

## ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ СУМІШЕЙ В АДДИТИВНОМУ БУДІВНИЦТВІ

<sup>1</sup>ДПТНЗ «Хмільницький аграрний центр ПТО» ;

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*У роботі розглянуто науково-технічні засади розробки композитних сумішей для будівельного 3D-друку з фокусом на диференціацію матеріалів для зовнішніх та внутрішніх конструкцій. Проаналізовано реологічні характеристики цементних, глиняних та гіпсових сумішей, зокрема їх екструдованість, тиксотропію та здатність до нарощування шарів.*

**Ключові слова:** будівельний 3D-друк, реологія сумішей, поліпропіленова фібра, піноскло, гіпсові композиції, будівельна глина, екструдованість, екологічне будівництво.

### **Abstract**

*The work explores the scientific and technical principles of developing composite mixtures for building 3D printing with a focus on the differentiation of materials for external and internal structures. The rheological characteristics of cement, clay and gypsum mixtures were analyzed, in particular their extrudability, thixotropy and ability to build up layers.*

**Keywords:** construction 3D printing, rheology of mixtures, polypropylene fiber, foam glass, gypsum composites, construction clay, extrudability, ecological construction.

### **Вступ**

Сучасна будівельна галузь перебуває на етапі цифрової трансформації, де технології адитивного виробництва (3D-друк) стають ключовим інструментом підвищення продуктивності [1-3]. Впровадження роботизованих комплексів дозволяє скоротити терміни зведення конструкцій на 60–80% та знизити загальні витрати до 60% за рахунок повної відмови від опалубки, мінімізації відходів та зменшення частки ручної праці [4]. Проте, широке розповсюдження технології стримується відсутністю уніфікованих складів сумішей, які б одночасно задовольняли суперечливі вимоги: високу текучість для прокачування через довгі магістралі та миттєву структурну міцність для утримання ваги наступних шарів [5]. Також, в наші часи 3D-друк розглядається як ефективний інструмент для оперативного відновлення житла. Основний науковий вектор спрямований на розробку легких композитних матеріалів, які замінять важкі матеріали, забезпечуючи високий термічний опір огорожувальних конструкцій без необхідності додаткового утеплення фасадів [6].

### **Результати дослідження**

Суміш для 3D-друку — це високотехнологічна цементна композиція з чітко налаштованими реологічними характеристиками, де ключову роль відіграє баланс між екструдованістю (здатністю до безперервного прокачування крізь сопло) та здатністю зберігати форму [8-10]. Науковою основою процесу є тиксотропія матеріалу: суміш повинна мати низьку в'язкість під дією зсувних напружень у насосі та високу статичну межу плинності в стані спокою, що забезпечує миттєву самоопорність та стійкість нижніх шарів до кумулятивних деформацій під вагою наступних дій [8].

Окрім цього, для забезпечення структурної цілісності та збереження її механічних властивостей, суміш має гарантувати високу міжшарову адгезію, а також компенсувати інтенсивну аутогенну та пластичну усадку шляхом дисперсного армування мікрофіброю та оптимізації гранулометричного складу наповнювачів [3]. Бетони які мають бути використані це спеціальна суміш на основі портланд-цементу (40-45%) з додаванням дрібнозернистого піску (30-35%) та модифікаторів (20-25%). Швидкість твердіння - 2-3 години, що ідеально для пошарового друку. Також таке будівництво досить еко-

логічне - використання до 30% перероблених матеріалів (шлаку, золи) знижує викиди  $\text{CO}_2$  на 40%. Безвідходне виробництво завдяки точному розрахунку об'єму для друку [7].

Встановлено, що для успішного 3D-друку суміш повинна забезпечувати безперервну екструзію (рис. 1) через сопло (рис. 2) діаметром від 9 до 30 мм. Перекачуваність стосується легкості та надійності перекачування бетону через систему подачі (від насоса до сопла). Друкована здатність або екструдованість стосується здатності матеріалу екструдуватися через сопло у вигляді безперервної нитки. Нитка повинна мати відсутність або мінімальну деформацію поперечного перерізу, а також прийнятний рівень розщеплення або розриву [6]. Здатність до нарощування – це здатність екструдованих шарів бетону витримувати навантаження, що прикладається шарами, розміщеними вище, без помітного осідання [11-15]. Друковані бетонні нитки повинні мати достатню міцність і жорсткість, щоб уникнути значної деформації після нанесення подальших ниток на них. Відкритий час – це час, протягом якого бетонну суміш можна використовувати в 3D-принтері для бетону. Якщо бетон екструдується після закінчення відкритого часу, суміш може бути занадто твердою для екструдовання. Крім того, відкритий час пов'язаний зі швидкістю гідратації бетонної суміші. Між наступними шарами має бути достатня адгезія без утворення холодних швів між ними. Відкритий час впливає на перекачуваність та екструзію. З іншого боку, на відкритий час значною мірою впливають в'язкість суміші та межа текучості

