



## KAPITEL 7 / CHAPTER 7<sup>1</sup> ENERGY- AND ENVIRONMENTALLY EFFICIENT BUILDING MIXTURES FOR 3D PRINTING

DOI: 10.30890/2709-2313.2025-43-01-002

### Вступ

Розвиток нових технологій у будівництві дозволяє радикально змінити підходи до традиційних методів зведення будівель і споруд, а також вирішити низку актуальних проблем у галузі. Найважливішими серед них є зниження вартості будівництва та екологічного навантаження без втрати якості. Раціональним рішенням цих проблем є використання 3D-технологій, що базуються на адитивному методі зведення будівель і споруд.

Ця технологія передбачає формування конструкції за допомогою 3D-принтера шляхом екструзії пластичної бетонної суміші по заданому програмою контуру, шар за шаром. Раціонально підібрана бетонна суміш здатна витримувати значні навантаження без руйнування, а точність, швидкість зведення та здатність 3D-принтера відтворювати складні просторові форми забезпечують швидке поширення цієї технології [1–3].

Завдяки цифровим технологіям і пошаровому укладанню адитивні методи усувають необхідність у використанні опалубки для формування конструкцій [4,5], а також забезпечують істотну економію матеріалів [6–9].

Цифрові бетони зазвичай базуються на дрібнозернистих цементних сумішах із підвищеним вмістом цементного тіста, що призводить до збільшення вуглецевого сліду на одиницю об'єму в порівнянні зі звичайним бетоном [10–12]. Це частково нівелює переваги адитивних технологій. Як зазначено в низці робіт, підвищений вміст цементу в цифрових бетонних сумішах необхідний для забезпечення реологічних характеристик, зокрема формовності (екструзії) суміші [6,13,14].

Очевидно, що для того, щоб технології 3D-бетонування стали реальною альтернативою традиційним, необхідно розробити енергоефективні та

---

<sup>1</sup>*Authors: Dvorkin Leonid Iosypovych, Marchuk Vitalii Viktorovych, Zhitkovsky Vadym Volodymyrovych*



екологічно безпечні суміші з низьким вмістом цементу, які водночас забезпечують усі необхідні технічні та міцнісні характеристики конструкцій.

Цементні композити з високими механічними властивостями та довговічністю можуть бути отримані шляхом введення мінеральних добавок [15]. У таких композитах добавки можуть виконувати роль цементувальних, пуцоланових або наповнювальних матеріалів [15,16]. Хімічний склад подібних матеріалів (за винятком тонкодисперсного вапняку) характеризується нижчим вмістом оксиду кальцію порівняно з клінкером портландцементу, що призводить до відмінностей у продуктах гідратації, які впливають на міцність і довговічність цементного каменю [16]. До типових таких добавок належать доменний гранульований шлак, зола-винос, мікрокремнезем тощо, які широко застосовуються в енергоефективних та цифрових бетонах [15,17–19]. Проте ці матеріали, що можуть замінювати частину цементу, повинні забезпечувати властивості, характерні для 3D-друку, зокрема необхідну реологію, прокачуваність суміші через насос до сопла [13,19], формовність (екструзію), структурну міцність після певного часу твердіння шару, міцність на розтяг при розколюванні (адгезію між шарами) та проєктну міцність на стиск. Тому вибір сировини є важливим завданням, яке дозволяє одночасно вирішити проблеми ресурсо- та енергозбереження за рахунок використання відходів [15,19–22].

Однією з найпоширеніших мінеральних добавок, ефективність якої підтверджена практичними дослідженнями, є зола-винос [21–24]. Вона активно впливає на всі стадії гідратації та формування структури цементних систем, тобто сприяє переходу від коагуляційної структури до просторового кристалічного каркасу [21,24].

Зола-винос, яка містить склоподібну алюмосилікатну фазу, виявляє пуцоланову активність і хімічно реагує з  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що виділяється при гідратації клінкерних мінералів портландцементу. Завдяки цій активності введення золи у цементні системи не лише збільшує обсяг гідратів, а й стимулює подальшу гідратацію цементу на пізніх стадіях [15].

Оскільки частинки золи мають сферичну форму з гладкою поверхнею,



введення золи замість частини цементу підвищує рухливість бетонної суміші за рахунок зменшення внутрішнього тертя [16,23].

