

УДК: 691.535

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОЇ ФРАКЦІЇ БЕТОННОГО БРУХТУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РОЗЧИНУ ДЛЯ МУРУВАННЯ

FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE DISPERSED FRACTION OF CONCRETE SCRAP ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE MORTAR FOR MASONRY

Житковський В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Сятковський О.А., старший викладач кафедри ТБВМ, ORCID: 0009-0000-1945-1838, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Zhitkovsky V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Syatkovskiy O.A., senior lecturer of the Department of BPTMS, ORCID: 0009-0000-1945-1838, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

У статті наведені результати дослідження впливу дисперсної фракції бетонного брухту на фізико-механічні властивості будівельного мурувального розчину. Дисперсна фракція (ДФББ) отримана шляхом подрібнення та фракціонування бетонного брухту. У ході дослідження експериментально встановлюється можливість отримання оптимальних фізико-механічних показників розчину для мурування при умові використання ДФББ як часткової заміни цементу. В дослідженні також використали метод математичного планування експерименту. Було отримано моделі залежності впливу технологічних факторів на основні фізико-механічні властивості розчину для мурування: міцність на стиск розчину, міцність зчеплення з основою, водопоглинання. Результати отримані в ході експерименту підтверджують позитивний ефект використання ДФББ як часткової заміни цементу.

The article presents the results of a study of the influence of the fine fraction of concrete scrap on the physical and mechanical properties of construction mortar. The fine fraction of concrete scrap was obtained by crushing, grinding and fractionation of concrete scrap. During the research, the possibility of obtaining optimal physical and mechanical parameters of the mortar for masonry is experimentally established under the condition of using finely

dispersed fraction of concrete scrap (DFBB) as a partial substitute for cement. The study also used the method of mathematical experimental design. Models of the dependence of the influence of factors on the main physical and mechanical properties of the mortar for masonry were obtained: compressive strength of the mortar, shear bond strength, water absorption. The results obtained during the experiment confirm the positive effect of using DFBB as a partial substitute for cement.

The results of experimental studies indicate a positive effect of DFBB on the formation of the structure and operational properties of masonry mortar. It has been established that with a rational content of the fine fraction of concrete scrap, it is possible to increase the compressive strength and adhesion of the mortar with a simultaneous decrease in water absorption, which is important for ensuring the durability of the masonry.

The results obtained confirm the feasibility of using the finely dispersed fraction of concrete scrap as a partial substitute for cement in the compositions of construction mortars and open up prospects for its practical application in order to increase the resource efficiency and environmental friendliness of building materials.

Ключові слова: дисперсна фракція бетонного брухту, ефективність, математичне планування, міцність на стиск, міцність зчеплення при зсуві, водопоглинання, зола-винос
dispersed fraction of concrete scrap, efficiency, mathematical planning, compressive strength, shear bond strength, water absorption, fly ash.

Вступ. На сьогодні будівельна галузь характеризується зростаючими обсягами використання ресурсів та паралельно накопиченням значної кількості будівельних відходів, зокрема бетонних залишків (брухт). Використання таких відходів залишається актуальною науковою та екологічною проблемою, вирішення якої можливе шляхом залучення брухту до повторного використання у складі будівельних матеріалів. Одним із перспективних напрямів є застосування дисперсних фракцій переробленого бетонного брухту як мінеральних добавок у в'язучих середовищах.

Будівельні розчини для мурування займають важливе місце серед матеріалів загальнобудівельного призначення, оскільки їхні фізико-механічні властивості суттєво впливають на експлуатаційну надійність та довговічність кам'яних і цегляних конструкцій. Традиційно підвищення властивостей мурувальних розчинів досягається шляхом збільшення витрати цементу або введенням хімічних добавок, що не завжди є економічно та екологічно доцільним. У цьому контексті використання вторинних мінеральних матеріалів як часткових заміників цементу набуває особливої актуальності.

Дисперсна фракція бетонного брухту, отримана шляхом подрібнення та помелу, характеризується наявністю активних мінеральних компонентів,

залишків негідратованого цементу та розвиненою питомою поверхнею. Це створює передумови для її участі у формуванні структури цементного каменю та її впливу на реологічні, механічні й експлуатаційні характеристики розчинів. Разом із тим, механізми дії такої добавки та оптимальні параметри її використання потребують подальшого експериментального обґрунтування.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу дисперсної фракції бетонного брухту на фізико-механічні властивості будівельних розчинів для мурування з метою визначення доцільності та ефективності її застосування як часткового замітника цементу.

