

ВПЛИВ СПОСОБІВ АКТИВАЦІЇ ПОДРІБНЕНОГО БЕТОННОГО БРУХТУ ПРИ ВВЕДЕННІ ЙОГО У БЕТОН ЯК МІНЕРАЛЬНОЇ ДОБАВКИ

INFLUENCE OF ACTIVATION METHODS OF THE FINE FRACTION OF RECYCLED CONCRETE WASTE USED AS A MINERAL ADDITIVE FOR CONCRETE

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID 0000-0001-8759-6318, Житковський В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Рудой В.В., аспірант, ORCID: 0009-0008-7659-1480 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), Сятковський О.А., ст.викладач ORCID: 0009-0000-1945-1838

Dvorkin L., doctor of technical sciences, professor, ORCID 0000-0001-8759-6318, Zhitkovsky V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Rudoi V., postgraduate, ORCID: 0009-0008-7659-1480 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), Siatkovskiy O., ORCID: 0009-0000-1945-1838

У роботі досліджено вплив механічної, термічної та хімічної активації дисперсної фракції переробленого бетонного брухту на її ефективність як мінеральної добавки до бетону. Встановлено, що підвищення питомої поверхні та термообробка підсилюють пуцоланову активність порошку, а використання поліакрилатного суперпластифікатора дозволяє знизити водопотребу і компенсувати зниження міцності бетону при заміні до 20 % цементу.

This paper investigates the influence of mechanical, thermal, and chemical activation of the fine fraction of recycled concrete waste on its performance as a mineral additive for concrete. The fine recycled concrete powder (CF < 1 mm) was obtained from demolished structures, and its chemical and mineralogical composition was determined. The pozzolanic activity and pH of CF increased with fineness and thermal treatment temperature. A four-factor three-level experimental design (B⁴) was applied to evaluate the combined effects of specific surface area (130–370 m²/kg), thermal treatment temperature (0–600 °C), dosage of polyacrylate superplasticizer (0–1 % by cement mass), and sodium silicofluoride (0–1 %) on water demand and compressive strength of concrete mixtures containing 20 % CF as a cement substitute. Statistical analysis yielded polynomial regression models with high adequacy ($R^2 \approx 0.99$), allowing quantitative assessment of each factor and their interactions. The results show that the dominant influence on strength and workability is exerted by the

superplasticizer content, which compensates the increase in water demand caused by finer CF. Optimal activation, ensuring an activity index $I_a = 1.0$ (equal strength to reference concrete), is achieved at a CF fineness of 344 m²/kg, thermal treatment at 350 °C, and 1 % polyacrylate superplasticizer. The proposed combination provides a cost-effective and sustainable method for partial cement replacement without loss of strength, enabling efficient recycling of construction and demolition waste in concrete production.

Ключові слова: бетонний брукхт, дисперсна фракція, мінеральна добавка, активація, планування експерименту, цементний бетон, міцність на стиск, рухомість, водоцементне відношення, суперпластифікатор.

Concrete waste, fine fraction, mineral additive, activation, experiment planning, cement concrete, compressive strength, workability, water-to-cement ratio, superplasticizer.

Вступ. На сучасному етапі розвитку будівельної галузі актуальною є проблема підвищення показників як економічної, так і екологічної ефективності бетонів та розчинів. Виробництво портландцементу, як відомо [1], потребує значних витрат енергії і супроводжується великим “вуглецевим слідом”, що негативно впливає на оточуюче середовище. Зменшення витрат цементу досягається комплексом технологічних заходів з яких найбільш поширеними є його часткова заміна мінеральними добавками, котрі можна вважати активними наповнювачами бетонів і розчинів. Асортимент мінеральних добавок що вводяться при виробництві як цементу, так і бетонів та розчинів достатньо широкий, найбільшим попитом користуються доменні гранульовані шлаки і кам'яно-вугільна зола-виносу. До 2050 року очікується [2, 3], що доменні гранульовані шлаки, зола-виносу зможуть задовольнити лише 20% світової потреби цементного виробництва, тому розширення асортименту активних мінеральних добавок є актуальною проблемою.

До матеріалів, що потребують утилізації відносяться відходи від демонтажу та руйнування будівель та споруд, кількість яких постійно зростає. Згідно наявних даних у Європейському союзі у 2018 році було отримано 374 млн тонн таких відходів [4]. У Китаї у 2021 році отримано 2 мільярди тонн відходів і очікується що їх кількість зросте до 2030 року до 7 млрд тонн [5]. Склад будівельних відходів різноманітний, але зазвичай у ньому переважають відходи руйнування бетону і цегли (до 80%). В Україні інтенсивне зростання об'єму таких відходів обумовлене руйнуванням будівель і споруд в результаті воєнних дій.

На даний час виконана значна кількість досліджень по застосуванню подрібненого бетону [6]. Одним із напрямків таких досліджень є застосування дисперсної подрібненої фракції бетонного брукхту (CF) як активної мінеральної добавки в бетони.