Більшість дослідників відзначають позитивний вплив золи-виносу на міцність бетонів у пізні терміни твердіння. Встановлено, що активність золи значно зростає при зменшенні розміру її частинок до 5...30 мкм [15,21]. Вплив дисперсності золи на міцність бетону є більш вираженим, ніж вплив на активність самого цементу. Це пояснюється значним пластифікувальним ефектом тонких фракцій золи, незважаючи на збільшення нормальної густоти цементів із золою [21].

Підвищити дисперсність золи можна шляхом помелу. Механічна активація золи повинна бути достатньою для руйнування склоподібної оболонки на поверхні частинок [21]. При цьому не спостерігається суттєвого зростання водопотреби з підвищенням тонкості помелу: дробляться переважно великі та неправильної форми частинки, тоді як дрібні сферичні залишаються майже незмінними. Введення золи сприяє зменшенню водовідділення бетонної суміші [21]. Її пластифікувальні та водоутримувальні властивості визначають перспективність використання для 3D-друку. Деякі дослідження також свідчать, що підвищений вміст механічно активованої золи сприяє скороченню часу тужавіння, що є важливим показником для таких сумішей [19].

На ранніх стадіях твердіння підвищення міцності сприяє лужна активація в'язучого, яка можлива або за рахунок підвищеного вмісту лугів у клінкері, або шляхом введення лужних активаторів твердіння, що прискорюють взаємодію золи та цементу [25].

Таким чином, існують усі передумови для ефективного використання механічно та хімічно активованих цементно-зольних в'язучих та бетонів на їх основі як робочих сумішей для 3D-друку, які забезпечують необхідні показники екструзії та міцності. Комплексна механо-хімічна активація золовмісних сумішей, яка ще не була достатньо вивчена, становить значний науковий та практичний інтерес.



## 7.1 Мета

Метою роботи було дослідження механо-хімічно активованого цементно-зольного дрібнозернистого бетону, придатного для 3D-друку, який характеризується необхідними технологічними властивостями та міцністю на стиск і розтяг на ранніх і проектних стадіях твердіння.

## 7.2 Матеріали та методика експериментальних досліджень

Вихідними матеріалами для дослідження були:

- Портландцемент СЕМ І 42.5R виробництва цементного заводу *Dyckerhoff Ukraine*. Його хімічний склад наведено в таблиці 1. Мінералогічний склад клінкеру становив:  $C_3S$  – 57,10 %;  $C_2S$  – 21,27 %;  $C_3A$  – 6,87 %;  $C_4AF$  – 12,19 % (відповідно до EN 196-2). Пітома поверхня цементу становила  $S_C = 320\text{--}350$  м<sup>2</sup>/кг (EN 196-6).

- Зола-виносу Ладижинської ТЕС (Україна), яка належить до золи типу ІІ, категорії В, із залишком на ситі 45 мкм не більше 25 % (EN 450-1:2012). Хімічний склад золи наведено в таблиці 1, пітома поверхня становила  $S_A = 250\text{--}280$  м<sup>2</sup>/кг (EN 196-6).

- Кварцовий пісок із модулем крупності  $M_f = 2,1$ , вмістом пилюватих і глинистих частинок 1,5 % (EN 12620:2013).

Хімічні добавки:

- активатор твердіння – гідроксид натрію (*NaOH*);
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу із водоредукуючим ефектом 30 %.

У дослідженнях дрібнозернистого бетону на основі активованих золовмісних в'язучих було поєднано фізико-механічні методи та методи математичного планування експериментів [26].

Під час експериментів для оцінки впливу ступеня дисперсності золи-виносу та вмісту лужного активатора твердіння на властивості бетонних сумішей і бетонів використовували стандартні зразки:



- куби розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм;
- призми  $40 \times 40 \times 160$  мм.

