

УДК 691:628.477.6

БЕЗЦЕМЕНТНІ ТА МАЛОЦЕМЕНТНІ ПРЕСОВАНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНОГО БЕТОННОГО БРУХТУ

CEMENT-FREE AND LOW-CEMENT PRESSED MATERIALS BASED ON DISPERSED CONCRETE WASTE

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

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

Досліджено можливість одержання пресованих безцементних і малоцементних матеріалів на основі дисперсного бетонного брухту. Встановлено раціональні параметри формування й твердіння та показано, що термоактивація і невеликі добавки цементу підвищують міцність і водостійкість.

The scientific and practical task of this study was to assess the possibility of producing pressed cement-free and low-cement materials based on dispersed concrete waste and to determine the technological factors governing their structure formation and properties. The raw material was a fine fraction of crushed concrete debris smaller than 0.14 mm, used as the main solid component for semi-dry pressing. Four systems were studied: untreated dispersed concrete waste, thermally activated waste, and compositions containing 2.5% and 5% Portland cement. The influence of moulding moisture, pressing pressure, and curing conditions on compressive strength, density, and water resistance was evaluated.

The results showed that the properties of the pressed materials are controlled by the combined effect of moisture content, compaction pressure, and curing regime. For the investigated system, rational technological parameters were a moisture content of 12-13%, a pressing pressure of 20 MPa, and air-moist curing. Under these conditions, cement-free and low-cement pressed materials with gradual strength development were obtained. It was established that both thermal activation of dispersed concrete waste at 600 °C and the introduction

of small amounts of Portland cement improved compressive strength and water resistance. The highest performance was achieved for the composition with 5% cement, which reached a compressive strength of 12.8 MPa and a softening coefficient of 0.86 at 28 days. Thermal activation also proved effective, providing a 28-day strength of 11.4 MPa without a substantial increase in cement content. The obtained results confirm the prospects of using dispersed concrete waste as a structurally active component of pressed building composites.

Ключові слова: бетонний брукт, пресування, термоактивація, міцність, водостійкість, твердіння.

Concrete waste, pressing, thermoactivation, strength, water resistance, curing.

Вступ. Аналіз досліджень. Екологічний вплив виробництва цементу та зростання обсягів відходів будівництва і демонтажу зумовили підвищений інтерес до використання вторинних мінеральних компонентів у будівельних матеріалах. У сучасній практиці бетонні відходи переважно використовують як заміну природним заповнювачам, тоді як у процесі їх переробки також утворюється тонкодисперсна фракція. У цій роботі її далі позначено як дисперсний бетонний брукт (ДББ); у міжнародній літературі для її опису зазвичай використовують терміни *recycled concrete powder* (RCP) або *waste concrete powder* [1, 2]. Попри значний потенціал як вторинної сировини, ця фракція поки що використовується істотно менше. ДББ привертає увагу тим, що може сприяти зниженню вуглецевого сліду цементовмісних матеріалів і, завдяки своїм фізичним та хімічним характеристикам, здатен виконувати не лише роль мікронаповнювача, а й структурно активного компонента [2, 3].

У цементних системах дія ДББ пов'язана як із фізичними, так і з хімічними механізмами. Він може містити негідратовані частинки цементу та реакційноздатні оксиди, здатні брати участь у вторинній гідратації або реакціях пуцоланового типу, тоді як його тонкі частинки підвищують щільність упаковки та створюють центри кристалізації для продуктів гідратації. Саме тому в багатьох дослідженнях ДББ розглядають як додатковий цементуючий матеріал або частковий замітник цементу, хоча ефективність такого використання залежить від дисперсності, хімічного складу та рівня заміщення [4].

Водночас застосування ДББ у пресованих матеріалах залишається недостатньо вивченим. В роботі [5] показано, що подрібнені та мелені бетонні відходи можуть бути ущільнені у будівельні матеріали, а наявні результати свідчать про те, що розмір частинок може відігравати вирішальну роль у формуванні міцності. З позицій матеріалознавства пресовані композити на основі ДББ споріднені із системами контактного твердіння [6], у яких пресування забезпечує тісний міжчастинковий контакт і створює умови для складного структурування.