Стан питання. Використання перероблених матеріалів таких як бетонний брухт та дисперсна фракція цього брухту може знизити об'єми накопичених звалищ, а також створити сприятливі умови для оптимізації складу будівельних розчинів. Слід зазначити що в результаті переробки будівельного брухту отримують частинки різних розмірів від 0,04мм до 100мм. Кожна така фракція займає своє потенційне місце у процесі впровадження та використання як наповнювач, заповнювач і як мінеральна добавка. Оцінка результатів аналізів показує що ДФББ містить певну частину вихідних компонентів бетону а також, що є дуже важливим, містить залишки, так званого «сплячого» або непрогідратованого цементу.

На сьогодні проведено ряд досліджень що підтверджують доцільність застосування переробленого бетонного брухту та інших матеріалів при виробництві різних будівельних розчинів. Зокрема досліджене використання будівельних відходів з певною ефективністю при використанні їх як заповнювача в цементних системах різних типів при цьому зберігаючи оптимальні показники їх основних властивостей [10]. Інші показники довговічності бетонів та розчинів які містили продукти подрібнення бетонного брухту та цегли [7, 9], у контексті впливу дрібних фракцій перероблених матеріалів на мікроструктуру [10].

Також дуже важливим критерієм зацікавленості у дослідженні є теорія та деякі практичні напрацювання у системі використання рециклінгових матеріалів щодо тенденції зменшення викидів парникових газів і споживання енергії різного походження. [10].

У дослідженнях розчинів для мурування також є принциповим визначення ефективності застосування бетонних порошоків у складах сумішей з різних компонентів [7] у поєднанні з цементом та золою-виносом [8]. Протікання процесів гідратації в таких системах є більш складним та з комплексом взаємопов'язаних умов.

Втім, важливим є і розуміння негативного впливу дисперсної фракції будівельного брухту, в якості замітника цементу, коли частка заміщення сягає 22-32% у розчинах для мурування та бетонних сумішах [9, 10].

Загалом попередні дослідження чітко формують принцип можливості застосування бетонного брухту у якості замітника цементу як активної

добавки. Дослідження демонструють позитивні та інколи негативні сторони застосування даного типу матеріалу.

Метою роботи є встановлення впливу характеристик ДФББ, як часткового заміниці цементного в'язучого, на фізико-механічні характеристики розчину для мурування. На основі експериментальних даних поставлена задача отримати математичні моделі впливу факторів та провести оптимізацію складу розчину для покращення його властивостей.

Матеріали. Методи проведення дослідження. Для проведення випробування в основній частині дослідів було використано 2 проби бетонного брухту - подрібнений бетон (вихідна міцність 50 МПа), подрібнений бетон (вихідна міцність 25 МПа). Підготовка бетонного брухту включала етапи механічного подрібнення в кульовій низькообертовій дробарці та розсіву на ситах. Гранулометричний склад бетонного брухту надано в табл. 1.

Таблиця 1

Гранулометричний вихідний склад бетонного брухту після подрібнення та просіювання

№ пп	Сито (розмір отворів, мм)	Частковий залишок на ситі, %	Повний залишок на ситі, %
1	12,5	27,40	27,40
2	10,0	8,09	35,49
3	5,0	19,28	54,77
4	2,5	7,09	61,86
5	1,25	7,03	68,89
6	0,63	5,08	73,97
7	0,315	16,88	90,85
8	0,16	0,90	91,75
9	0,08	3,22	94,97
10	дно	4,68	-

Аналіз гранулометричного складу подрібненого бетонного брухту демонструє виражену полідисперсність матеріалу, де основна маса (54,77%) представлена крупнозернистими фракціями розміром понад 5 мм, що дозволяє використовувати їх як вторинний заповнювач. Проте найбільш значущою з погляду раннього структуроутворення є дисперсна складова (частки <0,63 мм), яка становить 25,68% від загальної маси, включаючи 8,8% пилюватих частинок (<0,16 мм), що здатні активно впливати на щільність розчину.

Особливу цінність має найдрібніша фракція (прохід крізь сито 0,08 мм в обсязі 4,68%), оскільки ці високодисперсні частинки виконують роль мікронаповнювача та додаткових центрів кристалізації, заповнюючи порожнечі між зернами піску та активуючи «сплячий» цемент у складі брухту для інтенсивного набору міцності.

