

Олександр КОВАЛЬЧУК¹,
канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
ORCID: 0000-0001-6337-0488
Вікторія ЗОЗУЛИНЕЦЬ^{1,2},
PhD, молод. наук. співроб.
ORCID: 0000-0002-8066-2033
Василь ІВАНІЧКО³,
старший офіцер відділу дослідження
інженерної підтримки
ORCID: 0000-0002-4384-6490
Руслан КОПОТУН¹,
аспірант
ORCID: 0009-0007-2948-8977

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

²Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів, м. Київ

³Військова частина А4983, смт. Коцюбинське

ВИКОРИСТАННЯ РЕЦИРКУЛЬОВАНИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ – ШЛЯХ ДО СТІЙКОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Питання масового використання рециркульованого заповнювача на основі перероблених зруйнованих бетонних конструкцій постає гостро з різних точок зору: з точки зору необхідності утилізації великотоннажних відходів як результату ведення бойових дій, з огляду на необхідність масової відбудови і потреби у залучення величезної кількості сировини для цього, а також з точки зору економіки, екології та раціонального природокористування.

Водночас, такі техногенні рециркульовані продукти можуть мати високу дефектність структури за рахунок їх походження та потребують ретельного пропрацювання технології їх використання. Особливістю українського досвіду їх використання стане потенційна наявність залишків органічних речовин та продуктів горіння як результатів ведення військових дій, що значно ускладнює розвиток структуроутворення бетонів на основі такого матеріалу. Потенційними методами зменшення дефектності структури бетону є введення модифікуючих добавок, що сприяють самозаліковуванню елементів структури бетону, а також використання альтернативних цементів, що здатні витримувати підвищені коливання структури, що утворюються внаслідок наявності органічних домішок. Крім того, використання альтернативних цементів також дозволить розширити сировинну базу для відбудови України, оскільки наявного ресурсу навіть у перспективні 20 млн тон цементу буде недостатньо.

Реалізація результатів даного дослідження дозволить не тільки вирішити питання утилізації великотоннажних промислових відходів, а й значно наростити темпи будівництва та відновлення інфраструктури, пошкодженого і зруйнованого житлового фонду за рахунок отримання великого сировинного ресурсу у вигляді вторинного рециркульованого заповнювача як місцевої сировини. Також вдасться розширити застосування лужних в'язучих речовин у

будівельному виробництві та збільшити використання техногенних відходів, представлених бетонними будівлями і спорудами, що потребують негайної та повної утилізації.

За результатами роботи буде розроблено рецептури бетонних сумішей з використанням рециркульованих заповнювачів та методологічні основи регулювання процесів самозаліковування структури такого матеріалу.

Ключові слова: *рециркульовані заповнювачі, стійкий розвиток, бетони, відновлення, цемент.*

Вступ. Актуальність проведення досліджень підтверджується значним світовим науковим інтересом та наявністю пілотних проєктів даного напрямку в Україні. Водночас, існуючі роботи не враховують досвід в галузі розробки лужних цементів і бетонів, а також матеріалів, що мають здатність до самозаліковування структури. Крім того, не враховується питання можливої наявності залишків органічних матеріалів та продуктів горіння, що утворились внаслідок ведення бойових дій.

Реалізація проєкту виготовлення бетонів на основі рециркульованих конструкцій дозволить підвищити ефективність використання таких матеріалів для будівництва та відновлення промислових комплексів хімічної, оборонної, сільськогосподарської та харчової галузей економіки, а також при спорудженні інфраструктурних та спеціальних об'єктів.

Пріоритетність робіт в цьому напрямку підтверджена світовим комітетом RILEM, та створенням програми європейського співробітництва в науці і технології SARCOS COST Action CA 15202 “Self Healing concrete: the path to sustainable construction”, яка спрямована на впровадження інноваційних рішень для подовження строку служби бетонних конструкцій в рамках проєкту HORIZON 2020. Виконання проєкту сприятиме поширенню впровадження лужних цементів, закріплюючи пріоритет вітчизняної наукової школи.

Прикладною проблемою є розробка бетонів загально будівельного призначення на основі рециркульованих залишків бетонних конструкцій та споруд, що утворились внаслідок ведення бойових дій. Враховуючи орієнтовні обсяги руйнування житлового фонду на сьогодні більше 100 млн. м² житла, а також об'єктів промислових комплексів будівельного виробництва, хімічної, **оборонної**, сільськогосподарської та харчової галузей економіки, інфраструктурних об'єктів, а також необхідність їх відновлення, означена тематика на теперішній час набуває актуальності і пріоритетності у будівельній індустрії та сфері національної безпеки.