У таких системах твердіння може відбуватися внаслідок поєднання кількох механізмів, зокрема гідратації залишкових негідратованих частинок цементу, контактено-конденсаційного твердіння аморфізованих продуктів гідратації, а також контактено-кристалізаційних взаємодій між мінеральними частинками різної природи [6, 7]. Тому ДББ слід розглядати не просто як ущільнюване зернисте середовище, а як матеріал, здатний формувати штучний камінь під сумісною дією тиску, вологи та режиму твердіння.

З огляду на потенціал технологій напівсухого пресування, дослідження матеріалів на основі ДББ і розроблення відповідних складів сумішей становлять актуальне наукове завдання, що поєднує ресурсозбереження з одержанням якісної будівельної продукції.

Метою цього дослідження є вивчення можливості використання ДББ як компонента для виробництва пресованих композитів, дослідження впливу технологічних факторів на властивості матеріалу та визначення оптимальних параметрів формування і твердіння.

Матеріали та методи досліджень. Для досліджень використовували дисперсний бетонний брухт (ДББ), одержаний з уламкового бетонного матеріалу, відібраного на майданчиках накопичення будівельного брухту в Київській області. За даними попередніх досліджень, вихідний бетон мав орієнтовний вік 30–40 років і за міцністю відповідав класу С20/25. Він був виготовлений на портландцементі з використанням кварцового піску як дрібного заповнювача та гранітного щебеню як крупного заповнювача. Хімічний і мінералогічний склад вихідного дисперсного бетонного брухту наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний і мінералогічний склад дисперсного бетонного брухту

Хімічний склад, мас. %	Значення	Мінералогічний склад, %	Значення
CaO	13,2	Кварц	43,3
SiO ₂	75,5	Польові шпати	15,5
Al ₂ O ₃	6,28	Кальцит	10,9
Fe ₂ O ₃	3,56	C ₃ S	0,86
MgO	0,61	C ₂ S	2,09
		Гідратні продукти цементу	28,3

Бетонний брухт подрібнювали у шоківій дробарці, після чого відбирали частинки розміром менше 1 мм, а з них виділяли дисперсну фракцію менше 0,14 мм, яку використовували як основну тверду сировинну основу для

формування пресованих матеріалів. Гранулометричний склад цієї фракції наведено на рис. 1.

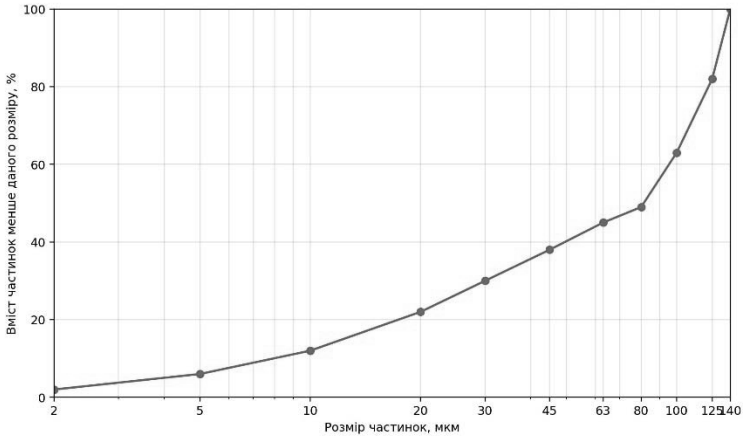


Рис. 1. Гранулометричний склад фракції ДББ (<0,14 мм)
Хімічний і мінералогічний склад вихідного ДББ наведений в табл. 1

У роботі досліджували чотири варіанти матеріалів на основі ДББ: вихідний дисперсний бетонний брукт без додаткової обробки (ДББ), дисперсний бетонний брукт після термоактивації при 600 °С (ДББТ), а також ДББ з добавкою 2,5 і 5 % портландцементу (відповідно ДББ2.5 і ДББ5). Термоактивацію здійснювали нагріванням ДББ до 600 °С з витримкою при цій температурі протягом 2 год. Для отримання матеріалів ДББ2.5 і ДББ5 до вихідного порошку додавали відповідно 2,5 і 5 % портландцементу від маси твердої складової з подальшим ретельним перемішуванням до досягнення однорідності.