Вплив активних мінеральних добавок на властивості цементних систем обумовлений комплексом хімічних і фізико-хімічних процесів, що відбуваються при їх структуроутворенні і твердінні [7]. Внаслідок пуцоланової активності добавок в цементному камені синтезуються гідратні новоутворення, що дають можливість зменшити витрати цементу без суттєвої зміни його основних властивостей. Експериментально встановлено [8, 9, 10, 11, 12], що бетонні порошки мають певну пуцоланову активність яка залежить від їх складу і ступеню подрібнення. Хімічна активність дисперсного бетонного порошку доповнюється також здатністю до гідrataції непрореагованої частини цементу, яка міститься в ньому і вона залежить від вмісту цементу у бетонному брухті, тривалості і умов твердіння бетону.

Маючи високу питому поверхню, дисперсні наповнювачі впливають на фізико-хімічні процеси на поверхні розділу фаз. Відповідно до теорії Гіббса-Фольмера [13] вони можуть служити центрами кристалізації і сприяти утворенню зародків кристалів новоутворень твердіючого матеріалу. З розрахункових залежностей теорії Гіббса-Фольмера слідує що позитивний ефект на кристалізацію цементних систем з дисперсним наповнювачем має здійснювати теплова обробка і зменшення радіуса його частинок.

На формування структури бетонів суттєво впливають також так звані «стиснені умови» [14], що відрізняються різким збільшенням твердої фази при введенні активних наповнювачів і переведенням частини води в плівковий стан.

Важливим параметром, що впливає на властивості бетонів є міцність контактної зони між в'язким і заповнювачем. У відомих дослідках [7] було показано, що зменшення міжзернових відстаней у розчинах на кварцовому піску з 210 до 30 нм дозволяє в 1,5-2 рази збільшити твердість цементного каменю, що зв'язує зерна заповнювача. Забезпечення оптимальної товщини контактної прошарку при введенні бетонного, як і інших наповнювачів, потребує достатньо високої тонкості його подрібнення і встановлення оптимального вмісту. Достатньо міцні адгезійні контакти у системі «цемент-наповнювач» можливі за умови, коли поверхнева енергія наповнювачів вища ніж цементу. Цей висновок базується на термодинамічній концепції адгезії, згідно якої поверхнева енергія адгезиву має бути вища ніж субстрата [15]. Збільшення поверхневої енергії бетонних порошків досягається розривом міжмолекулярних зв'язків структури, що досягається при їх подрібненні. При цьому відбувається поверхнева аморфізація і ріст ізобарного потенціалу порошків і відповідно їх хімічної активності.

Суттєвий позитивний ефект спостерігається при сумісному введенні у цементній системі активних наповнювачів та добавок поверхнево-активних речовин [16]. Необхідною умовою ефективності ПАР є їх здатність до хемосорбційної взаємодії з поверхнею частинок наповнювача. Як відомо, для мінеральних наповнювачів кислотного характеру найбільш ефективними вважаються ПАР катіонно-активного характеру, а основного - аніон-активні.

Враховуючи, що бетонні порошки переважно мають лужну реакцію і їх можна вважати за складом основними, для них більш ефективними повинні бути аніон-активні поверхнево-активні речовини. До них відносяться традиційні нафталін- і меламін-формальдегідні суперпластифікатори, а також суперпластифікатори останнього покоління - поліакрилатні і полікарбоксилатні.

Таким чином, для підвищення ефективності використання бетонного брухту (особливо дисперсної його складової) як наповнювача для заміни частини цементу у бетоні, повинно бути ефективним комплексне застосування різних способів його активації, особливо за рахунок його обробки механічним та термічним способом, а також додавання спільно хімічних речовин, які можуть впливати як на властивості частинок наповнювача, так і на властивості бетонної суміші та бетону.

Метою даної роботи було вивчення впливу механічної, термічної та хімічної активації порошку на основі бетонного брухту (БП) на ефективність його введення до бетону як мінеральної добавки.

Матеріали та методика досліджень. Для дослідження була взята дисперсна фракція крупністю менше 1 мм, отримана шляхом подрібнення бетонного брухту зруйнованих будівель у Київській області. Міцність вихідного бетону, з якого отриманий бетонний брукт відповідає класу бетону за міцністю на стиск С20/25. Ця міцність була встановлена за кореляційною залежністю між міцністю і втратами маси після випробувань на стиск брухту в циліндрі за ДСТУ Б В.2.7-71-98 [17].

Таблиця 1

Хімічний і мінералогічний склад брухту

Хімічний склад, %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	
	13.2	75.5	6.28	3.56	0.61	
Мінералогічний склад, %	Кварц	Польові шпати	Кальцит	C ₃ S	C ₂ S	Гідратні продукти твердіння
	43,3	15,5	10,9	0,86	2,09	28,3

Мінералогічний склад брухту був визначений на дифрактометрі Aeris Cement diffractometer (таблиця 1) і дозволяє вважати, що він був виготовлений з використанням портландцементу, у якості дрібного заповнювача був використаний кварцовий пісок, а крупного - граніт або близька до нього вивержена гірська порода. Цей висновок базується на наявності в брукті непрореагованих основних клінкерних мінералів, а також таких мінералів як кварц, польові шпати, ортоклаз. Про те, що вихідний бетон має значний вік, свідчить і карбонізація такого продукту гідратації цементу, як гідроксид кальцію. Цей факт підтверджує і порівняно невисоке значення рН суспензії

бетонного порошку, яке збільшуються у міру збільшення дисперсності бетонного брухту (таблиця 2).

