

ПРЕСОВАНИ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНОГО БЕТОННОГО БРУХТУ

PRESSED MATERIALS BASED ON WASTE CONCRETE POWDER

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Макаренко Р.М., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4839-9623, Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Степанець О.В., аспірант, ORCID: 0009-0000-7033-3781 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Dvorkin Leonid, Doctor of Engineering, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Makarenko Ruslan, Ph.D., professor, ORCID: 0000-0003-4839-9623, Bordiuzhenko Oleh, Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Stepanets Oleksii, postgraduate, ORCID: 0009-0000-7033-3781 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Наведено результати досліджень властивостей пресованих матеріалів, отриманих із дисперсної частини бетонного брухту. Продемонстровано, що отримані матеріали, мають фізико-механічні характеристики цілком співставні із поширеними стіновими матеріалами типу кераміки.

This study investigates the feasibility of using the fine fraction of crushed concrete waste as a component for producing pressed construction composites. It is assumed that powdered concrete waste can harden under pressure through a mixed mechanism involving contact-crystallization and partial hydration, especially if unhydrated cement particles remain in the material. Four types of concrete waste were tested, differing in age, strength, and cement content. Specimens were pressed at 20 MPa, a pressure commonly used in the production of autoclaved materials.

Results showed that samples made from waste with higher cement content and lower age achieved the highest strength – 13.4 MPa at 28 days – and average density of 1.62 g/cm³. Softening coefficients near 0.9 indicate sufficient water resistance. Strength increased steadily over time, peaking at 7–10 days, confirming active structure formation in pressed conditions.

The curing method had a notable effect. Optimal results were obtained under high humidity (in a desiccator), preventing moisture loss. Air-dry curing was less effective due to rapid drying, while water immersion showed slightly reduced strength, likely from excess water disrupting structural development. A correlation was observed between strength and the mineral composition of the waste, particularly alite and calcium hydroxide content. A pH test of

aqueous extracts is suggested as a rapid screening method to evaluate the suitability of waste concrete for pressing.

The findings confirm the potential of recycled concrete fines in producing pressed composites with properties comparable to those of common ceramic materials.

Ключові слова:

Вторинний бетон, пресовані композити, дисперсний бетонний брукхт, твердсння, будівельні матеріали.

Recycled concrete, pressed composites, waste concrete powder, hardening, construction materials

Вступ. Аналіз досліджень. Унаслідок воєнних дій на території України було знищено або пошкоджено велику кількість об'єктів цивільної та транспортної інфраструктури. Більшість із них не підлягають відновленню та потребують демонтажу, а утворені будівельні відходи, переважно у вигляді бетонного брукхту, мають бути утилізовані. Раціональне повторне використання бетонного брукхту відповідає потребам реалізації програми сталого розвитку та зменшує карбоновий слід [1].

Як відомо, у світовій практиці бетонні відходи здебільшого застосовуються як заміна традиційного природного заповнювача (переважно щебеню, рідше – піску) для виготовлення важкого бетону [1-2]. Такий підхід має суттєве екологічне значення, оскільки сприяє ефективній утилізації великої кількості матеріалів, що утворюються внаслідок демонтажу будівель.

У процесі дроблення бетонного брукхту для отримання щебеню утворюється значна кількість дрібнодисперсних частинок. Зазвичай, ці частинки відокремлюються механічним шляхом за допомогою сит або вловлюються під час роботи аспіраційних систем, осідаючи в циклонах та рукавних фільтрах. Їхня масова частка становить близько 10–20 % від загальної маси брукхту [2]. Дисперсна фракція переважно складається з частково негідратованого цементу, затверділого цементного каменю, а також піску і кам'яного заповнювача. Завдяки вираженому наповнюючому ефекту та певній пуцолановій активності [3, 4], застосування дисперсного бетонного порошку в цементних композиціях є предметом численних наукових досліджень.