Хіміко-мінералогічний склад ДФББ подано в табл. 2. Результати комплексного аналізу речовинного складу дрібнодисперсної фракції бетонного брухту (ДФББ) свідчать про те, що даний матеріал є складною композиційною системою, яка поєднує властивості інертного наповнювача та активної мінеральної добавки.

Таблиця 2

Хімічний і мінералогічний склад бетонного 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

В якості в'язучого використано цемент виробництва «Волинь-цемент» з хіміко-мінералогічним складом зазначеним у табл. 3.

Таблиця 3

Хіміко-мінералогічний склад цементу «Волинь-цемент СЕМ II/A-S 42,5 R»

Вміст оксидів та клінкерних мінералів, %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
21,8	5,32	4,11	66,8	0,95	0,63	0,54	0,42
C ₃ S					Аліт		57,10
C ₂ S					Беліт		21,27
C ₃ A					Трикальцієвий алюмінат		6,87
C ₄ AF					Чотирикальцієвий алюмоферит		12,19

Як заповнювач в розчинах використовували пісок, з модулем крупності $M_{кр} - 1,99$, з вмістом пилевидних та глинистих часток 0,9 %, та гранулометричним складом згідно табл. 4.

Таблиця 4.

Гранулометричний склад піску

	№ сита				Всього
	0,63	0,315	0,16	дно	
Частковий залишок на ситі, %	10,05	83,81	1,99	4,15	100%
Повний залишок на ситі, %	10,05	93,86	95,85	-	
Мкр	1,99				

Також в складі розчину використовувалась кам'яновугільна зола-виносу Бурштинської ТЕС, що характеризується як кисла, приховано активна зола. Вона містить понад 80% мінеральних компонентів.

Для модифікування розчину застосовували редиспергований полімерний порошок Neolit і ефір целюлози Wekcello. Такі добавки вводять до складу розчинів для регулювання реологічних властивостей, водоутримувальної здатності та технологічності сумішей.

Застосовували суперпластифікатор Dynamon SR3 на основі модифікованих акрилових полімерів, що забезпечує низьке водоцементне відношення, довготривале збереження осадки конуса та високу механічну міцність.

Під час експерименту застосовували 3-х разову кратність повторювання.

Дослідження проводили з використанням математичного планування, де був використаний план В₃. В якості факторів взято:

X₁– Міцність вихідна ДФББ, МПа;

X₂– Вміст СП, %;

X₃– Дисперсність ДФББ, м²/кг.

Умови планування експерименту наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Умови планування експерименту

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Міцність вихідна ДФББ, МПа	X ₁	25	37,5	50	12,5
Вміст СП, % від цементу	X ₂	0,07	0,1	0,13	0,03
Дисперсність ДФББ, м ² /кг	X ₃	175	225	275	50

Водов'язуче відношення підбиралося з врахуванням експлуатаційної придатності даного типу розчину для мурування.

ДФББ вводили як заміну цементу в кількості 18% за масою. В кожному повторенні досліді ця пропорція була постійною.

Контрольну суміш та зразки з вмістом ДФББ доводили до постійної пластичності з досягненням розпливу на струшуючому столику 170....180мм.

Для випробування основних показників використовували методики діючих в Україні стандартів, зокрема міцність на стиск визначали за ДСТУ EN 1015-11:2022 «Методи випробування розчину для кладки. Частина 11. Визначення міцності на згин і стиск затверділого розчину» (EN 1015-11:2019, IDT) [4], водопоглинання за ДСТУ EN 1015-18:2022 «Методи випробування розчину для кладки. Частина 18. Визначення коефіцієнта водопоглинання за рахунок капілярної дії затверділого розчину» (EN 1015-18:2002, IDT) [5], міцність зчеплення при зсуві згідно ДСТУ Б EN 1052-3:2011 «Методи випробувань кам'яної кладки. Частина 3. Визначення початкової міцності кам'яної кладки при зсуві» (EN 1052-3:2002, IDT) [7].