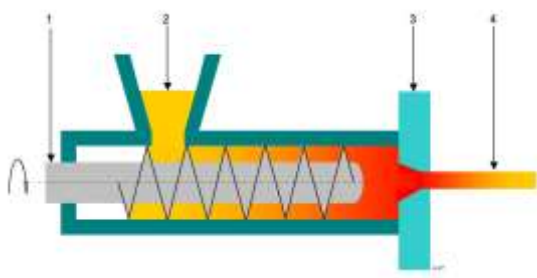


Рис. 1 Схема процесу екструзії



Рис. 2 Сопло 3D принтера

Оптимальним є використання водоцементного відношення  $\text{В/Ц} = 0,27$ , що у поєднанні з пластифікаторами забезпечує необхідний «час відкритої витримки» (30–60 хв) для адгезії між шарами без формування «холодних швів» [6].

Оскільки 3D-друк передбачає пошарове укладання бетону, велика площа поверхні залишається відкритою, що призводить до інтенсивного випаровування вологи. Поліпропіленова фібра (рис. 3) створює тривимірну мережу всередині суміші, яка не дає утворюватися мікротріщинам на початкових строках тужавлення, підвищує міцність. Додавання фібри підвищує статичну межу текучості. Шари краще тримають форму і менше деформуються під вагою наступних рівнів.



Рис. 3 Поліпропіленова фібра

Внутрішні стіни можна друкувати використовуючи глину (рис. 4) або гіпс - екологічно та економічно ефективні будівельні матеріали. При використанні для стін глину потрібно враховувати, що глина має досить довгий час для схвачування без додавання спеціальних добавок, тому не можна буде зробити високу стіну.



Рис. 4 Глина не оброблена

Аналізується потенціал використання моделювання керамічних виробів (рис. 5) як методу виробництва, що забезпечує подальше постачання готових елементів на будівельний майданчик для зведення огорожувальної конструкції після термічної обробки.

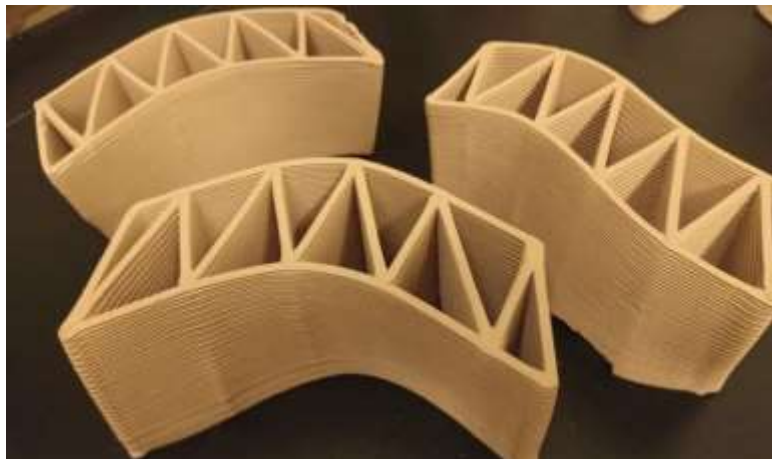


Рис. 5 Керамічні вироби виготовлені за допомогою 3D принтера

Гіпс (рис.6) - зручний, пластичний але він має свої особливості, а саме швидка гідратація яку можна сповільнити за допомогою лимонної кислоти і збільшити час тужавлення до 40 хвилин і більше але будуть втрати міцності і висока в'язкість яку можна вирішити за допомогою гранульованого піноскла.



Рис. 6 вигляд гіпсової речовини яка надрукована 3D принтером

Гранульоване піноскло підвищує рухливість суміші і робить зручною для укладання, також підвищує такі властивості як волого- морозо- і вогнестійкість.

## Висновки

Адитивне виробництво бетону - це перспективна технологія. Вона має потенціал для революції в галузі бетонного будівництва завдяки своїй здатності виготовляти архітектурні та конструкційні компоненти без обмежень опалубки, можливості автоматизувати етапи проектування та будівництва, підвищити точність укладання бетону, покращити здоров'я та безпеку працівників тощо. Реологічні властивості суміші є визначальним фактором успішності 3D-друку.

Мікроармування синтетичними волокнами є обов'язковою умовою для отримання високої міцності на розтяг та тріщиностійкості, що в багатьох випадках дозволяє відмовитися від традиційного сталевих армування, яке важко інтегрувати в процес автоматизованого друку.