Крім того, повторна утилізація бетонних відходів як перероблених заповнювачів була предметом багатьох досліджень, спрямованих на зменшення утворення відходів будівництва та знесення. Дослідження продемонстрували можливість використання крупного переробленого бетонного заповнювача для різних застосувань [5]. Нещодавні дослідження показали можливість успішно виготовляти високоміцні матеріали на основі цементу з використанням дрібного переробленого бетонного заповнювача [6]. Однак під час виробництва перероблених заповнювачів дрібна фракція

(менше 150 мкм), відома як дисперсний бетонний брукхт (Waste Concrete Powder – WCP) або перероблений бетонний порошок (Recycled Concrete Powder - RCP), часто викидається без певної мети. В останні роки було запропоновано використовувати потенціал RCP як додаткового цементуючого матеріалу завдяки його хімічним і фізичним властивостям [7]. Попередні дослідження показують, що RCP демонструє пуцоланові характеристики та наповнювач, що дозволяє йому частково замінити цемент [8]. Крім того, RCP значно зменшує вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з викидами CO₂ і споживанням енергії, порівняно з традиційним цементом [9].

У той час, як WCP або RCP активно вивчається як добавка до цементу чи заповнювач у бетоні, питання його застосування у виробництві пресованих матеріалів виробів залишається недостатньо дослідженим. З огляду на перспективність технологій напівсухого пресування, вивчення властивостей матеріалів на основі дисперсного бетонного брукхту та розробка відповідних рецептур є актуальним науковим завданням, здатним поєднати ресурсозбереження з отриманням якісної будівельної продукції.

Необхідно відзначити, що пресовані композити на основі дисперсного бетонного брукхту за своєю природою є близькими до відомих в будівельній практиці в'язучих та матеріалів контактного твердіння [10], які входять до більш загальної групи геополімерних матеріалів [11]. Геополімерні в'язучі можна віднести до енергоефективних видів мінеральних в'язучих, які одержуються на основі високодисперсних мінеральних продуктів (різних гірських порід та промислових відходів). Твердіння таких матеріалів відбувається у т.зв. "стиснених умовах" (за визначенням М.М.Сичова [12]) при забезпеченні відповідного контакту між частинками внаслідок пресування.

При пресуванні матеріалів на основі WCP виникають передумови до комплексного механізму структуроутворення, який визначається складом бетонного брукхту: гідратаційного твердіння при наявності певного "потенціалу" непрогідратованих частинок цементного каменю, контактного (контактно-конденсаційного) твердіння аморфізованих продуктів гідратації цементу [13] а також до контактно-кристалізаційного, в "стиснених умовах" частинок різної природи, в першу чергу алюмосилікатної складової заповнювачів бетону [10].

Метою даної роботи є вивчення можливості використання порошку бетонного брукхту як компоненту для отримання пресованих композитів, визначення найбільш перспективних видів бетонного брукхту для пресування а також технологічних параметрів їх отримання.

Матеріали та методи досліджень.

Для досліджень використовували дрібну фракцію бетонного брукхту, отриманого при подрібненні важкого бетону різного віку та проектної

міцності. Чотири види бетону виготовлялись на гранітному щебені та кварцовому піску. Зразки бетону подрібнювали у щоківній дробарці і далі відсівали частинки менше 1 мм, а від них, в свою чергу, фракцію менше 0,14 мм, яка обрана для подальших досліджень, як своєрідне "в'яжуче" для пресованих композитів. Для отриманих фракцій визначали зерновий склад бетонного брухту після подрібнення ситовим аналізом, гранулометричний склад дисперсної складової (фракція 0...0,14 мм) за допомогою лазерного гранулометра а також водневий показник рН (табл. 1, рис. 1-3).