Вихідна питома поверхня дрібної фракції бетонного брухту, отриманої при подрібненні бетону у щоківній дробарці - 130 м²/кг (зразок №1). Помелом у лабораторному кульовому млині її збільшували до 250 м²/кг (зразок №2) і 370 м²/кг (зразок №3). Для підвищення активності бетонного порошку як мінеральної добавки здійснювали прокалювання зразків у муфельній печі при температурі 300°C і 600°C. Для отриманих порошків поряд з рН вимірювали пуцоланову активність методом поглинання СаО із водного розчину гідроксиду кальцію (табл.2). Як видно із таблиці, підвищення дисперсності брухту, а також його термообробка, поряд зі збільшенням рН, призводить і до підвищення пуцоланової активності бетонних порошків.

Таблиця 2

Питома поверхня і пуцоланова активність СФ

Термообробка	Необроблений			600°C		
Питома поверхня бетонного порошку (S_p), м ² /кг	130	250	370	130	250	370
рН	8,1	9,2	10,3	8,3	9,5	11,7
Пуцоланова активність бетонного порошку, мг/г	40,5	52,3	70,4	42,2	60,1	78,8

Порошковидні продукти бетонного брухту вводили до бетонної суміші, яка виготовлялась на портландцементі СЕМ І 42,5 з наступним хімічним складом (%): SiO₂ - 22.47, Al₂O₃ - 5.26, Fe₂O₃ - 4.07, СаО - 66.18, MgO - 0.64, SO₃ - 0.46, MnO - 0.29.

В експериментах використовували суперпластифікатор поліакрилатного типу Марей Dynamon SR3 (SP). В якості хімічного активатора застосовували кремнефторид натрію (Na₂SiF₆). За даними багатьох дослідників [18] кремнефторид натрію здійснює комплексну лужно-фторидну активацію мінеральних добавок, збільшуючи їх реакційну здатність.

В якості дрібного заповнювача використовували пісок з модулем крупності 2.1, вмістом пилюватих частинок 1,9 %, в якості крупного - гранітний щебінь крупністю 5-20 мм. У всіх експериментальних складах бетону частка піску в суміші заповнювачів була прийнята постійною і становила 0,32 (за об'ємом). Витрату води у бетонних сумішах з урахуванням прийнятих умов планування експериментів з забезпеченням їх рухомості за осадкою конуса 100-150 мм (клас S3) [20, 21]. Міцність бетону на стиск визначали відповідно до ДСТУ EN 12390-1:2024 (EN 12390-1:2021, IDT) [22].

Досліди проводились з використанням методології математичного планування експериментів з використанням трирівневого чотирифакторного плану В₄ і отриманням математичних моделей водопотреби та міцності бетону [23, 24]. Для оцінки ефективності різних способів активації дисперсної фракції

бетонного брухту використовувався відносних показник (Індекс активності добавки):

$$I_a = \frac{f_{cmx}}{f_{cmk}}, \quad (1)$$

де, f_{cmx} - міцність при стиску бетону з добавкою бетонного брухту на 28 добу; f_{cmk} - міцність при стиску бетону без добавки (контрольного бетону). Витрата цементу у контрольному зразку 400 кг/м³, у експериментальних - зразках – 320 кг/м³.

Результати досліджень. Досліджували вплив чотирьох факторів на водопотребу (В, л/м³) і міцність при бетону стиску (f_{cm7} , f_{cm28} (МПа)) (табл. 3). Умови планування експериментів і матриця з експериментальними даними наведені у табл. 3 та 4. Матриця включає 24 точки в кожній з яких наведені середні арифметичні значення водопотреби (за результатами двох випробувань) і міцності на стиск за результатами випробування трьох зразків-кубів 100×100×100 мм.

Таблиця 3

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований	-1	0	+1	
Питома поверхня дисперсної фракції бетону (S_p , м ² /кг)	X ₁	130	250	370	120
Температура термічної обробки дисперсної фракції бетону, (Т, °С),	X ₂	0	300	600	300
Вміст суперпластифікатора (% від маси цементу), СП	X ₃	0	0.5	1	0.5
Вміст Na ₂ SiF ₆ (%), Na ₂ SiF ₆	X ₄	0	0.5	1	0.5

Таблиця 4

Матриця планування В₄ та експериментальні дані

No.	Фактори				В, л/м³	Міцність при стиску, МПа		I _a
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		f _{cm7}	f _{cm28}	
1	+1	+1	+1	+1	176	51,0	67,4	1,09
2	+1	+1	+1	-1	168	46,2	64,7	1,04
3	+1	+1	-1	1	245	23,7	34,8	0,56
4	+1	+1	-1	-1	237	22,1	29,9	0,48