Застосування гіпсових сумішей, модифікованих піносклом, дозволяє створювати легкі та пластичні внутрішні стіни. Друк внутрішніх стін природною глиною є найбільш екологічним та економічним рішенням, проте вимагає суворого контролю темпів будівництва. Через тривалий час природного схвачування глини швидкість вертикального зведення стін обмежена для уникнення деформації нижніх шарів. Впровадження адитивних технологій у будівництво дозволяє досягти значного екологічного ефекту за рахунок використання до 30% перероблених матеріалів та повної відсутності відходів на будівельному майданчику.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Очеретний В. П. Використання відходів вапняку та промислових відходів у виробництві сухих будівельних сумішей / В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, А. В. Бондар // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. - 2009. - № 1. - С. 36- 40.
2. Tay Y. W., Panda B., Paul S. C. 3D Printing Trends in Building and Construction Industry // Automation in Construction. - 2017. - №79. - С. 1-14.
3. Постолатій М. О. Модифіковані теплоізоляційні сухі будівельні суміші на перлітовому заповнювачі [Текст] / М. О. Постолатій, наук. кер. В. П. Ковальський // Матеріали XIII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст» (85-ї студентської науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова). - Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. - Ч. 1. - С. 28-30.
4. Ковальський В. П., Варчук Р. В. Теплоізоляційні сухі будівельні суміші на перлітовому заповнювачі // Вісник ВНТУ. - 2017.
5. Лемешев М.С. Легкі бетони отримані на основі відходів промисловості / М. С. Лемешев, О.В. Березюк // Сборник научных трудов SWorld. - Иваново : МАРКОВА АД, 2015. - № 1 (38). Том 13. Искусствоведение, архитектура и строительство. - С. 111-114.
6. Очеретний В. П. Використання поверхнево-активних речовин як поризуючої добавки до сухих будівельних сумішей [Текст] / В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, А. В. Бондар // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. - 2011. - № 1. - С. 33-40.
7. Buswell R. A., Leal de Silva W. R. 3D Printing Using Concrete Extrusion // Cement and Concrete Research. - 2018.
8. Варчук Р. В. Перспективи використання теплоізоляційних сухих будівельних сумішей на легких заповнювачах [Електронний ресурс] / Р. В. Варчук, В. П. Ковальський, А. В. Бондар // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи», м. Вінниця, 12-17 червня 2017 р. - 2017. - Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=33&mat=468>.
9. Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." International Science Group. - Boston : Primedia eLaunch, 616 p. (2021).
10. Використання глиняного порошку як мінерального мікронаповнювача у сухих будівельних сумішах [Текст] / В. П. Ковальський, В. П. Очеретний, А. В. Бондарь, А. С. Кузьмич // Збірник наукових праць Sworld «Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті». Мистецтвознавство, архітектура і будівництво – Сучасні будівельні технології та матеріали, 7-14 липня 2016 р. - 2016. - С.
11. Wolfs R., Bos F., Salet T. Hardened Properties of 3D Printed Concrete // Cement and Concrete Research. - 2019.

12. Ковальський В. П. Комплексне золоцементне в'язуче, модифіковане лужною алюмоферитною добавкою : монографія / В. П. Ковальський, В. П. Очеретний. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 98 с. - ISBN 978-966-641-338-6.
13. Lim S. Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes // Automation in Construction. – 2012.
14. Panda B., Paul S. C. Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies // Rapid Prototyping Journal. – 2018.
15. Очеретний В. П., Ковальський В. П. Будівельне матеріалознавство. – Вінниця : ВНТУ, 2017.

**Вознюк Ігор Михайлович** – викладач, ДПТНЗ «Хмельницький аграрний центр ПТО», м Хмельник.

**Рижкова Марія Віталіївна** – студентка гр. 2Б-24б, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [mryrixs@gmail.com](mailto:mryrixs@gmail.com)

**Ковальський Віктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця e-mail: [kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com](mailto:kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com)

**Науковий керівник: Ковальський Віктор Павлович** - доцент каф. "Будівництва, міського господарства та архітектури" Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com](mailto:kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com).

**Voznyuk Igor M.** – teacher of State Vocational and Technical Educational Establishment “ Khmilnyk Center of Vocational and Technical Education”, Khmilnyk.

**Ryzhkova Mariya V.**– Student, group 2B-24b, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [mryrixs@gmail.com](mailto:mryrixs@gmail.com)

**Kovalskiy Viktor P.** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Construction, Urban Management and Architecture, Vinnitsa National Technical University. Email: [kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com](mailto:kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com)

**Scientific adviser: Kovalsky Victor P** - Associate Professor "Construction, Municipal Economy and Architecture" Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com](mailto:kovalskiy.vk.vntu.edu@gmail.com).