Склад експериментальних сумішей та матриця планування наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Матриця планування та склад сумішей

№ п/п	Кодовані параметри			Склад розчину, кг/т						
	X ₁	X ₂	X ₃	ДФББ	СП	Зола	Пісок	РІПП	ЕЦ	Цемент
1	+1	+1	+1	45 (50)	2,93	40	643	15	2	255
2	+1	+1	-1	45 (50)	1,58	40	643	15	2	255
3	+1	-1	+1	45 (50)	2,93	40	643	15	2	255
4	+1	-1	-1	45 (50)	1,58	40	643	15	2	255
5	-1	+1	+1	45 (25)	2,93	40	643	15	2	255
6	-1	+1	-1	45 (25)	1,58	40	643	15	2	255
7	-1	-1	+1	45 (25)	2,93	40	643	15	2	255
8	-1	-1	-1	45 (25)	1,58	40	643	15	2	255
9	+1	0	0	45 (50)	2,55	40	643	15	2	255
10	-1	0	0	45 (25)	2,55	40	643	15	2	255
11	0	+1	0	45(37,5)	2,55	40	643	15	2	255
12	0	-1	0	45(37,5)	2,55	40	643	15	2	255
13	0	0	+1	45(37,5)	2,93	40	643	15	2	255
14	0	0	-1	45(37,5)	1,58	40	643	15	2	255
15	0	0	0	45(37,5)	2,55	40	643	15	2	255
16	0	0	0	45(37,5)	2,55	40	643	15	2	255
17	0	0	0	45(37,5)	2,55	40	643	15	2	255

Результати досліджень. Дослідження проводили при впливі трьох факторів (табл. 4) на водопотребу, міцність при стиску, міцність зчеплення з основою та водопоглинання. В таблиці 6 надано результати експериментального дослідження. Матриця включала 17 точок в кожній з яких наведені середні арифметичні значення міцності при стиску, міцності зчеплення з основою та капілярне водопоглинання.

Таблиця 6

Експериментальні дані дослідження

№	Водопот реба, л/т	Міцність при стиску, МПа		Міцність зчеплення з основою, МПа		Водопогли нання, %
		7 діб	28 діб	7 діб	28 діб	
1	156	19.83	28	0.95	1.28	0.21
2	139	16.97	23.78	0.82	1.12	0.27
3	181	17.84	24.98	0.88	1.19	0.24
4	164	14.97	20.76	0.74	1.02	0.31
5	151	15.6	20.81	0.80	1.10	0.28
6	137	12.83	16.97	0.68	0.95	0.34
7	176	13.76	18.04	0.72	0.99	0.32
8	159	11.04	13.9	0.60	0.85	0.39
9	161	18.28	25.86	0.90	1.22	0.23
10	156	13.51	17.89	0.70	0.98	0.33
11	145	16.09	22.46	0.84	1.15	0.26
12	171	15.07	21.15	0.78	1.08	0.29
13	166	16.68	23.3	0.86	1.17	0.25
14	149	14.68	20.09	0.76	1.05	0.30
15	158	15.75	22.17	0.82	1.12	0.27
16	157	15.41	21.78	0.79	1.09	0.28
17	159	15.95	22.42	0.83	1.14	0.26

Результатом статистичного аналізу експериментальних даних є рівняння регресії для наступних показників:

водопотреба:

$$ВП = 101,36 + 1,0 \cdot X_1 + 0,4 \cdot X_2 + 4,5 \cdot X_3 + 4,487 \cdot X_1^2 + 3,487 \cdot X_2^2 + 3,987 \cdot X_3^2 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_3;$$

водопотреба:

$$ВП = 101,36 + 1,0 \cdot X_1 + 0,4 \cdot X_2 + 4,5 \cdot X_3 + 4,487 \cdot X_1^2 + 3,487 \cdot X_2^2 + 3,987 \cdot X_3^2 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_3;$$

міцність при стиску, 7діб:

$$R_{cm}^{7діб} = 15,83 + 2,115 \cdot X_1 + 0,864 \cdot X_2 + 1,322 \cdot X_3 + 0,024 \cdot X_1^2 - 0,291 \cdot X_2^2 - 0,191 \cdot X_3^2 + 0,045 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,005 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

міцність при стиску, 28діб:

$$R_{cm}^{28діб} = 22,22 + 3,577 \cdot X_1 + 1,319 \cdot X_2 + 1,963 \cdot X_3 - 0,353 \cdot X_1^2 - 0,423 \cdot X_2^2 - 0,533 \cdot X_3^2 + 0,025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,058 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,038 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

