

БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬ ТА БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ

Ковальчук Ю. І., Дудник В. П.

Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних Сил, 31, 03037, Київ, Україна

Анотація. У роботі проведений літературний аналіз сучасних світових досягнень в галузі 3D-друку будівель та будівельних компонентів. У матеріалах для 3D-друку з бетону використовують високі співвідношення цементу до піску, що призводить до надмірної міцності бетону на стиск та високих його витрат. У дослідженнях було зафіксовано кілька проблем, такі як тріщини в матеріалі 3D-друку, які були виявлені на другому і наступних шарах. Це може бути пов'язано з нерівною поверхнею попереднього шару. Також тріщини в затверділому бетоні можуть виникати через більшу усадку бетону через високий вміст цементу.

Ключові слова: 3D-друк, бетон, будівельні суміші, цемент.

Сучасні світові досягнення в галузі 3D-друку будівель та будівельних компонентів вражають. Технології 3D-друку, порівняно з традиційними методами зведення будівель, можна розглядати як екологічно чисту похідну, що дає практично необмежені можливості для реалізації геометричних форм різної складності. Ця технологія має переваги, такі як зниження витрат, часу, мінімізація забруднення навколишнього середовища, зменшення травматизму та ін.

На сьогодні актуальним для будівельної галузі є зменшення забруднення, пошук сталих методів і матеріалів для зменшення негативного впливу цієї галузі на навколишнє середовище. Для вирішення цих питань наукова спільнота докладає величезних зусиль у вивченні, розробці альтернативних будівельних матеріалів, які повинні хоча б частково замінити традиційні.

У перших будівельних роботах з використанням технології 3D-друку було використано термополімерний біомасовий матеріал [1]. Китайська компанія WinSun Decoration Design Engineering Co, яка розробила матеріал, схожий на бетоні і у 2014 р. їм вдалося побудувати будинки з використанням технології 3D-друку і розробленого бетону [2].

Цемент, який можна використовувати в 3D-принтері, повинен відповідати ряду вимог: бути екструдованим до прийнятного ступеня, щоб його можна було видалити з сопла принтера, мати достатні властивості пластичності, бути жорстким, щоб підтримувати інші шари без руйнування, і, нарешті, мати достатній час для збереження технологічної придатності [3]. Зусилля, спрямовані на досягнення всіх згаданих

властивостей одночасно, дуже ускладнюють розробку розчину або бетонної суміші, придатної для 3D-друку.

Для 3D-друку найчастіше використовується портландцемент, але можуть додаватися й інші матеріали, такі як мікрокремнезем, летуча зола або вапно для поліпшення властивостей. Цьому питанню присвячені роботи [4–9]. На відміну від звичайного бетону, який містить щебінь, у 3D-друку використовується лише дрібний пісок. Це необхідно для того, щоб суміш легко проходила через сопло принтера, не забиваючи його. Вода активує цемент і робить суміш пластичною. Дуже важливо точно контролювати співвідношення води до цементу, щоб досягти необхідної консистенції для друку. Також до будівельної суміші входять різні хімічні добавки (модифікатори): Ці добавки відіграють ключову роль у технології 3D-друку бетоном [10]. Вони дозволяють регулювати властивості суміші. Наприклад, суперпластифікатори, такі як полікарбоксилати, лігносульфонати, меламіно-формальдегідні, нафталін-формальдегідні смоли зменшують кількість води, необхідну для текучості суміші, що збільшує її міцність.

Прискорювачі твердіння: гіпс, сульфат алюмінію ($Al_2(SO_4)_3$), нітрат кальцію ($Ca(NO_3)_2$), гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$), різноманітні лужні солі та рідке скло (силікати). Забезпечують швидке схоплення бетону після нанесення, що дозволяє накладати наступні шари без руйнування попередніх. В роботах [11, 12] наведені результати дослідження стану та властивостей швидкотверднучих будівельних розчинів для зведення будівель способом 3D-друку.

Тиксотропні агенти: мікрокремнезем (кремнеземний дим, Silica Fume), глина, особливо бентонітова глина, метакоалін, поліетиленоксид або целюлоза. Всі ці компоненти надають суміші властивість зберігати форму, будучи при цьому достатньо текучою під тиском (під час екструзії). Тиксотропне структурне нарощування є невід'ємною властивістю свіжих цементних матеріалів, яка відіграє значну роль у здатності до перекачки, стабільності та заповненні опалубки бетоном, а також у придатності для 3D-друку. [13, 14]

У матеріалах для 3D-друку з бетону використовують високі співвідношення цементу до піску, що призводить до надмірної міцності бетону на стиск та високих витрат. У дослідженні, проведеному авторами [12], було зафіксовано кілька проблем, таких як незадовільний процес екструзії та тріщини в матеріалі 3D-друку. Тріщини, які виникають, були виявлені на другому шарі і послідовних шарах. Це може бути пов'язано з нерівною поверхнею попереднього шару. Тріщини в затверділому бетоні також можуть виникати через більшу усадку бетону через високий вміст цементу. У цьому дослідженні співвідношення цементу

до піску було зменшено, щоб знизити вартість матеріалу. Для зменшення проблем з тріщинами використовували синтетичні мікрволокна. Мета цього дослідження полягала у вивченні впливу співвідношення цементу до піску, максимального розміру часток піску та додавання синтетичних мікрволокон на свіжий і твердий бетон. На сьогодні при виготовленні будівельних сумішей для 3Д друку широко використовуються різноманітні фіброволокна: поліпропіленові волокна, скловолокно, базальтові, вуглецеві волокна, кокосові. Крім того для підвищення міцності та стійкості до тріщин у суміш можуть додаватися полімерні, скляні або інші волокна. Вони забезпечують армування, допомагаючи бетону витримувати навантаження [15]. Вибір типу фіброволокна залежить від необхідних механічних властивостей, вартості та сумісності з іншими компонентами.

