

**РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТНИХ ПАСТ З ВВЕДЕННЯМ
ДИСПЕРСНОЇ ФРАКЦІЇ БЕТОННОГО БРУХТУ**

**RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT PASTES WITH THE
INTRODUCTION OF DISPERSED FRACTION OF CONCRETE CRUSH**

Марчук В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0999-0402, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Макаренко Р.М., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4839-9623, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marchuk Vitalii., Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0003-0999-0402, Dvorkin Leonid, Doctor of Engineering, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Makarenko Ruslan, Ph.D., professor, ORCID: 0000-0003-4839-9623, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Дане дослідження стосується розробки та оптимізації цементних паст, що містять дисперсну фракцію бетонного брухту (бетонний порошок (БП)) як активну мінеральну добавку для використання в технології 3D-друку. У роботі наголошується на актуальності ресурсоефективних та екологічно стійких рішень у сучасному будівництві шляхом заміни частини портландцементу вторинними мінеральними компонентами, отриманими в результаті переробки будівельних відходів. Особлива увага приділяється реологічним властивостям модифікованих цементних паст - в'язкості та нормальній густоті, які визначають екструдованість та стабільність друкованих шарів. За допомогою математичного планування експериментів отримано комплекс поліноміальних моделей нормальної густоти та пластичної в'язкості паст.

This study focuses on the development and optimization of cement mixtures containing a dispersed fraction of concrete waste (concrete powder) as an active mineral additive for use in 3D printing technologies. The paper highlights the relevance of resource-efficient and environmentally sustainable solutions in modern construction by replacing a portion of Portland cement with secondary mineral components obtained from recycling construction waste. The article outlines the chemical and physicochemical mechanisms regulating the reactivity of concrete powder. Chemically, the hydration of residual unreacted cement grains and potential pozzolanic reactions on the surfaces of amorphous particles facilitate the formation of additional cement phases. Physicochemically, concrete powder act as crystallization centers according to the Gibbs-Volmer nucleation theory, accelerating structure formation and

compacting the hardened matrix. Particular attention is paid to the rheological properties of modified cement pastes – viscosity and normal consistency, which determine the extrusion and stability of printed layers. The article presents the results of studies of the influence of concrete powders in combination with a superplasticizer and a water-retaining additive on the main rheological properties of cement pastes using methods of mathematical design of experiments.

Ключові слова:

Портландцемент, бетонний брухт, 3D-будівельний принтер, структурно-механічні властивості, цементна паста, водоутримуюча добавка, суперпластифікатор.

Portlandcement, concrete scrap, scrap brick, 3D construction printer, structural and mechanical properties, cement paste, water-retaining additive,, superplasticizer.

Вступ. На даний час у сучасному будівництві все ширше застосовується технологія 3D-друку, що дозволяє прискорити зведення споруд, зменшити трудомісткість процесів та створювати складні архітектурні форми. Для підвищення економічної та екологічної ефективності цієї технології важливим є зниження витрати портландцементу - найбільш енергоємного компоненту сумішей. Одним із шляхів досягнення цього є використання активних мінеральних добавок, зокрема дисперсної фракції бетонного брухту, що утворюється під час переробки будівельних відходів. Такі добавки сприяють покращенню структури цементного каменю, підвищенню міцності та зниженню пористості матеріалу. Використання бетонного порошку у складах для 3D-друку є перспективним напрямом підвищення ресурсоефективності та екологічності будівельних технологій.

Стан питання та задачі дослідження. В сучасне будівництво все ширше впроваджується 3D друк, що дозволяє суттєво прискорити зведення споруд, зменшити трудозатрати, створювати унікальні архітектурні форми [1]. Підвищення економічних та екологічних показників 3D друку будівельних споруд обумовлює доцільність застосування технологічних рішень, що направлені на зниження витрати найбільш енергозатратного компоненту - портландцементу. Це є особливо актуальним враховуючи, що в технології 3D друку застосовуються переважно дрібнозернисті бетонні суміші і цементно-піщані розчини. Зниження витрат портландцементу в бетонах та розчинах можливе при введення мінеральних добавок, як природнього так і техногенного походження. До найбільш поширених активних мінеральних добавок відносяться доменні гранульовані шлаки і кам'яновугільні золи [2], однак у зв'язку з великим попитом на ці добавки виникає їх певний дефіцит в окремих регіонах зокрема і в Україні.