міцність зчеплення з основою, 7діб:

$$R_{зч}^{7діб} = 0,82 + 0,08 \cdot X_1 + 0,04 \cdot X_2 + 0,07 \cdot X_3 - 0,022 \cdot X_1^2 - 0,012 \cdot X_2^2 - 0,012 \cdot X_3^2 - 0,0013 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,001 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

міцність зчеплення з основою, 28діб:

$$R_{зч}^{28діб} = 1,13 + 0,096 \cdot X_1 + 0,047 \cdot X_2 + 0,074 \cdot X_3 - 0,029 \cdot X_1^2 - 0,014 \cdot X_2^2 - 0,019 \cdot X_3^2 - 0,03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,002 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

водопоглинання:

$$W_k = 0,27 - 0,04 \cdot X_1 - 0,019 \cdot X_2 - 0,031 \cdot X_3 + 0,012 \cdot X_1^2 + 0,007 \cdot X_2^2 + 0,007 \cdot X_3^2 + 0,0025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,001 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,003 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

На основі отриманих рівнянь регресії сформували спадаючі ряди впливу факторів на показники:

$$ВП : X_3 > X_1 > X_2;$$

$$R_{ст}^{7діб} : X_1 > X_3 > X_2;$$

$$R_{ст}^{28діб} : X_1 > X_3 > X_2;$$

$$R_{зч}^{7діб} : X_1 > X_3 > X_2;$$

$$R_{зч}^{28діб} : X_1 > X_3 > X_2;$$

$$W_k : X_1 > X_3 > X_2$$

Для ілюстративного відображення отриманих рівнянь та аналізу особливостей впливу нижче наведені графіки залежностей показників властивостей розчинів від факторів складу (рис. 1-6).

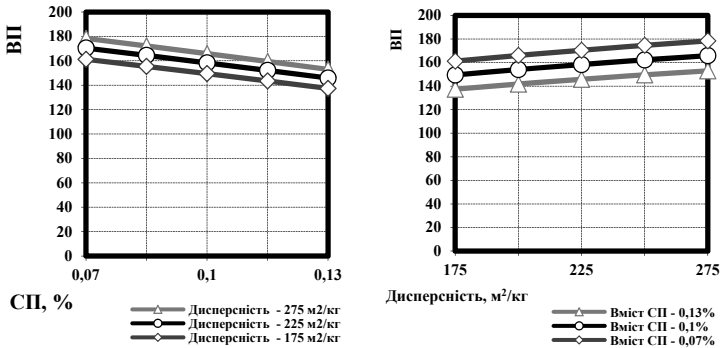


Рис. 1. Графічні залежності водопотреби від факторів складу

Отримані графічні залежності щодо водопотреби (рис. 1) свідчать, що зі збільшенням дисперсності бетонного брухту спостерігається зростання водопотреби розчину незалежно від вихідної міцності ДФББ. Найбільші значення водопотреби характерні для міцності 50 МПа, а найменші — для 37,5 МПа. При підвищенні дисперсності від 175 до 275 м²/кг водопотреба зростає приблизно на 15–17 %, що пояснюється збільшенням питомої поверхні частинок та, відповідно, їх здатності до поглинання води. Отримані результати узгоджуються з експериментально-статистичним аналізом, відповідно до якого найбільший вплив на водопотребу має фактор дисперсності, дещо менший міцності тоді як найменший вплив має суперпластифікатор. Це свідчить, що при оптимізації складу будівельних розчинів необхідно враховувати насамперед вплив фактора, пов'язаного з характеристиками дисперсної фракції, який визначає зміну реологічних властивостей суміші.

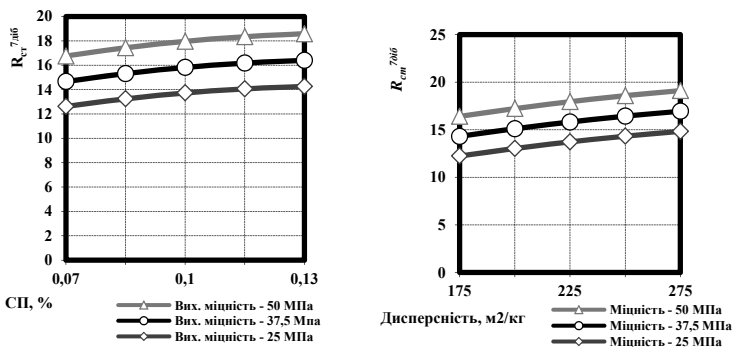


Рис. 2. Графічні залежності міцності при стиску на 7-му добу від факторів складу

Аналіз графічних залежностей (рис. 2) показує, що зі збільшенням вмісту суперпластифікатора від 0,07 до 0,13 % спостерігається поступове зростання