Таблиця 1

Характеристики зразків бетонного брухту фракції <0,14 мм

Зразки бетону	Проектний клас	Орієнтовний вік	Міцність при стиску вихідного бетону, МПа	Залишки на ситах, %		рН
				0,045 мм	0,08 мм	
Б1	C40/50	2 міс.	55,4	64,2	49,3	11,7
Б2	C40/50	3 роки	72,1	65,3	48,4	10,2
Б3	C16/20	2 міс.	21,6	62,2	52,3	10,9
Б4	C16/20	3 роки	34,1	61,8	51,2	8,9

Аналіз отриманих даних вказує на переважання в частинках бетонного брухту менше 1 мм фракції 0.14...0.5 мм.. В той же час, вміст фракції <0,14 мм складає від 25 до 32%, причому більші вмісти характерні для зразків бетонів менших класів і, відповідно, меншої міцності (Б3-Б4). Дані гранулометричного аналізу дають в цілому схожу картину для всіх зразків. Вміст фракції менше 0.08 мм складає близько 50%, знову ж таки з незначною перевагою для бетонів меншої міцності.

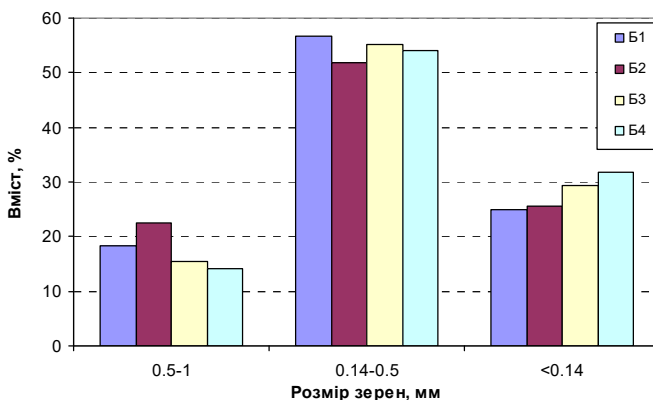


Рис. 1. Дані ситового аналізу частинок бетонного брухту розміром менше 1 мм

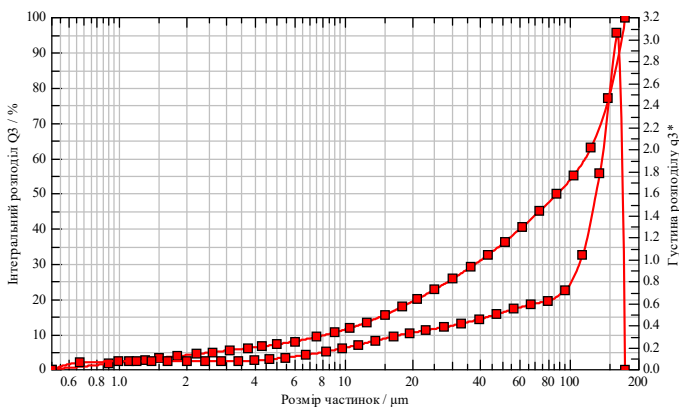


Рис. 2. Дані гранулометричного аналізу частинок бетонного брукху (зразок Б1) розміром менше 0,14 мм

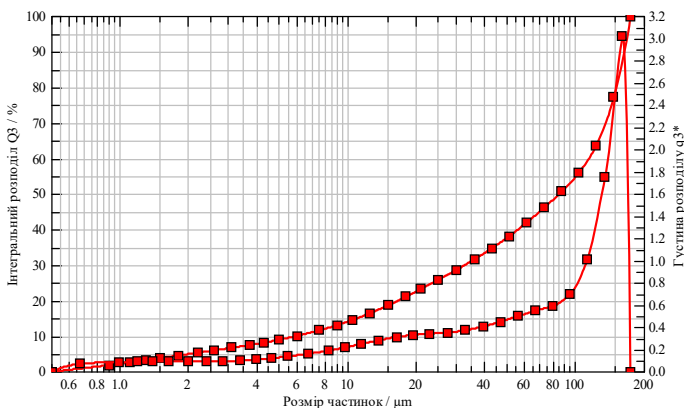


Рис. 3. Дані гранулометричного аналізу частинок бетонного брукху (зразок Б4) розміром менше 0,14 мм

Хіміко-мінералогічний склад дисперсної частини зразків бетонного брукху визначали за допомогою дифрактометричного аналізу (табл. 2).