У зв'язку з демонтажем, ремонтом і реконструкцією старих будівель, а також руйнуваннями конструкцій спричиненими військовими діями утворюються значні обсяги будівельних відходів, які складаються переважно

з бетонного брухту. На даний час виконані дослідження використання дисперсної фракції бетонного брухту, які довели, що її можна віднести до активних мінеральних добавок [3, 4]. Механізм дії в бетонах і розчинах активних мінеральних добавок досліджений багатьма авторами [2]. Разом з тим особливості складу і структури бетонних порошків (БП) обумовлюють особливості механізму їх впливу на твердіння як активних наповнювачів. На мікрорівні активність мінеральних добавок проявляється в результаті хімічних та фізико-хімічних процесів.

Хімічні процеси при введенні рециклінгових бетонних порошків проявляються через гідратацію цементних зерен, що не встигли раніше прореагувати з водою. Крім того можлива поява пуцоланічної активності бетонних порошків обумовлена складом і аморфізованою поверхнею компонентів.

Фізико-хімічна активність бетонних порошків обумовлена у відповідності з теорією Гіббса-Фольмера, їх сприяння утворенню зародків кристалів новоутворень твердіючих бетонів, виконуючи роль центрів кристалізації.

Хімічна і фізико-хімічна активація активність бетонних порошків повинна зростати при збільшенні їх питомої поверхні, що супроводжується збільшенням поверхневої енергії і зростанням ізобарного потенціалу. Зменшення міжзернових відстаней дозволяє збільшити міцність контактної зони між в'язким і заповнювачами, що позитивно впливає як на міцність при стиску та згині, так і на адгезійну міцність бетону.

Перспективними методами активації порошків є домел до більш високої питомої поверхні [2], введення хімічних добавок, що прискорюють твердіння [5]. Ефективність методів активації полягає у підвищенні швидкості гідратації цементу, покращенні мікроструктури і зменшення їх пористості.

Основні дослідження БП як наповнювачів виконані для бетонів і розчинів загального призначення. В свою чергу будівельні суміші для 3D друку повинні характеризуватися рядом спеціальних властивостей, зокрема необхідною екструзійністю, що залежить від їх в'язкості і пластичності. При цьому необхідно забезпечити достатнє «вікно друку», що залежить від строків тужавлення і кінетики зростання пластичної міцності. Адитивність технології має передбачати до укладки наступних шарів бетонної суміші досягнення попередніми шарами необхідної структурної, а також адгезійної міцності [1]. Необхідність перевірки ефективності добавки СП в комбінації з бетонним порошком обумовлена по нашим даним [6] та інших дослідників [7, 8] підвищеною водопотребою при його введенні в бетонні суміші.

Таким чином дослідження впливу бетонного порошку в комбінації з СП та водоутримуючою добавкою на основні властивості цементних паст і дрібнозернистих бетонів для 3D друку на їх основі є актуальним.

Мета роботи полягала у кількісному встановленні особливостей впливу дисперсної фракції бетонного брухту на нормальну густоту (НГ) та ефективну в'язкість цементних паст.

В якості вихідних матеріалів у наших дослідженнях були використані: портландцемент ПЦ І-500-Р-Н, ДСТУ Б В.2.7-46:2010 ПАТ «Віпцемент»; дисперсна фракція бетонного брухту – бетонний порошок (БП), з питомою поверхнею $S = 250-280 \text{ м}^2/\text{кг}$; суперпластифікатор нафталінового формальдегідного типу (СП) з водоредукуючим ефектом 20%; водоутримуюча добавка - модифікована гідроксиетилметилцелюлоза (НЕМС) - WALOCEL M 20-20; кварцовий пісок з модулем крупності 2,1 і вмістом пилоподібних та глинистих частинок до 1,0%.