міцності при стиску розчину у віці 7 діб. Найбільші значення міцності характерні для складів із дисперсністю бетонного брухту $275 \text{ м}^2/\text{кг}$, дещо менші — для $225 \text{ м}^2/\text{кг}$, а найменші — для $175 \text{ м}^2/\text{кг}$. Підвищення дисперсності добавки сприяє більш активній взаємодії частинок із цементним каменем та покращенню структури матеріалу, що позитивно впливає на формування ранньої міцності.

Загалом збільшення дозування суперпластифікатора забезпечує покращення ущільнення структури розчину та зниження ефективного водоцементного відношення, що також сприяє підвищенню міцності. Отримані результати узгоджуються з аналізом регресійної моделі, відповідно до якої найбільший вплив має фактор міцності, а найменший — вміст суперпластифікатора.

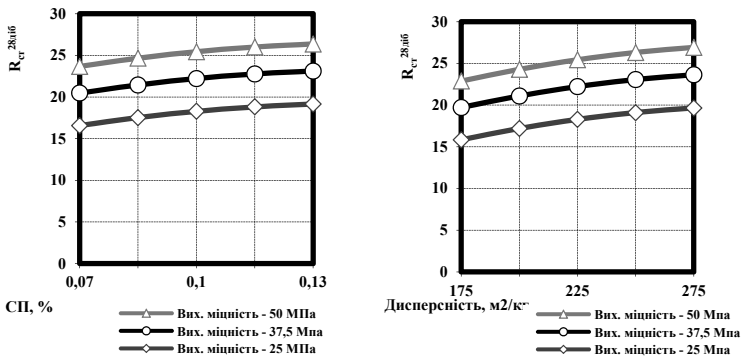


Рис. 3. Графічні залежності міцності при стиску на 28-му добу від факторів складу

Аналіз графічних залежностей міцності при стиску на 28-му добу (рис. 3) демонструє стійкий позитивний вплив факторів на формування міцності розчину: збільшення вмісту суперпластифікатора від 0,07 до 0,13% забезпечує поступове зростання міцності для всіх рівнів вихідної міцності ДФББ, що пояснюється зниженням ефективного водоцементного відношення та покращенням ущільнення структури матриці.

Залежність від дисперсності ДФББ має виражений параболічний характер з оптимумом у діапазоні $225\text{--}250 \text{ м}^2/\text{кг}$, після якого подальше подрібнення призводить до незначного зниження міцності внаслідок зростання водопотреби суміші; при цьому обидва графіки чітко підтверджують домінуючу роль вихідної міцності ДФББ як ключового фактора — різниця між кривими для 50 МПа та 25 МПа сягає 13–15 МПа незалежно від рівня СП чи дисперсності, що повністю узгоджується з рівнянням регресії, і підтверджує доцільність використання ДФББ з вищою вихідною міцністю та оптимальним рівнем дисперсності для досягнення максимальних показників розчину для мурування.