Продовження табл.3								
5	+1	-1	+1	+1	166	45,8	58,2	0,94
6	+1	-1	+1	-1	170	43,4	55,2	0,89
7	+1	-1	-1	+1	232	17,3	22,6	0,36
8	+1	-1	-1	-1	236	18,1	17,5	0,28
9	-1	+1	+1	+1	163	50,0	55,6	0,90
10	-1	+1	+1	-1	167	44,7	51,7	0,83
11	-1	+1	-1	+1	229	25,7	31,7	0,51
12	-1	+1	-1	-1	233	23,6	25,7	0,41
13	-1	-1	+1	+1	154	48,1	56,7	0,91
14	-1	-1	+1	-1	170	45,1	52,5	0,85
15	-1	-1	-1	+1	216	22,6	29,8	0,48
16	-1	-1	-1	-1	232	22,8	23,5	0,38
17	+1	0	0	0	211	34,6	44,9	0,72
18	-1	0	0	0	203	36,5	42,0	0,68
19	0	+1	0	0	209	36,9	47,1	0,76
20	0	-1	0	0	204	34,0	41,4	0,67
21	0	0	+1	0	163	48,2	60,4	0,97
22	0	0	-1	0	229	23,4	29,6	0,48
23	0	0	0	+1	200	37,1	49,0	0,79
24	0	0	0	-1	204	34,8	44,5	0,72

В результаті статистичного аналізу експериментальних даних отримані адекватні з довірчою ймовірністю 0,95 рівняння регресії водопотреби бетонної суміші з осадкою конуса (ОК) 100...150 мм та міцності при стиску у віці 7, 28 діб.

Водопотреба

$$B = 204 + 4,1 \cdot X_1 + 2,8 \cdot X_2 - 32,9 \cdot X_3 - 2 \cdot X_4 + 3 \cdot X_1^2 + 2,3 \cdot X_2^2 - 8 \cdot X_3^2 - 1,7 \cdot X_4^2 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot X_3 + 3 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,75 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3 \cdot X_2 \cdot X_4 \quad (2)$$

Міцність

$$f_{cm}^7 = 36,1 - 0,94 \cdot X_1 + 1,48 \cdot X_2 + 12,4 \cdot X_3 + 1,125 \cdot X_4 - 0,56 \cdot X_1^2 - 0,65 \cdot X_2^2 - 0,35 \cdot X_3^2 - 0,15 \cdot X_4^2 + 0,81 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,75 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,15 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,3 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,61 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,8 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (3)$$

$$f_{cm}^{28} = 45,7 + 1,44 \cdot X_1 + 2,85 \cdot X_2 + 15,4 \cdot X_3 + 2,26 \cdot X_4 - 2,25 \cdot X_1^2 - 1,46 \cdot X_2^2 - 0,69 \cdot X_3^2 + 1,04 \cdot X_4^2 + 2,58 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,18 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,3 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,74 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,06 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,54 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (4)$$

Аналіз проведених рівнянь дозволяє стверджувати, що всі досліджувані фактори впливають на водопотребу і міцність бетону з добавкою БП і кількісно оцінити цей вплив.

Як було показано у наших попередніх дослідженнях [25] дисперсна фракція бетонного брухту, при введенні її замість частини цементу, якщо не враховувати її взаємодію з іншими факторами, збільшує водопотребу, що обумовлено його пористістю та наявністю аморфізованих продуктів твердіння цементу.