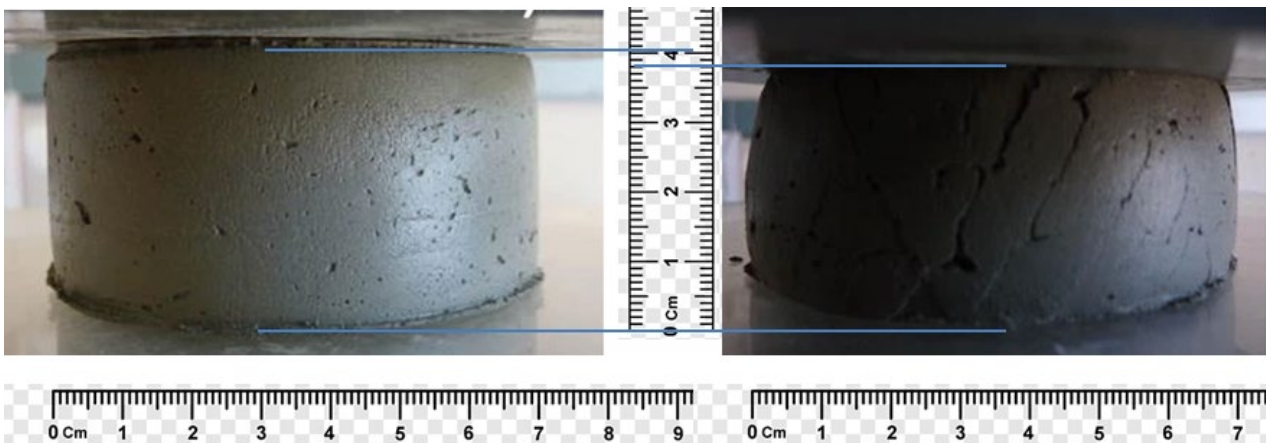
**Таблиця 1. - Хімічний склад портландцементу\* та золи-виносу**

Матеріал	ВПП %	Вміст оксидів, %							
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Клінкер	–	21,80	5,32	4,11	66,80	0,95	0,63	0,54	0,42
Зола-винос	4,7	46,1	18,1	22,1	2,1	2,0	2,3	1,2	

\* Хімічний склад портландцементу, виготовленого на основі використаного клінкеру, відрізнявся підвищеним вмістом SO<sub>3</sub> за рахунок введення гіпсу у кількості 3,1 %.

Консистенцію бетонних сумішей визначали методом осідання конуса згідно з EN 12350-2. Міцність на стиск кубів у віці 1, 7 та 28 діб визначали за EN 12390-3, а міцність на розтяг при розколюванні призми — за EN 12390-5 у віці 1 та 28 діб.

Для визначення структурної міцності була запропонована методика, що дозволяє виміряти граничне навантаження на зразок екструдованого бетонного шару, при якому він починає деформуватися (рис. 1) [13,24].



**Рисунок 1 - Приклад визначення структурної міцності бетону:**

- а) зразок витримує навантаження (структурна міцність забезпечена);**  
**б) зразок руйнується.**



У процесі математичного планування експериментів застосовували ймовірно-статистичні методи, що дозволяють обґрунтовано встановити мінімально необхідну кількість дослідів і послідовність їх проведення для отримання кількісних залежностей між досліджуваними параметрами та факторами, які на них впливають [26].

Завдання математичного моделювання зводиться до отримання експериментально-статистичних моделей загального вигляду:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де:

$y$  — параметр оптимізації (досліджуваний показник системи);  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{ij}$  — коефіцієнти регресії;  $x_i$ ,  $x_j$  — фактори;  $k$  — кількість факторів.

Експерименти виконували згідно з типовою матрицею плану В<sub>3</sub> [26], яка є таблицею з  $n$  рядків і  $m$  стовпців та містить набір унікальних комбінацій факторів. Обраний план передбачав проведення дослідів у 11 точках при трьох рівнях варіювання факторів.

Діапазон зміни факторів визначали на основі попередніх досліджень об'єкта відповідно до поставленої мети. Для обробки експериментальних даних верхній рівень факторів кодували як +1, нижній – як -1, а основний рівень — 0.

Під час технологічного аналізу та відбору факторів, крім перевірки адекватності рівняння, оцінювали також значущість коефіцієнтів регресії. Квадратичні рівняння регресії дозволяли простежити індивідуальний і спільний вплив факторів на досліджувані параметри та встановити їх оптимальні значення.

### 7.3 Результати експериментальних досліджень бетонних зразків

Для встановлення доцільності механічної активації було проведено порівняльні експерименти, результати яких наведено у таблиці 2.

Згідно з отриманими даними, використання окремо лужної або механічної



активації цементно-зольних в'язучих не дозволяє досягти достатніх значень міцності на стиск і розтяг бетону з низьким вмістом цементу, придатного для 3D-друку.