Методика досліджень. Для визначення в'язкості цементних паст із добавками модифікаторів на основі дисперсної фракції бетонного брухту використовували ротаційний віскозиметр РВ-8М. Досліджували пасту з В/Ц=0.3 через 5 хв після замішування. Частота обертання циліндра змінювалася від 27 с^{-1} до 430 с^{-1} . В'язкість паст (η) визначали за формулою:

$$\eta = k \frac{P - P_0}{N} \tau, \quad (1)$$

де k – константа приладу; P - вага вантажів; N – число обертів; τ – час оберту; P_0 – навантаження холостого ходу приладу ($P_0=12,4 \text{ г}$).

Нормальну густоту (НГ) визначали на приладі Віка з пестиком по методиці згідно ДСТУ Б В.2.7-185:2009.

Для проведення досліджень були використані методи математичного планування експериментів. Для цього були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого трьохфакторного плану B_3 [9]. Рівняння регресії, маючи квадратичний характер, дозволяють простежити індивідуальний та спільний вплив факторів на досліджувані вихідні параметри, установити необхідні оптимальні значення факторів

Результати дослідів оброблялися за допомогою методів математичної статистики [9].

Отримані результати та обговорення. Комплекс будівельно-технічних властивостей розчинових сумішей визначається перш за все їх реологічними властивостями. В свою чергу основні реологічні характеристики модифікованих цементних сумішей, визначальні для 3D друку, значним чином характеризуються нормальною густотою та ефективною в'язкістю цементних паст. Відповідно до сучасних теоретичних уявлень нормальна густота лінійно пов'язана з граничною водоутримуючою здатністю цементного тіста і залежить, як від мінералогічного складу і дисперсності цементів, так і кількості і виду введених добавок.

Для отримання кількісних залежностей, що дозволяють прогнозувати значення НГ та ефективною в'язкості паст залежно від кількості БП і комплексного модифікатора, були виконані алгоритмізовані експерименти з використанням поліфункціонального модифікатора (ПФМ), що містить суперпластифікатор та водоутримуючу добавку. Умови планування експериментів наведені в табл.1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Вміст ЕЦ, % маси суміші, ЕЦ	X_1	0	0,05	0,1	0,05
Вміст СП, % маси від маси в'язучого (ПЦ+БП), СП	X_2	0	0,2	0,4	0,2
Відношення БП/ПЦ	X_3	0	0,15	0,3	0,15

Отримані після статистичного опрацювання рівняння регресії нормальної густоти та ефективної в'язкості цементних паст з використанням дисперсної фракції бетонного брухту наведені в табл. 2. Статистичний аналіз показав їх адекватність при 95% довірчої ймовірності. Отримані рівняння можна вважати математичними моделями властивостей цементних паст в обраному факторному просторі [9].

Таблиця 2

Експериментально-статистичні моделі нормальної густоти і ефективної в'язкості цементно-зольних паст з добавками ПФМ

Властивість паст	Рівняння регресії
НГ, %	$\text{НГ} = 25,9 + 1,82X_1 - 1,67X_2 + 0,89X_3 - 0,17X_1^2 + 1,18X_2^2 - 0,22X_3^2 + 0,11X_1X_2 - 0,24X_1X_3 + 0,94X_2X_3 \quad (2)$
$\eta_{\text{эф.}}, 10^{-1} \text{ Па}\cdot\text{с}$ (при БП/ПЦ = 0,15)	$\eta = 16,9 + 4,37X_1 - 7,44X_2 + 0,45X_3 - 1,95X_1^2 + 6,20X_2^2 - 3,45X_3^2 - 2,65X_1X_2 + 0,525X_1X_3 - 0,75X_2X_3 \quad (3)$