Із дисперсної фракції бетонного брукту шляхом пресування на випробувальній машині FP 100/1 виготовляли зразки-циліндри діаметром 25 мм і висотою 25 мм. Формувальна вологість залежала від тиску пресування і при 20 МПа становила близько 12–13 %. Для вивчення впливу умов твердіння зразки зберігали у повітряно-сухих умовах, в ексікаторі над водою та безпосередньо у воді після попереднього твердіння на повітрі протягом 1 доби. Основні порівняльні випробування матеріалів ДББ, ДББТ, ДББ2.5 і ДББ5 проводили на зразках, що твердили в повітряно-вологих умовах за температури 20 ± 2 °С і відносної вологості повітря близько 100 %.

У віці 3, 7 і 28 діб визначали міцність при стиску, середню густину та коефіцієнт розм'якшення. Визначення міцності, середньої густини та водостійкості проводили за стандартними методиками. Коефіцієнт розм'якшення визначали як відношення міцності водонасичених зразків до міцності відповідних зразків у сухому стані..

Експериментальні результати та їх аналіз. При пресуванні дисперсних мінеральних порошоків вологість є одним із головних параметрів формування структури. Невелика кількість води зменшує міжчастинкове тертя, полегшує перегрупування зерен під час ущільнення і сприяє досягненню вищої щільності сирцю. Водночас надлишок води при пресуванні та подальшому твердінні зумовлює формування додаткового порового простору, що після висихання або перерозподілу вологи проявляється зниженням міцності. Тому для таких систем характерна оптимальна вологість, за якої при певному тиску пресування досягаються найвищі щільність і міцність. У літературі цю залежність розглядають як аналог *compaction curve* [8], причому положення максимуму може зміщуватися зі зростанням тиску або енергії ущільнення. Відомо також [9, 10], що властивості компактованого тіла залежать не лише від тиску, а й від гранулометрії, міжчастинкового тертя та початкової структури засипки.

На першому етапі встановлювали оптимальні параметри формування пресованих зразків із ДББ, зокрема оптимальну вологість порошку за різних тисків пресування. Отримані результати (рис. 2) мають чітко виражений

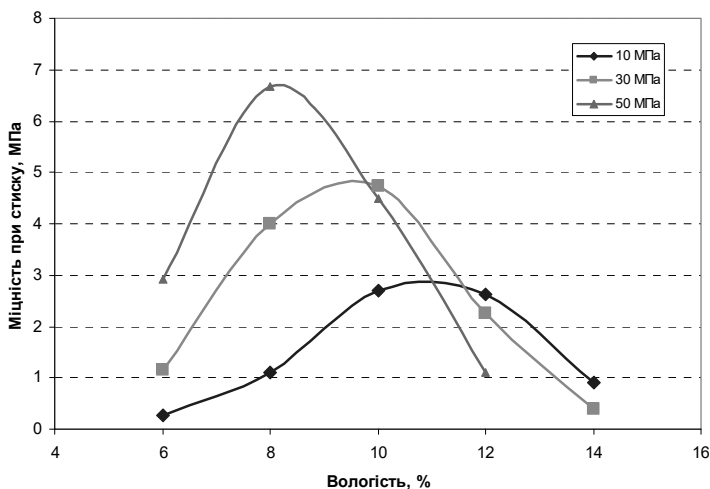


Рис. 2. Вплив абсолютної вологості порошку на міцність пресованих композитів

екстремальний характер: для кожного значення тиску міцність при стиску у віці 7 діб зростає зі збільшенням вологості до певного максимуму, а далі знижується. При тиску 10 МПа найвищі значення міцності досягаються в області 10–12 % вологості, при 30 МПа максимум зміщується приблизно до 10

%, а при 50 МПа — до близько 8 %. Одночасно зі зростанням тиску пресування від 10 до 50 МПа істотно підвищується максимальний рівень міцності. Це свідчить про те, що підвищення тиску частково компенсує недостатню зволоженість системи за рахунок інтенсивнішого зближення та переупакування частинок, унаслідок чого оптимальна вологість зміщується в бік нижчих значень. За надлишкової вологості, особливо при високих тисках, вода вже не покращує ущільнення, а, навпаки, сприяє збереженню пористості та послабленню контактів між частинками після твердіння.