За результатами аналізу мінералогічного складу зразків бетонного брукху можна відзначити, що зразки з більшою міцністю і, очевидно, більшим вмістом цементу, характеризуються підвищеним вмістом аліту C_3S . Вміст цього клінкерного мінералу для зразка Б1, що твердів 2 місяці складає понад 14%, що майже вдвічі перевищує вміст цього ж мінералу для зразка Б2 аналогічного класу, що твердів 3 роки. Та ж картина спостерігається для зразків бетону Б3-Б4 меншого класу, де для зразка у віці 3 роки вміст непрогідратованого C_3S зменшується майже до нуля, що пояснюється як віком, так і меншою витратою цементу порівняно із зразками Б1-Б2.

Таблиця 2

Дані дифрактометричного аналізу дисперсної фракції зразків бетонного
брухту, %

Зразки бетону	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	SiO ₂
Б1	14.22	6.16	2.54	9.03	1.59	62.2
Б2	7.8	1.79	2.83	7.32	6.63	68.7
Б3	7.25	1.42	3.69	8.76	2.39	72.3
Б4	0.22	3.51	0.27	2.41	4.89	84.4

Варто також відзначити певну закономірність щодо вмісту Ca(OH)₂ і віком бетону та його міцністю (витратою цементу). Як видно з даних табл. 2, зменшення вмісту гідроксиду кальцію відбувається як за рахунок його карбонізації у часі, так і в результаті переходу від бетонів з більшою міцністю до бетонів з меншою міцністю. Також вміст Ca(OH)₂ з табл. 2 досить чітко корелює із рН водних розчинів дисперсної частини зразків бетонного брухту (табл. 1).

Із дисперсної фракції бетонного брухту шляхом пресування (випробувальна машина FP 100/1) виготовляли зразки-циліндри з діаметром і висотою рівними 25 мм. Формувальна вологість залежала від тиску пресування і при 20 МПа складала близько 12-13%. Зразки зберігались у повітряно-сухих умовах, над водою (в ексікаторі) та безпосередньо у воді (за попереднього твердіння на повітрі протягом 1 доби). Визначення міцності, середньої густини та водостійкості проводили за стандартизованими методиками.

Експериментальні результати та їх аналіз. Результати випробувань зразків пресованих композитів із досліджуваних порошків бетонного брухту наведені в табл. 3. Формування зразків здійснювалось при тиску пресування 20 МПа, як цілком прийнятний в технології будівельних матеріалів, зокрема автоклавних силікатних матеріалів.

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільші значення міцності у віці 28 діб твердіння (13,4 МПа) показують зразки із дисперсної частини бетонного брухту Б1. При середній густині 1,62 г/см³ та коефіцієнті розм'якшення 0,92 можна говорити про можливість пресованого штучного каменю, що за характеристиками є близьким до умовно ефективних керамічних виробів.

Отримані результати дозволяють відзначити, що міцність пресованих порошків брухту зменшується у ряду: Б1 > Б3 > Б2 > Б4. Це зменшення достатньо чітко корелює із віком бетону та його реальною міцністю (фактично із початковим вмістом цементу). Тобто можна відзначити, що бетонний брухт із бетонів з меншим віком, більшою міцністю та вмістом

цементу потенційно має кращу здатність до твердіння в умовах пресування за рахунок непрогрідратованих частинок цементного каменю.