Можна відзначити, що отримані експериментально-статистичні моделі при різних наборах значень факторів описують зміни нормальної густоти та в'язкості як цементних ($X_3 = -1$), так і паст на основі бетонного порошку ($X_3 > -1$) при введенні добавок модифікаторів ($X_1 > -1$, $X_2 > -1$) і без них ($X_1 = -1$, $X_2 = -1$). При цьому область варіювання факторів X_1 та X_2 дозволяє прослідкувати вплив на досліджувані властивості широкої області складів ПФМ, включаючи і крайні склади, коли ПФМ представлений тільки одним компонентом (СП, ЕЦ). На основі моделей були побудовані графічні залежності зміни нормальної густоти та в'язкості паст (рис.1, 2). Аналіз отриманих математичних моделей (2, 3) та рис.1, 2 показав, що як у цементних, так і в пастах на основі БП найбільше зниження НГ і в'язкості досягається при переважанні в складі ПФМ суперпластифікатора). При цьому найбільше зменшення в'язкості (майже у 3 рази) досягається для паст при вмісті СП, рівному 0,4% маси цементу. Для паст з використанням бетонного брухту при такому ж вмісті суперпластифікатора в'язкість зменшується лише в 1,5...2 рази.

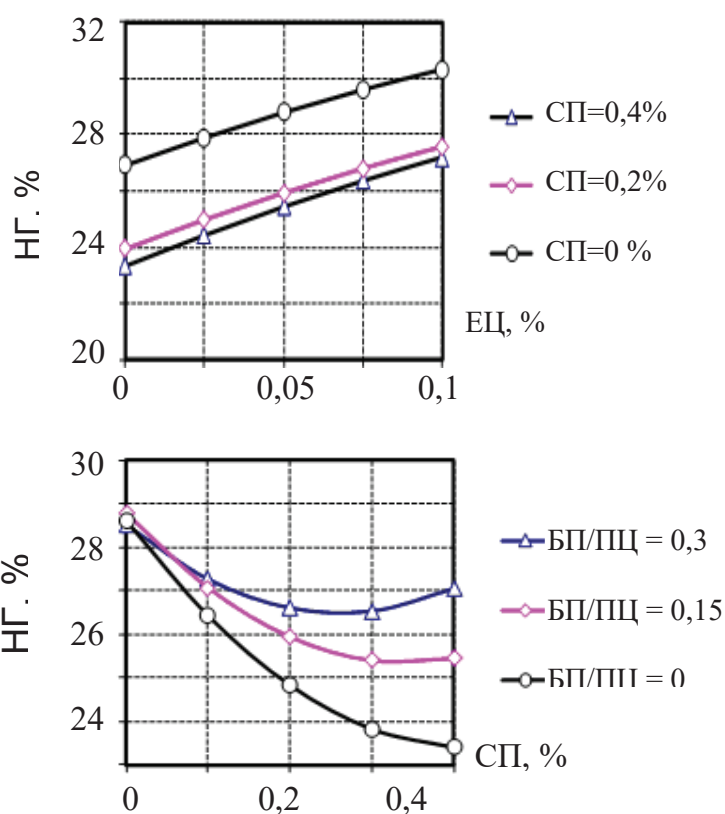


Рис. 1. Залежність нормальної густоти цементних паст від вмісту компонентів модифікатора ПФМ та відношення БП/ПЦ.