Результати, наведені на рис. 3, свідчать, що зі збільшенням тиску пресування від 10 до 50 МПа міцність при стиску та середня густина пресованих матеріалів із чистого ДББ зростають, причому між цими показниками простежується чітка кореляція. Це підтверджує, що підвищення міцності в даному випадку значною мірою зумовлене ущільненням структури і покращенням міжчастинкових контактів. Водночас характер кривих на рис. 3а і залежність, наведена на рис. 3б, показують, що після області 20 МПа ефективність подальшого підвищення тиску зменшується: приріст міцності на кожні наступні 10 МПа стає дедалі меншим. Таким чином, тиск 20 МПа можна вважати раціональним для подальших досліджень, оскільки він забезпечує достатній рівень ущільнення і міцності без потреби в надмірному підвищенні тиску, що супроводжується зростанням енерговитрат і вимог до пресового обладнання.

Було також проаналізовано три режими твердіння: повітряно-сухий, повітряно-вологий та твердіння у воді. Зразки після пресування зберігали в повітряно-сухих умовах, в ексікаторі над водою та безпосередньо у воді після попереднього твердіння на повітрі протягом 1 доби.

Результати, наведені на рис. 4, показують, що умови твердіння суттєво впливають на формування міцності пресованих матеріалів із чистого ДББ. Повітряно-сухий режим забезпечує порівняно високі показники у ранньому віці, однак у подальшому приріст міцності за цих умов істотно сповільнюється через нестачу вологи для розвитку структуроутворювальних процесів. Твердіння у воді також не є оптимальним, оскільки надлишкове водонасичення не сприяє формуванню щільної структури та ефективних міжчастинкових контактів. Найбільш сприятливими виявилися повітряно-вологі умови, за яких забезпечується найбільш стабільне і тривале наростання міцності. Це дає підстави прийняти саме повітряно-вологий режим як основний для твердіння пресованих матеріалів.

Таким чином, на підставі проведених досліджень для подальшого вивчення пресованих матеріалів на основі дисперсного бетонного брукхту було прийнято раціональні параметри формування і твердіння, а саме: оптимальну вологість суміші, тиск пресування 20 МПа та повітряно-вологі умови твердіння. За цих параметрів на наступному етапі було виконано порівняльну оцінку властивостей матеріалів на основі чистого ДББ, термоактивованого ДББТ, а

також малоцементних систем ДББ2.5 і ДББ5 з метою встановлення впливу складу на міцність, середню густину, водостійкість і характер зміни цих показників у часі.

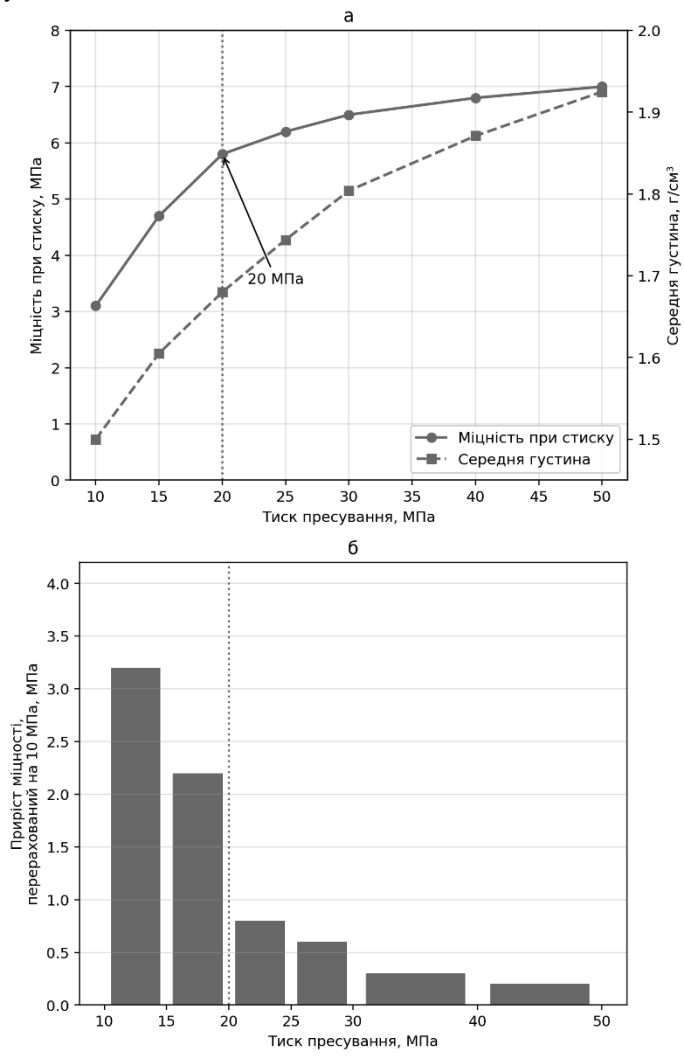


Рис. 3. Вплив тиску пресування на властивості пресованих матеріалів із чистого ДББ: а – залежність міцності при стиску та середньої густини від тиску пресування; б – зміна приросту міцності зі зростанням тиску пресування