**Таблиця 2 - Механічна та лужна активація малоцементних сумішей**

№	Вміст компонентів, кг/м <sup>3</sup>						Міцність на стиск, МПа, у віці		Міцність на розтяг, МПа, у віці 28 діб	
	Цемент	Зола-виносу		НА	СП	Пісок	Вода	1 day		2. 28 days
		S <sub>A</sub> = 270 m <sup>2</sup> /kg	S <sub>A</sub> = 340 m <sup>2</sup> /kg							
1	80	445	-	-	1.6	1575	263	2.6	17.8	2.7
2	80	445	-	13	1.6	1575	262	3.0	22.4	3.0
3	80	445	-	26	1.6	1575	262	3.5	24.8	3.7
4	80	-	445	-	1.6	1575	262	4.6	29.8	4.2

Подальші дослідження проводилися з використанням комплексної механо-хімічної активації в'язучого, що включала помел золи до питомої поверхні  $S_A = 330...350 \text{ м}^2/\text{кг}$ , відповідно до матриці планування експериментів.

Умови планування наведено у таблиці 3. Вибір вмісту золи-виносу та активатора твердіння обґрунтовано з урахуванням їх оптимальної кількості, встановленої за результатами попередніх досліджень і літературних джерел [21,24–26].

**Таблиця 3 - Умови планування експериментів**

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Вміст цементу у в'язучому, % за масою	X <sub>1</sub>	5	10	15	5
Вміст активатора твердіння NaOH, % за масою	X <sub>2</sub>	0	2.5	5.0	2.5



У процесі досліджень склад сумішей мав співвідношення цементно-зольне в'язуче : пісок = 1 : 3 (за масою). Вміст вод'и залишався сталим на всіх точках плану та становив  $V/V'яж = 0,4$ .

Крім того, у масу в'язучого вводили 0,4 % суперпластифікатора полікарбоксилатного типу для забезпечення придатної до екструзії консистенції.

Рухливість сумішей за осіданням конуса перебувала в межах 350...400 мм. Матрицю планування експерименту та результати наведено в таблиці 4.

**Таблиця 4 - Матриця планування та результати експериментальних досліджень**

№	Технологічні фактори				Структурна міцність, Па	Міцність на розтяг, МПа, у віці				
	Кодовані		Натуральні			на розтяг, МПа, у віці		Міцність на стиск, МПа, у віці		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Ц, %	NaOH, %		1 доба	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
1	+1	+1	15	5	5200	1.7	5.2	5.8	18.5	37.7
2	+1	-1	15	0	4850	1.2	4.5	4.8	13.4	30.2
3	-1	+1	5	5	4760	1.4	3.4	3.6	11.1	28.1
4	-1	-1	5	0	4510	0.4	0.8	1.2	7.8	16.1
5	+1	0	15	2.5	5010	1.5	4.6	5.1	15.2	36.8
6	-1	0	5	2.5	4650	0.7	1.8	2.1	10.1	22.8
7	0	+1	10	5	5070	1	4.1	4.3	15.3	32.8
8	0	-1	10	0	4680	1	2.6	2.8	11.2	20.1
9	0	0	10	2.5	4850	1.3	3.4	3.8	14.1	28.8
10	0	0	10	2.5	4800	1.3	3.5	3.6	14.5	28.1
11	0	0	10	2.5	4820	1.2	3.5	3.6	13.5	28.6

Мінімальна структурна міцність отриманих сумішей становила понад 4500 Па (табл. 4), що забезпечує можливість формування дев'яти накладених шарів висотою 20 мм протягом 30 хвилин без втрати стійкості конструкції.

У результаті статистичної обробки експериментальних даних були побудовані експериментально-статистичні моделі міцності на розтяг і стиск у різному віці твердіння.



Міцність на розтяг у віці 28 діб, МПа:

$$3. f_{tn}^{28} = 3,39 + 1,38 \cdot x_1 + 0,8 \cdot x_2 - 0,48 \cdot x_1 x_2 + 0,1 \cdot x_1^2 - 0,48 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

Міцність на стиск у віці 1 доби, МПа:

$$4. f_{cm}^1 = 3,59 + 3,02 \cdot x_1 + 2,08 \cdot x_2 + 0,35 \cdot x_1 x_2 + 0,12 \cdot x_1^2 + 0,07 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа:

$$f_{cm}^{28} = 28,45 + 6,28 x_1 + 5,37 \cdot x_2 - 1,13 \cdot x_1 x_2 + 1,43 \cdot x_1^2 - 1,92 \cdot x_2^2 \quad (4)$$