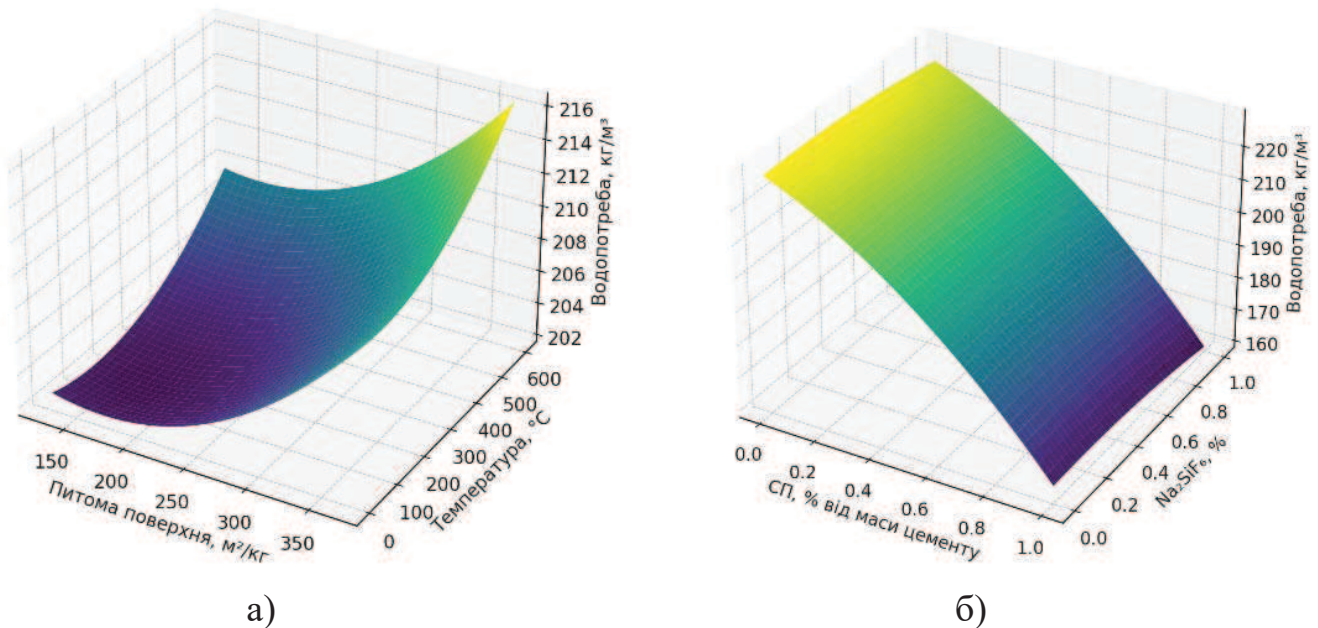


Рис. 1. Поверхні відгуку водопотреби бетонної суміші (V) від питомої поверхні бетонного порошку $S_{\text{п}}$ та температури його термообробки (а), вмісту суперпластифікатора (СП) та вмісту кількості хімічного активатора (Na_2SiF_6) (б)

Максимальне зниження водопотреби викликає фактор X_3 (вміст суперпластифікатора СП) (рис. 1 б). Чим більша кількість СП, тим менше потрібно води для досягнення заданої консистенції. Фактори, що відповідають за активацію БП (питома поверхня (рис. 1а), температура термообробки, кількість хімічного активатора кремнефториду натрію) теж впливають на водопотребу, однак їх вплив порівняно менш помітний (рис. 2). Для фактора X_3 (кількість суперпластифікатора) характерна наявність у моделі найбільш суттєвих від'ємних взаємодій ($X_3 \times X_1$, $X_3 \times X_2$): СП ефективно компенсує підвищення водопотреби, викликане іншими факторами. Питома поверхня БП $S_{\text{п}}$ (X_1) збільшує водопотребу на 2...5 л/м³, так як тонкодисперсні частинки вимагають більше води на їх змочування та розподіл у цементній матриці. Температура термообробки БП (X_2) призводить до порівняно незначного зростання водопотреби, що може бути викликане активацією поверхні, і формуванням більш гідрофільних та реакційно-здатних фаз (2...10 л/м³) (рис. 1а). Фактор X_4 (вміст кремнефториду натрію) викликає невелике зменшення водопотреби в межах досліджуваного діапазону внаслідок деякого пластифікуючого ефекту (5...15 л/м³).

Таким чином, наявність значних коефіцієнтів взаємодії факторів у моделі водопотреби, дозволяє зробити ряд важливих висновків. Взаємодії СП з питомою поверхнею БП (S_p) та температурою його термообробки (T) від'ємні за знаком впливу на V : під дією СП негативний вплив від підвищеної дисперсності або термообробки відчутно послаблюється (рис. 16). Таким чином, для мінімізації водопотреби при введенні БП, ключовим вирішенням проблеми є підвищення вмісту СП (зниження 50 ± 10 л/м³).

Модель міцності бетону з чотирма факторами (2) показала високий рівень адекватності ($R^2 \approx 0.991$, середня похибка ≈ 1.8 МПа). Це дозволяє не лише якісно, а й кількісно оцінювати вплив окремих параметрів. Міцність бетону при стиску на 28 добу за моделлю (рівняння) змінюється у межах від 22 до 60 МПа, що викликається впливом активації та суттєвим коливанням В/Ц наслідком додавання суперпластифікатора (рис. 2-3).

Найбільший вплив на міцність викликає фактор X_3 (вміст СП). Збільшення дозування суперпластифікатора сприяє підвищенню міцності бетону близько 27 МПа (55-50%) внаслідок суттєвого зниження водопотреби бетонної суміші, відміченої вище та відповідного зниження В/Ц бетону (рис. 3б). Дія різних способів активації БП неоднозначно відображаються на міцності бетону. Підвищення температури термоактивації спричиняє помітний вплив на міцність: різниця між низькою (нетермоактивованій БП) та високою T становить близько 9...10% (рис. 2 а,б). Активация за рахунок Na_2SiF_6 у досліджуваному діапазоні дає приріст близько 6...7% (рис. 3а). Підвищення питомої поверхні БП шляхом помелу у кульовому млині (S_p) проявляє неоднозначний ефект спричиняючи максимальне збільшення міцності бетону ближче до середнього рівня варіювання (250 м²/кг), - подальше підвищення тонкості помелу спричиняє зниження міцності пов'язане зі збільшенням водопотреби (рис. 2б).