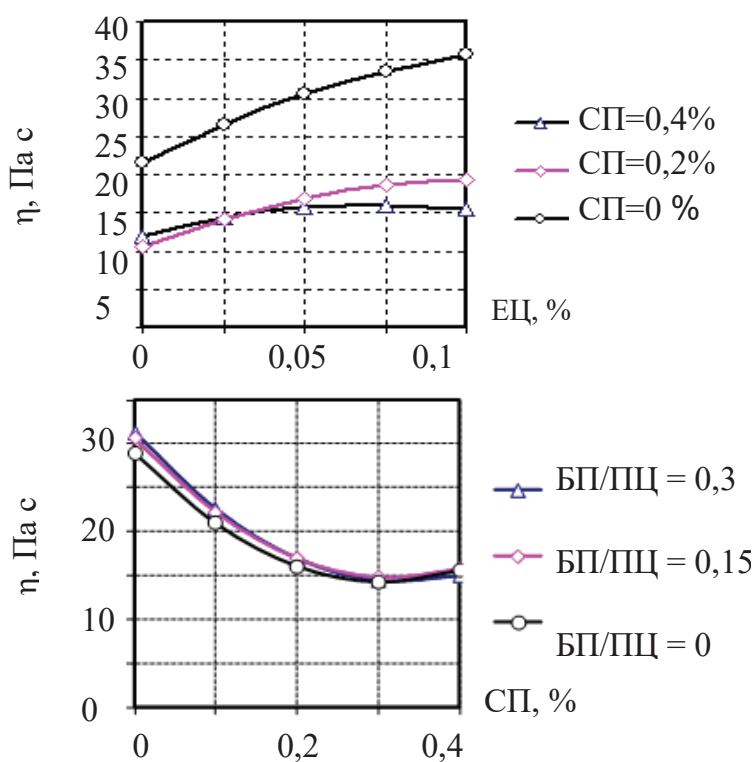


Рис. 2. Залежність ефективної в'язкості цементних паст від вмісту компонентів модифікатора ПФМ та відношення БП/ПЦ.

Висновки. Досліджено вплив дисперсної фракції бетонного брукхту в комбінації з суперпластифікатором та водоутримуючою добавкою на нормальну густоту та ефективну в'язкість цементних паст.

Нормальна густота та ефективна в'язкість є визначальними для оцінки будівельно-технічних характеристик розчинових сумішей, особливо у технологіях 3D-друку.

Було отримано статистично достовірні регресійні моделі нормальної густоти та ефективної в'язкості цементних паст, що враховують вплив бетонного порошку і поліфункціонального модифікатора.

Для паст із використанням бетонного порошку ефект зменшення в'язкості є менш вираженим, ніж для цементних паст, що свідчить про вплив складу та залишкових активних фаз БП на структуроутворення системи.

Отримані математичні моделі можуть бути використані для прогнозування реологічних властивостей цементних паст, що важливо для оптимізації складу сумішей, придатних для 3D-друку.

Дослідження було виконане за підтримки програми Innovate Ukraine, що реалізується, британським інноваційним агентством, "Інноваційна Україна – підтримка енергетичного відновлення України" / Innovate Ukraine, funded by UK International Development та implemented by the Innovate UK "Innovate Ukraine – supporting Ukraine's energy recovery" у рамках грантового проекту no. 10097027 «S3 – Безпечна, стійка та швидка відбудова України» / "S3 – Safe, Sustainable, and Swift Reconstruction of Ukraine".

1. Dvorkin, L.; Marchuk, V.; Mróz, K.; Maroszek, M.; Hager, I. Energy-Efficient Mixtures Suitable for 3D Technologies. *Appl. Sci.* 2024, 14, 3038.

2. Саницький М.А. Модифіковані композиційні цементи: навч. посібник / М.А. Саницький, Х.С. Соболев, Т.С. Марків // Львів: Видавництво ЛПІ, 2010. -132 с.

3. Pavlu, T.; Koci, V.; Hájek, P. Environmental Assessment of Two Use Cycles of Recycled Aggregate Concrete. *Sustain.* 2019.

4. Antunes, A.; Costa, H.; Carmo, R.; Júlio, E. Construction and demolition waste as fine aggregate in mortar matrices: A review. In *V International Conference Progress of Recycling in the Built Environment*; Döring, I., Zaccardi, Y.V., Müller, A., Eds.; RILEM: Bagneux, France, 2023; pp. 179–187.

5. Dvorkin, L.; Zhitkovsky, V.; Sonebi, M.; Marchuk, V.; Stepasiuk, Y. Improving Concrete and Mortar Using Modified Ash and Slag Cements; 2020.

6. Марчук В.В. Суміші для 3D друку з використанням меленого бетонного та цегляного бою /В.В. Марчук, Л.Й. Дворкін, Л.І. Ніхаєва // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Рівне, 2023. Вип. 44.

7. Hou, S.; Xiao, J.; Duan, Z.; Ma, G. Fresh Properties of 3D Printed Mortar with Recycled Powder. *Constr. Build. Mater.* 2021, 309.

8. Ilcan, H.; Sahin, O.; Kul, A.; Yildirim, G.; Sahmaran, M. Rheological Properties and Compressive Strength of Construction and Demolition Waste-Based Geopolymer Mortars for 3D-Printing. *Constr. Build. Mater.* 2022, 328.

9. Dvorkin, L.; Dvorkin, O.; Ribakov, Y. Mathematical experiments planning in concrete technology. Nova Science Publishers: New York, USA, 2011, 173 p.