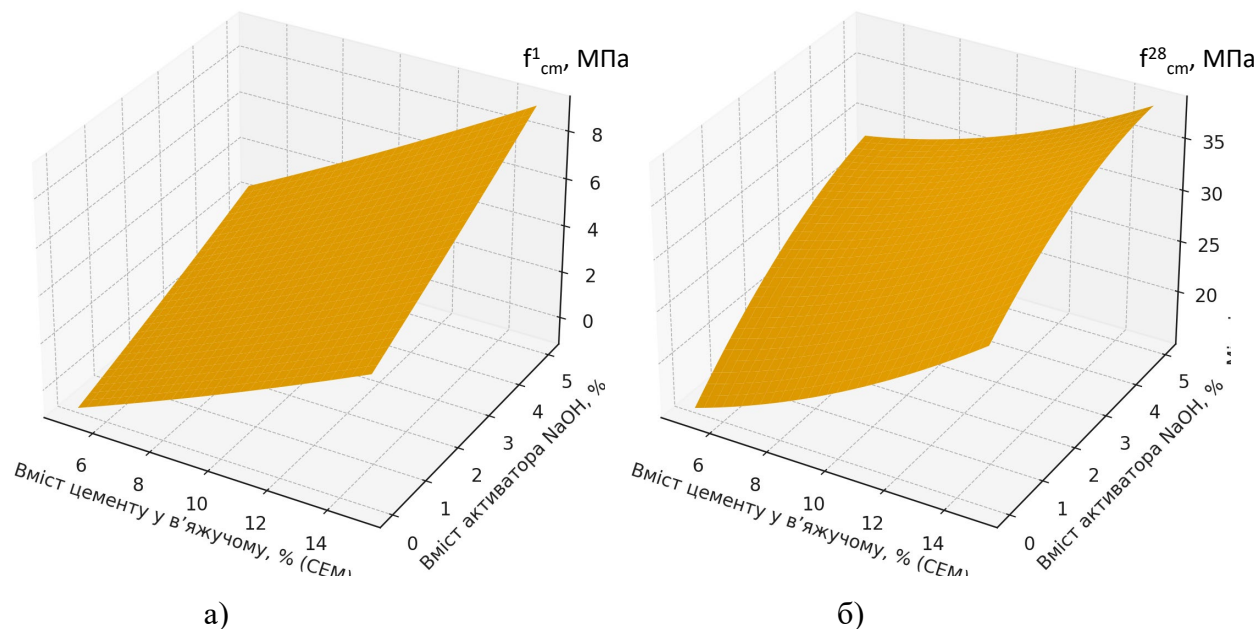
Побудовані моделі дозволяють кількісно оцінити вплив змінних факторів із урахуванням їх взаємодії на досліджувані властивості та визначити ступінь їх впливу.

Упорядкування факторів за рівнем впливу показало: вміст цементу (СЕМ) > активатор твердіння (НА).

Побудовані математичні моделі (2), (3), (4) дають змогу кількісно оцінити вплив змінних факторів із урахуванням їх можливої взаємодії на досліджувані властивості та розташувати їх за ступенем впливу: СЕМ > НА (вміст цементу має більший вплив, ніж активатор твердіння).

Відповідно до отриманих даних, побудовано графічні залежності міцності на стиск (рис. 2) дрібнозернистого бетону та міцності на розтяг (рис. 3), виготовленого на основі активованих цементно-зольних в'язучих залежно від факторів складу.

Аналіз поверхонь відгуку (рис. 2) дає підстави стверджувати, що використання активованих цементно-зольних в'язучих дозволяє забезпечити мінімальну необхідну міцність на стиск багатошарової структури у віці 1 доби не менше 3,0 МПа при вмісті цементу до 15 %. Така міцність є типовою для низки стінових матеріалів на основі комірчастих бетонів (піно- та газобетонів). При цьому досягнення необхідної міцності можливе за умови дисперсності золивиносу 330...350 м<sup>2</sup>/кг і вмісту активатора твердіння не менше 2 % у складі в'язучого. Слід зазначити, що проектна (марочна) міцність при такому складі суміші перевищує 30 МПа.