Таблиця 3

Властивості пресованих композитів						
Зразки бетону	Міцність при стиску, МПа у віці				Середня густина у висушеному стані, г/см ³	Коефіцієнт розм'якшення (28 діб)
	1 год.	1 доба	7 діб*	28 діб*		
Б1	3.1	4.6	11.5	13.4	1.62	0.92
Б2	2.9	3.8	6.7	8.7	1.59	0.87
Б3	3.2	4.1	8.6	10.2	1.61	0.91
Б4	3	3.5	4.2	5.6	1.56	0.88

*Зразки зберігались над водою.

Зміна значень міцності зразків у часі мають стійку тенденцію до зростання, що безперечно свідчить про протікання структуроутворюючих процесів. Кінетика зміни міцності є подібною для зразків усіх чотирьох видів брукху (рис. 4) із піком наростання міцності у 7-10 діб. В подальшому ріст продовжується з меншою інтенсивністю.

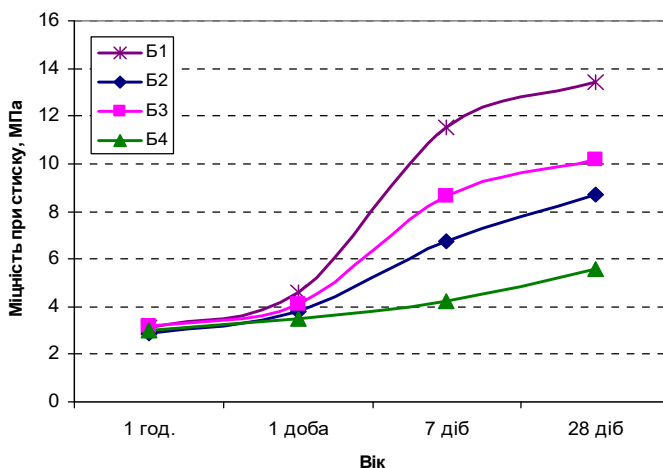


Рис. 4. Кінетика зміни міцності пресованих зразків у часі

Середня густина визначається переважно тиском пресування та гранулометричним складом дисперсної частини бетонного брукху. Як видно з даних табл. 3, при постійному тиску пресування середня густина зразків змінювалась незначно і складала близько 1,6 г/см³.

Значення коефіцієнтів розм'якшення для всіх зразків бетонного брукху (близько 0,9) дозволяють стверджувати про достатньо високу водостійкість отриманих матеріалів.

Досліджували також умови твердіння зразків. Зразки після пресування зберігались у повітряно-сухих умовах, над водою (в ексикаторі) та безпосередньо занурені у воду (після попереднього твердіння на повітрі протягом 1 доби). Як показують результати досліджень (рис. 5) повітряно-сухе твердіння не є оптимальним.

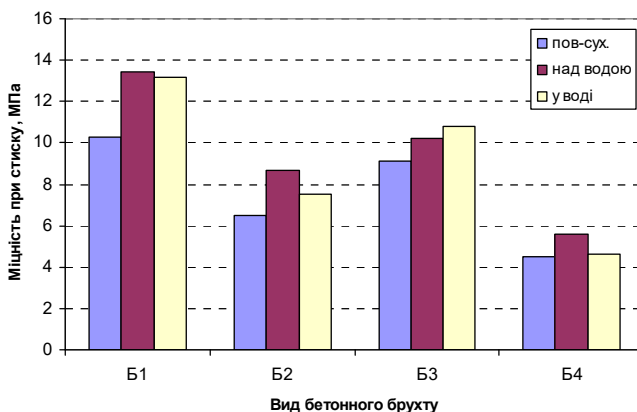


Рис. 5. Вплив умов твердіння на міцність пресованих композитів

Очевидно, внаслідок достатньо високої пористості зразків, яка може досягати 25...30%, відбувається порівняно швидке висихання композитів при низькій відносній вологості повітря, що спричиняє нестачу води для протікання структуроутворюючих процесів. Найкращі результати по міцності отримані при зберіганні зразків у ексикаторі при відносній вологості повітря близькій до 100%. Такі умови унеможливили випаровування вологи із зразків. Дещо гірші результати показали водні умови твердіння. Можна вважати, що надмірна кількість води в матеріалі, як і її нестача є шкідливими для процесів формування структури, припускаючи змішаний механізм структуроутворення пресованих композитів – контактно-кристалізаційний та гідратаційний.