Усі компоненти будівельних сумішей для 3Д друку мають бути ретельно збалансовані, щоб отримати суміш, яка має одночасно високу текучість під час екструзії та швидке наростання міцності після нанесення. Інженери працюють над пошуком найкращих рецептур швидко-тверднучого бетону, який буде достатньо зручним для викачування з сопла принтера і матиме таку ж консистенцію, міцним, як залізобетон.

Наразі компанія «Хенкель» є розробником рецептур нових еко-бетонів. Так, з використанням саме його побудований перший житловий приватний будинок в Україні з використанням технології 3D-друку в м. Ірпінь (рис. 1).

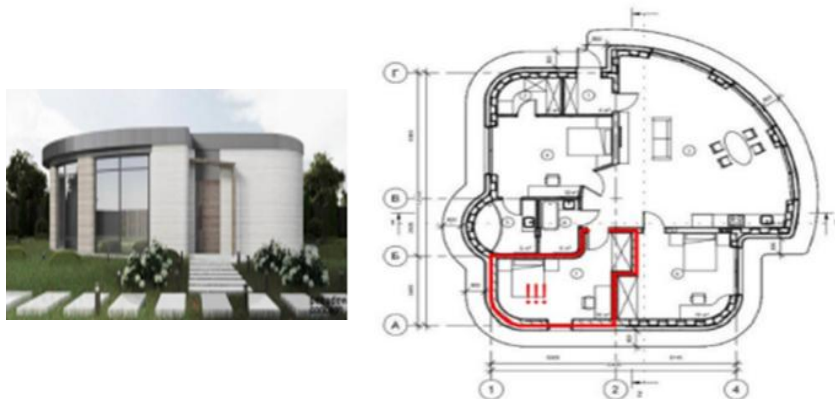


Рис. 1. Житловий будинок побудований за допомогою технології 3D-друку

Актуальним лишається питання розробки нових, унікальних хімічних добавок для 3D-друкованих будівельних систем, які задоволь-

няють конкретні будівельні вимоги, зокрема: суперпластифікатори, модифікатори в'язкості та контролю гідратації цементу. Більшість дослідників, які вивчали цю тему, надали цінні пропозиції та висновки щодо компонентів, які складають зв'язуючу фазу (матрицю) сумішей для 3D-друку.

Список використаних джерел

1. 3D PRINT CANAL HOUSE, available from: <http://3dprintcanal/house.com/construction-technique>, (2016).
2. WISUN, available from: www.yhbm.com, (2016).
3. Wu, P.; Wang, J.; Wang, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Autom. Constr.* 2016, 68, 21–31.
4. Lukas H.J. Martin, Frank Winnefeld, Elsa Tschopp, Christian J. Мьller, Barbara Lothenbach, Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement, *Cement and Concrete Research*, Volume 95, 2017, Pages 152–163, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.030>
5. Kayibanda Patrick, Richard Ocharo Onchiri, Geoffrey N. Mang'uriu / Developing Suitable Proportions for the Production of Pineapple Leaf Fibers Reinforced Normal Strength Concrete. *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 9. No. 3, July 9, 2019.
6. Ingaglio, J.; Fox, J.; Naito, C.J.; Bocchini, P. Material characteristics of binder jet 3D printed hydrated CSA cement with the addition of fine aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2019, 206, 494–503.
7. Paul, S.C.; Tay, Y.W.D.; Panda, B.; Tan, M.J. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2018, 18, 311–319.
8. Bos, F.; Wolfs, R.; Ahmed, Z.; Salet, T. Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2016, 11, 209–225.
9. Souza, M.T.; Ferreira, I.M.; Guzi de Moraes, E.; Senff, L.; Novaes de Oliveira, A.P. 3Dprinted concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. *J. Build. Eng.* 2020, 32.
10. Manikandan, K.; Wi, K.; Zhang, X.; Wang, K.; Qin, H. Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing. *Manuf. Lett.* 2020, 24, 33–37.
11. Дворкін Л., Житковский В., Степасюк, Ю., Марчук, В. Ефективні будівельні розчини для 3D-принтера // Будівельні матеріали та виробн. 16–21. 10.48076/2413-9890.2020-101-03. DOI: 10.48076/2413-9890./2020-101-03/.

12. Antoni Antoni, Widjaya, David, Wibowo, Alexander, Chandra, Jimmy, Pamuda Pudjisuryadi, Hardjito, Djwantoro. (2022). Using Calcium Oxide and Accelerator to Control the Initial Setting Time of Mortar in 3D Concrete Printing. 2022, Lecture Notes in Civil Engineering Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, p. 871–880.

13. Dengwu Jiao, Robin De Schryver, Caijun Shi, Geert De Schutter, Thixotropic structural build-up of cement-based materials: A state-of-the-art review, *Cement and Concrete Composites*, Volume 122, 2021, 104152, ISSN 0958–9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104152>.]

14. J. Assaad, K. H. Khayat, H. Mesbah Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete / *ACI Mater. J.*, 100 (2) (2003), pp. 99–107.

15. Yoo, D.-Y. and Yoon, Y.-S., 2016. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2), 125–142. doi: 10.1007/s40069-016-0143-x.