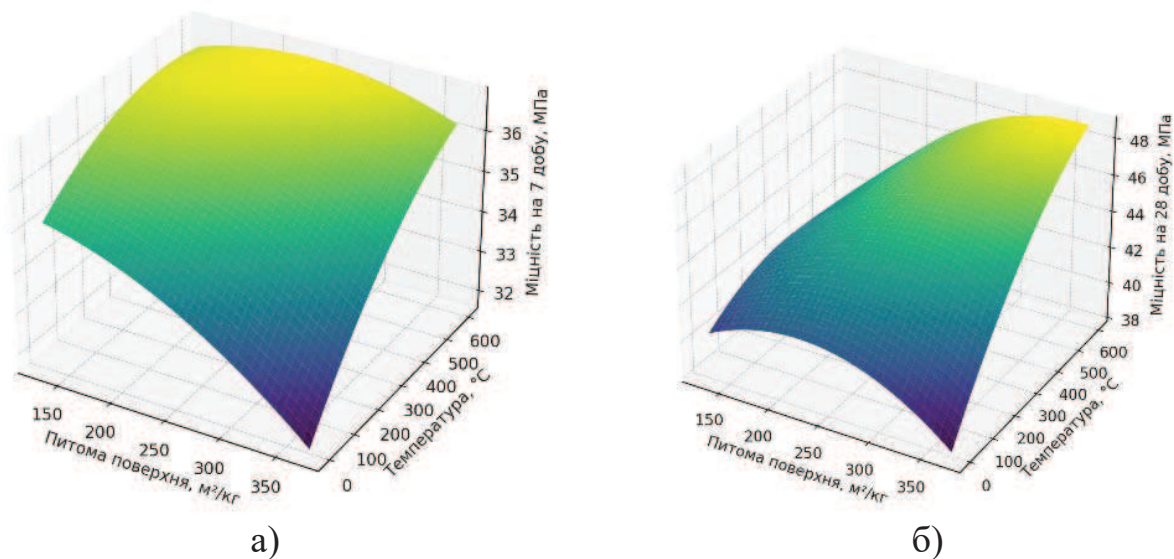


Рис. 2. Поверхні відгуку міцності бетону при стиску f_{cm}^7 (а) та f_{cm}^{28} (б) від зміни питомої поверхні (S_p) та температури термообробки (T)

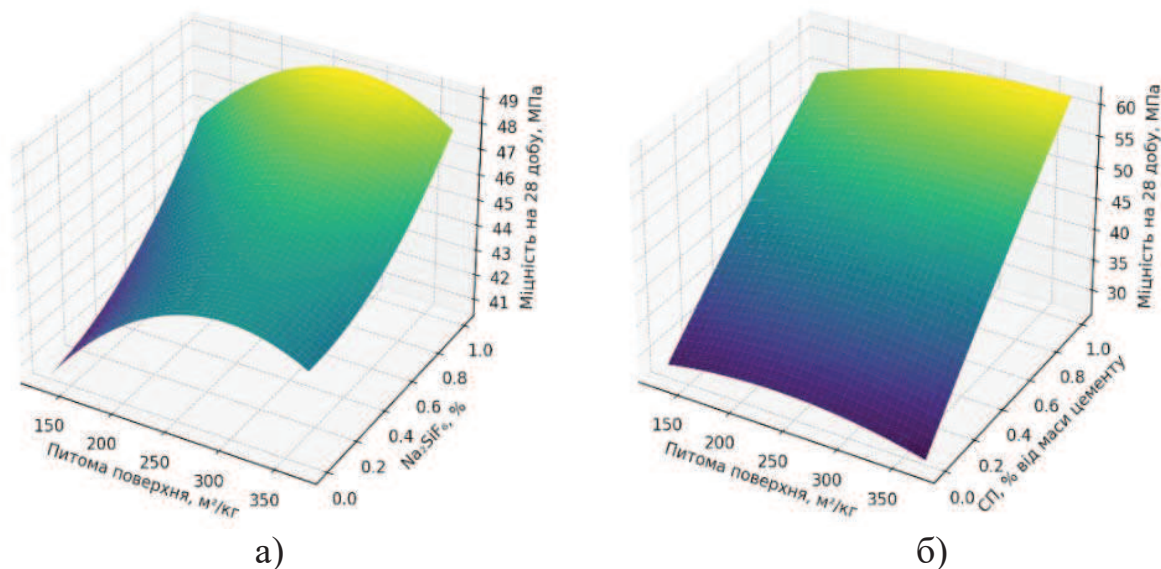


Рис. 3. Поверхні відгуку міцності бетону при стиску f_{cm}^{28} від зміни питомої поверхні (S_n) та вмісту хімічного активатора (Na_2SiF_6) (а), питомої поверхні (S_n) та вмісту суперпластифікатора (СП) (б)

Взаємодії між факторами підтверджують, що результат максимально ефективного використання дисперсної фракції переробленого бетону як мінеральної добавки формується комбінаційно. Найбільш помітними є взаємодії $X_1 \times X_2$ та $X_1 \times X_3$. Так зі збільшенням вмісту СП ефект механічної активації БП, котрий виражається підвищенням питомої поверхні бетонного порошку стає майже вдвічі сильніший (Рис.3б). Поєднання механічної і термічної активації БП (фактори X_1 та X_3) (рис. 1б) спричиняє найбільший вплив і дає можливість додатково підвищити ефект від його застосування (додаткове збільшення міцності до 4 МПа порівняно з простим сумуванням їх ефектів). Інші взаємодії проявляють менш помітні ефекти (у межах 1–2 МПа).

