні роки [2-5], що свідчить про те, що економічні та екологічні проблеми, пов'язані з широкомасштабним 3D-друком бетонних конструкцій, все ще потребують оптимізації: незважаючи на значне зниження вартості робочої сили та форми. Матеріали, що використовуються зовсім не дешеві, порівняно з традиційним бетоном. Те саме стосується їхнього впливу на навколишнє середовище, оскільки, як правило, вміст цементу і деяких добавок, таких як діоксид кремнію, вищий, ніж у звичайному бетоні [3], що є необхідним для забезпечення необхідних реологічних властивостей і придатності до друку.

Розробка тиксотропної речовини, яка може бути легко екстродована під час процесу друку, зберігаючи при цьому свою початкову форму після осадження є ключовою проблемою при розробці суміші для друку

Тиксотропна поведінка – це загальне реологічне явище, яке ілюструє зменшення в'язкості колоїдної суспензії при постійній або зростаючій швидкості зсуву та відновлення в'язкості, коли матеріал знаходиться в спокої. У сумішах на основі цементу тиксотропія в стані спокою зазвичай пов'язана з флокуляцією частинок і постійною гідратацією. Під час зсуву флокули руйнуються внаслідок розриву міжчастинкових зв'язків, знижуючи в'язкість цементного тіста. Після зсуву, коли матеріал знаходиться в стані спокою, ланки перебудовуються за рахунок оборотної поведінки ефекту тиксотропії. Оскільки тиксотропія є важливою властивістю для всіх матеріалів для друку, існує потреба у відповідному протоколі тестування для кількісної оцінки поведінки суміші шляхом імітації процесу 3D-друку. Важливо також виміряти структурну швидкість нарощування та властивості відновлення з часом, щоб можна було оцінити швидкість нарощування (тобто швидкість осадження шарів) до руйнування для різних структур.

Більшість в'язучих матеріалів для 3D-друку включають використання портландцементу, як основного інгредієнта у своїх рецептурах через його властивість тиксотропності. Для ефективного покращення тиксотропних властивостей бетонних сумішей додають наноглину. Крім того, широкий спектр матеріалів, які зараз використовуються для 3D-друку, включає метали, полімери, кераміку та бетон, використання відповідного вмісту домішок, таких як суперпластифікатори, сповільнювачі, агенти, що модифікують усадку та в'язкість. На сьогодні існують багато розроблених сумішей на основі геополімерного цементу для друку неструктурних будівельних компонентів безпосередньо з цифрових моделей без будь-якої опалубки [6].

Полімери, які використовуються в 3D-друці композитів є полімолочна кислота, акрилонітрилбутадієнстирол, вініловий полімер, різноманітні полікарбосилати. Також слід зазначити, що завдяки чудовим механічним, хімічним, електричним і термічним властивостям, відмінним нанорозмірним ефектам, низькій щільності та чудовій хімічній і термічній стабільності нановуглецеві матеріали пропонують можливість розробки нового покоління адаптованих, високоефективних і багатофункціональних цементних композитів.

При розробці будівельних сумішей першим важливим завданням є пошук оптимального об'єму води в суміші, щоб задовольнити вимоги як до збільшення міцності, так і до екструзійної здатності.

Однак головним завданням у розробці суміші для друку є отримання бетону без осідання та самоущільнення, що є двома суперечливими цілями, і їх можна частково досягти одночасно. Перш за все, матеріал має бути екструдованим через головку екструдера та здатним зберігати свою форму після нанесення на друкарський шар. По-друге, наплавлені шари не повинні руйнуватися під навантаженням наступних шарів і, по-третє, повинна бути забезпечена хороша міцність зв'язку між шарами для кращих зміцнених властивостей. Розроблена будівельна суміш має бути адаптована під конкретні будівельні умови і відповідати вимогам безпеки.

Згідно з аналізом досвіду використання адитивних технологій для зведення будівель та споруд за допомогою будівельного 3D-принтера, слід відзначити переваги цього напрямку: знижує трудомісткість робіт, зменшує ризик виробничого травматизму, підвищує автоматизацію та швидкість будівництва, а також сприяє зменшенню відходів виробництва. Відсутність нормативної бази для проектування та будівництва за допомогою цієї технології на даний момент не становить серйозної перешкоди для реалізації складних проектів. Це обумовлено необхідністю покращення якості отримуваної будівельної продукції та розширенням можливостей даної технології.

Список використаних джерел:

1. Комишев Д. Г., Белятинський А. О. Інноваційні технології в будівництві: 3D-друк будівель, мобільні програми та штучний інтелект. *Bulletin*

National University of Water and Environmental Engineering. 2024. Т. 4, № 104. С. 22–43. URL: <https://doi.org/10.31713/vt420233>.

2. C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders *Mater. Des.*, 100 (2016), pp. 102-109,

3. I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Proc. Eng.*, 151 (2016), pp. 292-299, [10.1016/j.proeng.2016.07.357](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357)

4. Shengwei Sun, Siqi Ding, Baoguo Han, Sufen Dong, Xun Yu, Debao Zhou, Jinping Ou, Multi-layer graphene-engineered cementitious composites with multifunctionality/intelligence, *Composites Part B: Engineering*, Volume 129, 2017, Pages 221-232, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.063>.

5. Suvash Chandra Paul, Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Ming Jen Tan, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 18, Issue 1, 2018, Pages 311-319, ISSN 1644-9665, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.

6. Biranchi Panda, Ming Jen Tan, Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing, *Ceramics International*, Volume 44, Issue 9, 2018, Pages 10258-10265, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>.

7. Shoukat Alim Khan, Muammer Koç, Sami G. Al-Ghamdi, Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: *A systematic review for built environmental applications*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 303, 2021, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>.

УДК 674

ВИПРОБУВАННЯ СЕКЦІЙНИХ ТРУБ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

Валерій Макаренко,

д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів, професор,

Оксана Бердник,

PhD, доцент технології будівельних конструкцій і виробів, доцент,

Олексій Цапко,

PhD, старший дослідник, доцент кафедри будівельних матеріалів, доцент,

Єгор Павлов,

студент, КФКАБУ

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Відомо, що фактичні руйнування трубопроводів, осередок яких знаходився в поздовжньому заводському шві трубних секцій, спостерігали випадки розповсюдження руйнування по зварювальному з'єднанню труб. В той