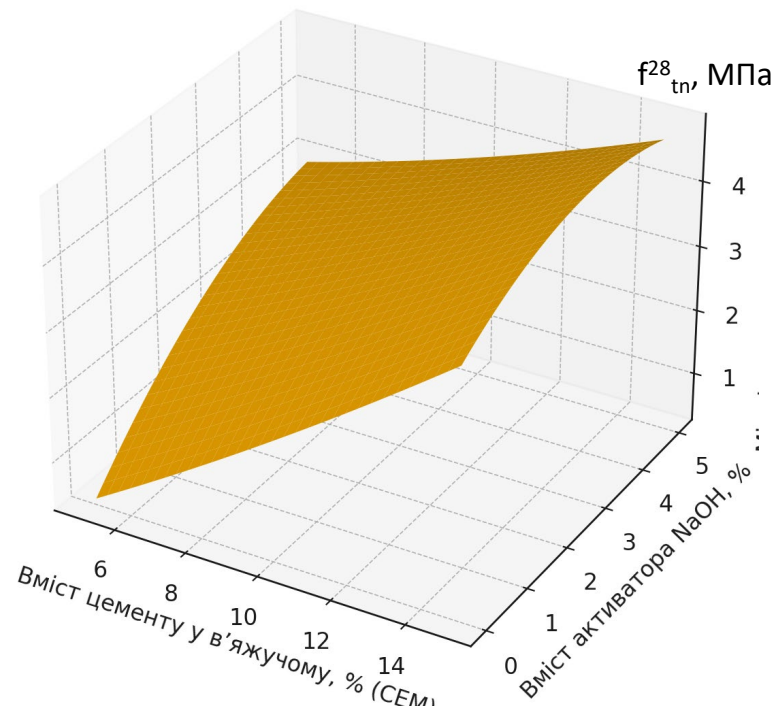


**Рисунок 2 - Поверхня відгуку міцності на стиск у віці 1 доби (а) та 28 діб (б) для сумішей на основі механо-хімічно активованих цементно-зольних в'язучих, придатних для 3D-друку.**

Аналіз графічних залежностей міцності на розтяг (рисунок 3) показує, що використання механо-хімічно активованих цементно-зольних в'язучих дозволяє отримати міцність на розтяг у віці 28 діб на рівні 3,0...5,0 МПа при вмісті портландцементу 10...15 % та активатора твердіння 2,5...5 %. Отримані значення міцності забезпечують достатнє зчеплення між шарами надрукованої структури.

Слід відзначити, що використання активованих цементно-зольних в'язучих також покращує процес екструзійного формування суміші, підвищуючи її структурну стабільність під час пошарового друку.

Таким чином, експериментально доведено можливість ефективного застосування комплексної механо-хімічної активації цементно-зольних в'язучих і бетонів на їх основі для досягнення оптимального низькоцементного складу сумішей, що забезпечує необхідні стандартизовані екструзійні та механічні характеристики бетонів, придатних для 3D-друку.



**Рисунок 3 - Поверхня відгуку міцності на розтяг у віці 28 діб для сумішей на основі механо-хімічно активованих цементно-зольних в'язучих, придатних для 3D-друку.**

#### 7.4 Наукова новизна та практичне значення

Наукова новизна проведених досліджень полягає у розробленні та отриманні низькоцементних сумішей для 3D-друку, створених на основі комплексно механо-хімічно активованих цементно-зольних в'язучих. Практичне значення полягає у зменшенні вмісту цементу при одночасному забезпеченні необхідних технологічних і міцнісних властивостей, що відкриває перспективи для екологічного та ресурсоефективного адитивного будівництва.



## **Висновки**

1. Експериментально обґрунтовано можливість отримання сумішей, придатних для 3D-друку, на основі хімічно та механічно активованих цементно-зольних в'язучих.
2. Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей міцності на стиск і розтяг у віці 1 та 28 діб, побудованих методом математичного планування експериментів, які описують вплив факторів складу.
3. Мінімальна необхідна міцність на стиск багатошарової структури у віці 1 доби становить не менше 3,0 МПа, що відповідає характеристикам стінових матеріалів типу піно- та газобетонів, і досягається при використанні 10...15 % портландцементу та не менше 2 % активатора твердіння.
4. Міцність на стиск через 28 діб перевищує 30 МПа, а міцність на розтяг 3,0...5,0 МПа забезпечує достатню адгезію між шарами при вмісті 10...15 % цементу та 2,5...5 % активатора твердіння.