Показані вище тенденції впливу факторів на міцність на 28 добу переважно зберігаються і ранні терміни твердіння (7 діб).

Індекс активності (I_a) показує як знижується міцність бетону при введенні мінеральної добавки. Прийнято вважати [6], що добавка може бути використана для заміни частини цементу у бетоні коли I_a не менший 0,8. Значення I_a розраховані у нашому експерименті (табл. 4) змінювались у діапазоні від 0,28 до 1,08. Найбільш помітну зміну I_a викликає збільшення вмісту СП. Досягнення порогового значення I_a спостерігається при кількості суперпластифікатора більше 0,8% від маси цементу. Тобто для ефективного використання БП у бетоні необхідно компенсувати його негативний вплив на водопотребу шляхом використання суперпластифікатора з високим водоредукуючим ефектом (у нашому випадку СП поліакрилатного типу Marei Dynamon SR3).

За отриманими моделями (2-4) та значеннями індексу активності за допомогою надбудови «Пошук рішення» MS Excel була проведена математична оптимізація з пошуком найбільш ефективного комплексу активації БП, що забезпечує максимальну ефективність його використання

при мінімальній вартості. За результатами оптимізації встановлено, що досягнення максимального I_a ($I_a=1$), тобто коли добавка БП у кількості 20% від маси цементу не знижує міцність бетону, при забезпеченні мінімальної вартості активаційних заходів можливе при наступних значеннях факторів: питома поверхня БП – 344 м²/кг, температура термообробки – 350°C, вміст СП -1%, Na₂SiF₆ не дає додаткової економії при його використанні.

Таким чином можна стверджувати, що хоча дисперсна фракція переробленого бетону у вигляді бетонного порошку загалом знижує показник міцності на 15–20%, але такий вплив суттєво нівелюється введенням СП та додатковою її активацією за рахунок домелу і помірної термообробки.

Висновки:

1. За допомогою комплексу механічних, хімічних і фізико-хімічних методів визначені якісні параметри бетонного брухту і порошку на його основі (БП), міцність вихідного бетону, його хімічний і фазовий склад, питому поверхню і пуцоланову активність.

2. Встановлено зростання пуцоланової активності БП з підвищенням його питомої поверхні та температури термообробки.

3. За допомогою методології математичного планування експериментів отримані чотирифакторні експериментально-статистичні моделі водопореби і міцності бетону з урахуванням питомої поверхні БП, витрати добавки-суперпластифікатора, прискорювача твердіння (кремнефториду натрію), а також температури термічної обробки БП.

4. На основі аналізу отриманих моделей кількісно оцінено вплив досліджених факторів, що дозволило проранжувати їх залежно від впливу на водопотребу і міцність бетону, а також встановити ефекти їх взаємодії.

5. Встановлено, що підвищення водопотреби і недобір міцності бетону при введенні БП можна попередити за рахунок додавання поліакрилатного суперпластифікатора до бетонної суміші і активації БП термічною обробкою.

6. В результаті проведеної математичної оптимізації за отриманими моделями встановлено, що економічно виправдане використання бетонного порошку для часткової заміни до 20% цементу без втрати міцності може бути досягнуто при його домелі до питомої поверхні 344 м²/кг і термообробці при температурі 350°C за умови використання поліакрилатного суперпластифікатора в кількості 1%.