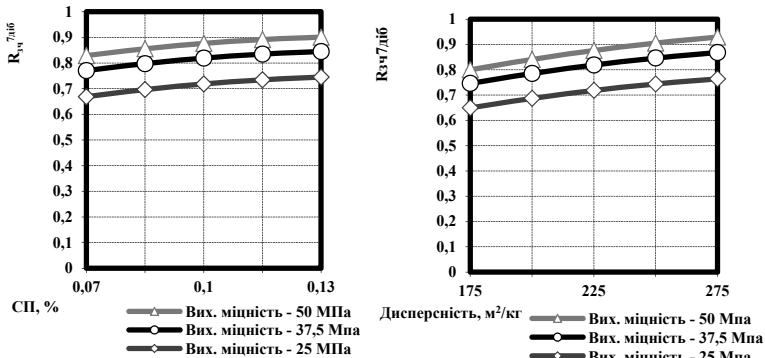


Рис. 4. Графічні залежності міцності зчеплення на 7-му добу від факторів складу

Графічні залежності міцності зчеплення на 7-му добу демонструють зростаючий характер кривих зі збільшенням як вмісту суперпластифікатора (від 0,07 до 0,13%), так і дисперсності ДФББ (від 175 до 275 m^2/kg), при цьому найвище значення 0,95 МПа досягається для складів із вихідною міцністю ДФББ 50 МПа, що підтверджує домінуючу роль фактора міцності у формуванні ранньої адгезії; розрив між кривими для 50 МПа та 25 МПа становить близько 0,15–0,20 МПа і залишається стабільним по всьому діапазону варіювання факторів, що вказує на відсутність суттєвої взаємодії між ними на ранніх стадіях твердіння.

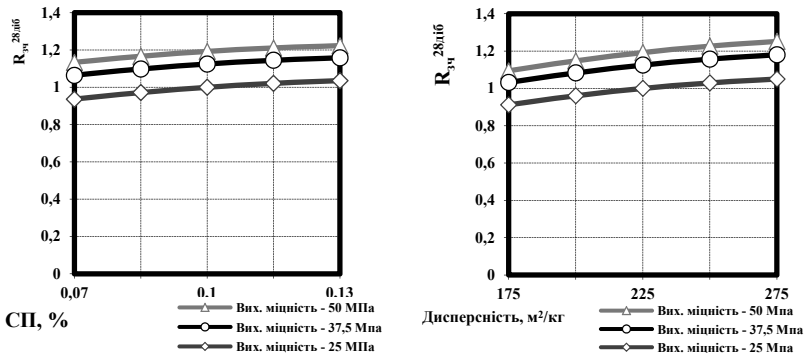


Рис. 5. Графічні залежності міцності зчеплення на 28-му добу від факторів складу

Аналіз графіків міцності зчеплення на 28-му добу свідчить виражену зміну порівняно з 7-добовим віком: максимальне значення $R_{зч}^{28дiб} = 1,28$ МПа досягається при вихідній міцності ДФББ 50 МПа, тоді як мінімальне — 0,85 МПа при 25 МПа, причому залежність від дисперсності набуває слабо

параболічного характеру з оптимумом близько 225–250 м²/кг, що пов'язано з більш повним розвитком пуццоланових реакцій за рахунок «сплячого» цементу у складі ДФББ та формуванням щільнішої структури розчину в умовах тривалого твердіння.

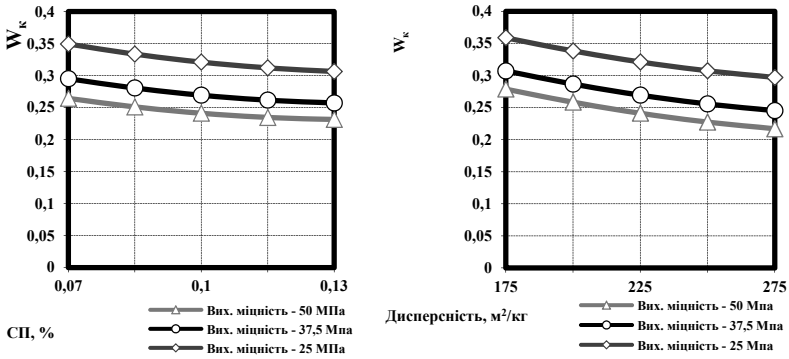


Рис. 6. Графічні залежності водопоглинання від факторів складу

Графічні залежності водопоглинання мають характер, зворотний до міцнісних показників: зі збільшенням вмісту суперпластифікатора та дисперсності ДФББ водопоглинання знижується, досягаючи мінімального значення $W_k = 0,21\%$ при вихідній міцності 50 МПа, тоді як максимальне — 0,39% — спостерігається при 25 МПа та мінімальних значеннях обох факторів; залежність від дисперсності має параболічний характер з мінімумом у зоні 225–250 м²/кг, після якого подальше подрібнення дещо підвищує водопоглинання внаслідок зростання загальної пористості структури, що цілком узгоджується з рівнянням регресії, де від'ємні лінійні коефіцієнти при X_1 , X_2 та X_3 підтверджують загальну тенденцію до зниження водопоглинання зі зростанням усіх трьох факторів у межах дослідженого діапазону.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили доцільність та ефективність використання дисперсної фракції бетонного брухту як часткового заміника цементу (18% за масою) у складі розчинів для мурування. Встановлено, що раціональний підбір характеристик ДФББ — зокрема вихідної міцності на рівні 50 МПа та дисперсності в діапазоні 225–250 м²/кг у поєднанні з оптимальним вмістом суперпластифікатора 0,13% — дозволяє досягти необхідної міцності при стиску, міцності зчеплення з основою та водопоглинання, що відповідає вимогам до розчинів для мурування загальнобудівельного призначення.