Аналізуючи вищенаведені дані можна помітити певну залежність міцності пресованих матеріалів від вмісту аліту та гідроксиду кальцію у бетоні (табл. 2). Можна припустити, що експрес-аналіз бетонного брухту на потенційну здатність до можливості отримання пресованих матеріалів та виробів можна проводити шляхом визначення вмісту цих сполук, зокрема по рН водного розчину. Однак, подібна гіпотеза потребує підтвердження результатами подальших досліджень, на що, зокрема, вони мають бути спрямовані.

Висновки.

1. Як показують отримані результати, пресування дисперсної частини бетонного брухту дозволяє отримувати зразки із значеннями міцності та середньої густини цілком порівняні із поширеними стіновими матеріалами типу кераміки.

2. Встановлено кінетику зміни міцності у часі пресованих композитів, виготовлених із різних видів бетонного брухту а також досліджено вплив умов твердіння.

3. Проаналізовано вплив факторів складу бетону, з якого отримується бетонний брукт, на міцнісні характеристики пресованих композитів.

Дослідження було виконане за підтримки програми Innovate Ukraine, що реалізується, британським інноваційним агентством, "Інноваційна Україна – підтримка енергетичного відновлення України" у рамках грантового проекту № 10097027 «S3 – Безпечна, стійка та швидка відбудова України» / "S3 – Safe, Sustainable, and Swift Reconstruction of Ukraine".

1. 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. *Applied Sciences*. 2024, 14(21), 9775.

2. Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., Park, D. A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*. 2015, 83, 174-180.

3. Wang, J., Zhang, J., Cao, D., Dang, H., Ding, B. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*. 2020, 234, 117366.

4. Zhang, X., Li, W., Tang, Z., Wang, X., Sheng, D. Sustainable regenerated binding materials (RBM) utilizing industrial solid wastes for soil and aggregate stabilization. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 275, 122991.

5. Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D.. Physical-mechanical assessment to mortars including recycled concrete powder and metakaolin. *Case Studies in Construction Materials*. 2024, 21, e03996.

6. Wu, H., Hu, R., Yang, D., et al. Micro-macro characterizations of mortar containing construction waste fines as replacement of cement and sand: a comparative study, *Constr. Build. Mater.* 2023, 383, 131328.

7. Duchesne, J. Alternative supplementary cementitious materials for sustainable concrete structures: a review on characterization and properties. *Waste and Biomass Valorization*. 2021, 12, 1219-1236.

8. Cantero, B., Bravo, M., de Brito, J., del Bosque, I. F. S., Medina, C. The influence of fly ash on the mechanical performance of cementitious materials produced with recycled cement. *Applied Sciences*. 2022, 12(4), 2257.

9. Wu, H., Liang, C., Xiao, J., Ma, Z. Properties and CO₂-curing enhancement of cement-based materials containing various sources of waste hardened cement paste powder. *Journal of Building Engineering*. 2021, 44, 102677.

10. Dvorkin, L., Bordiuzhenko, O., Makarenko, R.. Contact hardening binders using rock crushing waste. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024, 59(4), 925-934.

11. Davidovits, J. Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers, *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017, 8, 3, 335-350.

12. Dvorkin, L., Zhitkovsky, V., Bordiuzhenko, O., Ribakov, Y. High Performance Concrete Optimal Composition Design. CRC Press. 2023.

13. Runova R., Gots V., Rudenko I., Konstantynovskiy O. The efficiency of plasticizing surfactants in alkali-activated cement mortars and concretes, *EDP Sciences, In MATEC Web of Conferences*, 2018, 230 , 03016.