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. Locher, F.W. *Cement - Principles of Production and Use*; Verlag Bau + Technik GmbH: Düsseldorf, Germany, 2006; p. 536.
2. Carriço, A.; Bogas, J.A.; Guedes, M. Thermoactivated cementitious materials—A review. *Constr. Build. Mater.* 2020, *250*, 118873.
3. Yang, J.; Guo, Y.; Tam, V.W.; Tan, J.; Shen, A.; Zhang, C.; Zhang, J. Feasibility of recycled aggregates modified with a compound method involving sodium silicate and silane as permeable concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2022, *361*, 129747.
4. European Commission. *Construction and Demolition Waste (CDW)*. 2018. Available online: <https://ec.europa.eu/newsroom/growth/items/455097/en> (accessed on 3 October 2025).
5. Runying An, Yangyang Guo, Estimating construction and demolition waste in the building sector in China: Towards the end of the century, *Waste Management*, Volume 190, 2024, 285-295, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.09.023>.
6. Kaptan, K.; Cunha, S.; Aguiar, J. A review of the utilization of recycled powder from concrete waste as a cement partial replacement in cement-based materials: Fundamental properties and activation methods. *Appl. Sci.* 2024, *14*, 9775. <https://doi.org/10.3390/app14219775>.
7. Дворкін, Л.Й.; Соломатов, В.І.; Вировий, В.М.; Чудновський, С.М. Цементні бетони з мінеральними наповнювачами; Будівельник: Київ, Україна, 1991; 136 с.
Dvorkin, L.I.; Solomatov, V.I.; Vyrovyi, V.M.; Chudnovskyi, S.M. Tsementni betony z mineralnymy napovniuvachamy; Budivelnik: Kyiv, Ukraine, 1991; 136
8. Kaya, Y.; Aytekin, B.; Kaya, T.; Mardani, A. Investigation of pozzolanic activity of recycled concrete powder: Effect of cement fineness, grain size distribution and water/cement ratio. *Mater. Today Proc.* 2023, in press.
9. Horsakulthai, V. Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars. *Case Stud. Constr. Mater.* 2021, *15*, e00725.
10. Wang, C.Q.; Cheng, L.X.; Ying, Y.; Yang, F.H. Utilization of all components of waste concrete: Recycled aggregate strengthening, recycled fine powder activity, composite recycled concrete and life cycle assessment. *J. Build. Eng.* 2024, *82*, 108255.
11. Wang, C.; Yu, Q.; Zhan, B.; Gao, P.; Guo, B.; Chu, Y.; Chen, Y.; Bian, P. Activity quantification and assessment of recycled concrete powder based on the contributions of the dilution effect, physical effect and chemical effect. *J. Clean. Prod.* 2024, *442*, 140918.
12. Donatello, S.; Tyrer, M.; Cheeseman, C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cem. Concr. Compos.* 2010, *32*, 121–127.
13. Volmer, M. *Kinetics of Phase Formation (Kinetik Der Phasenbildung)*; Central Air Documents: Berlin, Germany, 1966; p. 219.
14. Сватовская, Л.Б.; Сычев, М.М. Активированное твердение цемента. Л: Стройиздат, 1983, 160 с.
Svatovskaia, L.B.; Sychev, M.M. Aktyvyrovannoe tverdenye tsementa. L: Stroiizdat, 1983, 160 s.
15. Rosenholm, J.B.; Peiponen, K.-E.; Gornov, E. Materials cohesion and interaction forces. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2008, *141*(1–2), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.03.001>.
16. Zhang, Y.; Sun, X. Synergistic effects of nano-silica and fly ash on the mechanical properties and durability of internal-cured concrete incorporating artificial shale ceramsite. *J. Build. Eng.* 2023, *66*, 105905.

17. ДСТУ Б В.2.7-71-98 Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань (ГОСТ 8269.0-97), Київ, Україна, 1998.

DSTU B V.2.7-71-98 Shchebin i hravii iz shchilnykh hirs'kykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlia budivelnnykh robit. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan (HOST 8269.0-97), Kyiv, Ukraina, 1998.

18. Dvorkin, L.; Zhitkovsky, V.; Tracz, T.; Sitarz, M.; Mróz, K. Mechanical–chemical activation of cement-ash binders to improve the properties of heat-resistant mortars. *Materials* 2024, 17, 5760. <https://doi.org/10.3390/ma17235760>.

19. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 Настанова щодо визначення складу важкого бетону, Київ, Україна, 2013.

DSTU-N B V.2.7-299:2013 Nastanova shchodo vyznachennia skladu vazhkoho betonu, Kyiv, Ukraina, 2013.

20. ДСТУ EN 206:2022 Бетон. Специфікація, продуктивність, виробництво та відповідність (EN 206:2013+A2:2021, IDT), Київ, Україна, 2022.

DSTU EN 206:2022 Beton. Spetsyfikatsiia, produktyvnist, vyrobnytstvo ta vidpovidnist (EN 206:2013+A2:2021, IDT), Kyiv, Ukraina, 2022.

21. ДСТУ EN 12350-2:2022 Випробування бетонної суміші. Частина 2. Визначення рухливості бетонної суміші (за осіданням конуса) (EN 12350-2:2019, IDT), Київ, Україна, 2022.

DSTU EN 12350-2:2022 Vyprobuвання betonnoi sumishi. Chastyna 2. Vyznachennia rukhlyvosti betonnoi sumishi (za osidanniam konusa) (EN 12350-2:2019, IDT), Kyiv, Ukraina, 2022.

22. ДСТУ EN 12390-1:2024 Випробування бетону. Частина 1. Форма, розміри та інші вимоги до зразків і форм (EN 12390-1:2021, IDT), Київ, Україна, 2024.

DSTU EN 12390-1:2024 Vyprobuвання betonu. Chastyna 1. Forma, rozmiry ta inshi vymohy do zrazkiv i form (EN 12390-1:2021, IDT), Kyiv, Ukraina, 2024

23. Box, G.E.P.; Hunter, J.S.; Hunter, W.G. *Statistics for Experimenters: Design, Discovery, and Innovation*, 2nd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2005; p. 655.

24. Dvorkin, L.; Dvorkin, O.; Ribakov, Y. *Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology*; Nova Science Publishers: New York, NY, USA, 2012; p. 172.

25. В.В. Житковський, В.В. Рудой, Н.В. Лушнікова, О.А. Сятковський. Дослідження дисперсної фракції переробленого бетонного брухту як мінеральної добавки до бетону. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, №47, 2025, С. 120-129

V.V. Zhytkovskyi, V.V. Rudoi, N.V. Lushnikova, O.A. Siatkovskyi. Doslidzhennia dyspersnoi fraktsii pereroblenoho betonnoho brukhtu yak mineralnoi dobavky do betonu. Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy, №47, 2025, S. 120-129