Математичні моделі, отримані на основі плану В₃, адекватно описують вплив досліджуваних факторів і можуть бути використані для цілеспрямованої оптимізації складу сумішей у виробничих умовах.

З екологічної точки зору, залучення бетонного брухту до складу будівельних матеріалів як активної мінеральної добавки є перспективним напрямом зниження техногенного навантаження на довкілля, скорочення обсягів будівельних відходів та зменшення питомих витрат цементу — одного з найбільш енергоємних і вуглецевомістких будівельних матеріалів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з вивченням активації ДФББ, різних рівнів дозувань та сумісність з іншими матеріалами, дослідженням синергійного ефекту спільного використання ДФББ та золи-виносу в різних співвідношеннях, а також оцінкою довговічності та морозостійкості розчинів із ДФББ в умовах циклічних кліматичних впливів, що є необхідною умовою для широкого практичного впровадження даного матеріалу у виробництво сухих будівельних сумішей.

1. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Пушкарьова К. К., Кочевих М. О., Мохорт М. А. Використання техногенних продуктів у будівництві. Рівне: НУВГП, 2009. 340 с.

Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Pushkarova K. K., Kochevykh M. O., Mokhort M. A. Vykorystannia tekhnohennykh produktiv u budivnytstvi. Rivne: NUVHP, 2009. 340 s.

2. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В. Ефективні сухі будівельні суміші та розчини на їх основі: монографія. Київ: Каравела, 2024. 348с.

Dvorkin L.Y., Zhytkovskyi V.V., Marchuk V.V. Efektyvni sukhi budivelni sumishi ta rozchyny na yikh osnovi: monohrafiia. Kyiv: Karavela, 2024. 348s.

3. Дворкін Л. Й. Бетони нового покоління / Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко, В. В. Марчук, Ю. О. Рубцова. НУВГП. 2021. 317 с.

Dvorkin L. Y. Betony novoho pokolinnia / L. Y. Dvorkin, V. V. Zhytkovskyi, O. M. Bordiuzhenko, V. V. Marchuk, Yu. O. Rubtsova. NUVHP. 2021. 317 s.

4. ДСТУ EN 1015-11:2022 «Методи випробування розчину для кладки. Частина 11. Визначення міцності на згин і стиск затверділого розчину» (EN 1015-11:2019, IDT).

5. ДСТУ EN 1015-18:2022 «Методи випробування розчину для кладки. Частина 18. Визначення коефіцієнта водопоглинання за рахунок капілярної дії затверділого розчину» (EN 1015-18:2002, IDT).

6. Дворкін Л.Й. Добавки у бетонах та розчинах: навчальний посібник. Київ: Каравела, 2025. 205с.

Dvorkin L.Y. Dobavky u betonakh ta rozchynakh: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Karavela, 2025. 205s.

7. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини : підручник. К. : ТОВ УВПК «ЕксОб», К. : КНУБА, 2003. 472 с.

Hots V. I. Betony i budivelni rozchyny : pidruchnyk. K. : TOV UVPK «EksOb», K. : KNUBA, 2003. 472 s.

8. Zhou W.J.; Ji Z.Y.; Zhao L.; He G.X. Basic Performance of Construction Waste Recycled Powder and Its Influence on Properties of Cement Mortar. China Concr. Cem. Prod. 2019, 3, 93–96.

9. Ortega J.M.; Letelier V.; Solas C.; Moriconi G.; Climent M.; Sánchez I. Long-Term Effects of Waste Brick Powder Addition in the Microstructure and Service Properties of Mortars. Constr. Build. Mater. 2018, 182, 691–702.

10. Liu Y.; Lu C.; Zhang H.Q.; Li J.P. Experimental Research on Cementitious Property of Renewable Powders of Construction Waste. China Powder Sci. Technolo. 2015, 21, 33–36.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	13.03.2026	Received	13.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	18.03.2026	Received in revised form	18.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.