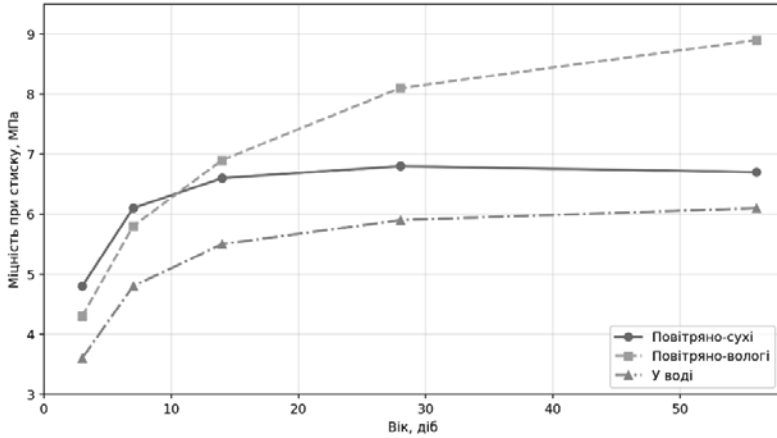


Рис. 4. Вплив умов твердіння на міцність пресованих матеріалів із ДББ

Дані табл. 2 і рис. 5 показують, що всі досліджені способи модифікації ДББ позитивно впливають на властивості пресованих матеріалів, однак характер цього впливу є різним. Для всіх систем спостерігається зростання міцності в часі, але найменш інтенсивно воно відбувається для чистого ДББ, що вказує на обмежений власний реакційний потенціал неактивованого бетонного брухту. Введення цементу, навпаки, забезпечує підвищення міцності вже на ранніх стадіях твердіння, причому найбільші значення в усі строки має система ДББ5. Це свідчить про те, що саме 5 %-ва цементна добавка найбільш ефективно покращує формування структури матеріалу.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості пресованих матеріалів на основі ДББ у різному віці твердіння

Матеріал	Значення показників у віці (дб)								
	Міцність при стиску, МПа			Середня густина, г/см ³			Коефіцієнт розм'якшення		
	3	7	28	3	7	28	3	7	28
ДББ	4.3	5.1	6.9	1.64	1.66	1.69	0.50	0.54	0.61
ДББТ	4.6	6.8	11.4	1.63	1.67	1.71	0.52	0.60	0.74
ДББ2.5	5.4	7.8	10.6	1.66	1.70	1.74	0.61	0.72	0.80
ДББ5	6.5	9.4	12.8	1.68	1.72	1.76	0.69	0.78	0.86

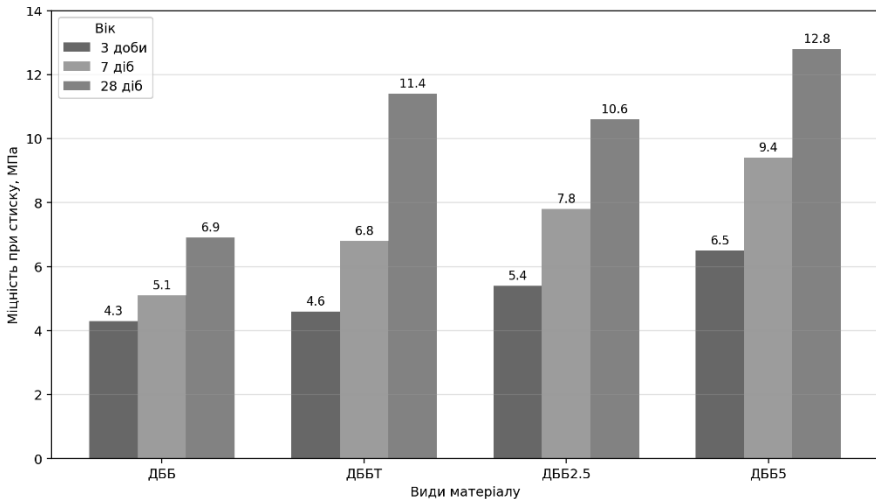


Рис. 5. Міцність пресованих матеріалів на основі ДББ у різному віці твердіння

Термоактивований матеріал ДББТ характеризується іншим типом кінетики: у ранньому віці його міцність лише незначно перевищує міцність чистого ДББ, однак у 28 діб вона досягає 11,4 МПа і перевищує відповідний показник для ДББ2.5. Отже, термоактивація забезпечує не стільки високий початковий ефект, скільки більш інтенсивний приріст міцності в середньому та пізнішому віці. Це дає підстави вважати, що в даному випадку підвищення міцності пов'язане не лише з ущільненням, а й зі зростанням реакційної здатності системи.

Середня густина, згідно з табл. 2, зростає для всіх матеріалів, але зміни цього показника є значно меншими, ніж зміни міцності. Це означає, що підвищення міцності визначається не тільки зростанням щільності упаковки частинок, а й якісними змінами в структурі контактів та розвитком новоутворень. Особливо показовим є ДББТ, який за густини, близької до ДББ2.5, забезпечує вищу міцність у 28-добовому віці.

Коефіцієнт розм'якшення для всіх матеріалів з віком зростає, причому за водостійкістю вони розташовуються в ряду: ДББ < ДББТ < ДББ2.5 < ДББ5. Найнижчі значення коефіцієнта розм'якшення має чистий ДББ, тоді як введення цементу забезпечує найбільш виражене підвищення водостійкості. Термоактивація також покращує цей показник, але її вплив у цьому відношенні поступається малоцементним системам.

Таким чином, результати табл. 2 і рис. 5 свідчать, що найкращі фізико-механічні властивості має система ДББ5, тоді як ДББТ можна розглядати як ефективний спосіб підвищення міцності без істотного введення цементу.

Висновки.

1. Підтверджено можливість одержання пресованих безцементних і малощементних матеріалів на основі дисперсного бетонного брухту, який у таких системах проявляє не лише наповнювальну, а й структуроутворювальну дію.

2. Встановлено, що формування властивостей досліджених матеріалів визначається сукупним впливом формувальної вологості, тиску пресування та режиму твердіння; раціональними параметрами є вологість 12–13 %, тиск пресування 20 МПа та повітряно-вологе твердіння.

3. Показано, що термоактивація ДББ і введення невеликих кількостей порландцементу забезпечують підвищення міцності та водостійкості пресованих матеріалів; найвищі показники встановлено для системи ДББ5, тоді як термоактивація є ефективним способом підвищення міцності без істотного збільшення вмісту цементу.

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. Rocha J. H., Toledo Filho R. D. The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: a systematic literature review // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. Article 107319.

2. 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. Vol. 14, № 21. Article 9775.

3. Duchesne J. Alternative supplementary cementitious materials for sustainable concrete structures: a review on characterization and properties // *Waste and Biomass Valorization*. 2021. Vol. 12. P. 1219–1236.

4. Zajac M., Skocek J., Gołek Ł., Deja J. Supplementary cementitious materials based on recycled concrete paste // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 387. Article 135743.

5. Sakai Y., Tarekegne B. T., Kishi T. Recycling of hardened cementitious material by pressure and control of volumetric change // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2016. Vol. 14, № 2. P. 47–54.

6. Dvorkin L., Bordiuzhenko O., Makarenko R. Contact hardening binders using rock crushing waste // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024. Vol. 59, № 4. P. 925–934.

7. Runova R., Gots V., Rudenko I., Konstantynovskiy O. The efficiency of plasticizing surfactants in alkali-activated cement mortars and concretes // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. Article 03016.

8. Niesz D. E. A review of ceramic powder compaction // *KONA Powder and Particle Journal*. 1996. Vol. 14. P. 44–51.

9. Oberacker R. Powder compaction by dry pressing // *Ceramics Science and Technology*. Vol. 3: Synthesis and Processing / eds. R. Riedel, I.-W. Chen. Weinheim : Wiley-VCH, 2012. P. 1–37.

10. Cabisco R., Shi H., Wunsch I., Magnanimo V., Finke J. H., Luding S., Kwade A. Effect of particle size on powder compaction and tablet strength using limestone // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31, № 3. P. 1280–1289.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	23.03.2026	Received	23.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	27.03.2026	Received in revised form	27.03.2026
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.