Аналіз досліджень і публікацій. Пріоритетність і актуальність заданого напрямку досліджень обумовлена необхідністю утилізації величезного пласту продуктів життєдіяльності людини – відходів, що утворюються при руйнуванні бетонних та залізобетонних споруд та будівель. Відомо, що матеріали на основі портландцементних систем є необоротними продуктами, що не підлягають хімічному розкладанню та можуть бути утилізовані тільки шляхом механічної переробки [1]. У світовій практиці дедалі більше з'являється робіт науковців, що спрямовані на розв'язання цієї проблеми [2]. Водночас, використання подібних матеріалів також обумовлює появу недоліків, що неприйнятні традиційним бетонним конструкціям [3, 4]. Насамперед, питання обумовлено підвищеною дефектністю структури матеріалу самого рециркульованого заповнювача, який в

процесі переробки і класифікації набуває дефектності структури (мікротріщин) та, відповідно, погіршує властивості кінцевого продукту.

Для України питання використання таких матеріалів постає ще більш гостро, оскільки за статистикою конфедерації будівельників України та Міністерства відновлення інфраструктури та регіонального розвитку на сьогодні пошкодженим та зруйнованим є більше 100 млн. м² житлового фонду, не рахуючи промислових будівель та інфраструктурних об'єктів. Більша частина таких структур підлягає демонтажу та утилізації, що обумовлює створення величезних депозитаріїв на землях аграрного та промислового фонду. Крім того, лише для відновлення втраченого фонду будівель і споруд знадобиться величезна кількість будівельних матеріалів, і вже сьогодні Спілка виробників будівельних матеріалів прогнозує страшні дефіцити будівельних матеріалів по всіх позиціях. Відповідно, вирішенням проблеми має стати використання продуктів переробки зруйнованих конструкцій як сировини для виготовлення нових [5-6]. Також, в умовах масштабного відновлення передбачається значний дефіцит цементів (оптимістичний прогноз випуску традиційного цементу до 20 млн тон при прогнозованій потребі від 30 млн тон/рік), що може бути частково заповнений за рахунок використання лужних цементів, для чого в Україні є повна нормативна база.

Питання використання матеріалів на основі рециркульованих заповнювачів та лужних цементів активно досліджуються на світовому науковому ринку [7-8], вивчаючи поведінку таких матеріалів в різних умовах експлуатації [9-10]. Дослідники відзначають перспективність використання подібних систем та високі експлуатаційні показники, в той самий час відзначаючи підвищену вартість таких технологій та складність технології отримання матеріалу порівняно із традиційними цементними системами. Водночас, українська школа лужних цементів, яка є родоначальником таких матеріалів та має більше 65 років досвіду розробок матеріалів на їх основі, значно випереджає світові аналоги у плані розробки ресурсоефективних та економічних матеріалів, пропонуючи відносно дешеві та технологічні способи організації виробництва у найкоротші терміни.

Представники наукової школи НДІВМ ім. В.Д. Глуховського займалися вивченням питань спрямованого структуроутворення цементів та бетонів різного призначення у рамках пошукових тематик, держбюджетних та госпдоговірних розробок, а також міжнародних проєктів (Intas, COST Action та ін.), зокрема, вивчали питання відмінностей структуроутворення матеріалів на основі традиційних та лужних цементів.

Штучний камінь на основі лужних в'язучих речовин, на відміну від інших цементних систем, характеризується високою стійкістю структури та довговічністю при впливі факторів, що викликають «розхитування» структури, що пов'язано зі зниженою основністю фазового складу гідратних новоутворень та його відмінністю від традиційних систем. Питання спрямованого керування процесами структуроутворення цементів та бетонів широко вивчалось науковою школою, зокрема у роботах Ж.В. Скурчинської, К.К. Пушкарьової, Р.Ф. Рунової, О.А. Бродко, О.М. Петропавловського, В.І. Гоца, П.В. Кривенко, В.В. Грабовчак, О.Ю. Ковальчука та ін., і стосувались зокрема вивчення процесів спрямованого формування структури матеріалів різного призначення на основі техногенної сировини [11-15].

Результати досліджень підтвердили ефективність наукових підходів НДІВМ, водночас, питання спрямованого управління процесами структуроутворення лужних цементів з метою отримання малодефектної структури матеріалів на основі рециркульованих заповнювачів потребує проведення подальших робіт, які є інноваційними для вітчизняної та світової науки.

Постановка завдання. Аналіз літературних джерел показує, що отримання бетонних сумішей та бетонів на основі рециркульованих будівельних конструкцій є питанням цілком можливим, проте існуючі додаткові виклики до проектування складу, які накладає військовий характер утворення таких відходів і, відповідно, щебню накладає дуже специфічні вимоги.

В рамках представленого дослідження, окрім власне аналізу літературних джерел, було вирішено дослідити потенційну можливість отримання бетонів на основі рециркульованих будівельних (бетонних) конструкцій із використанням шлаколужного цементу типу ЛЦЕМ-І, а також вивчити фізико-механічні властивості матеріалів, що було отримано.

Зміст і результати досліджень. В якості сировинних матеріалів для отримання шлаколужного цементу було використано доменний гранульований шлак виробництва ПАТ «ДМЗ» з питомою поверхнею 450 м²/кг за Блейном як основний алюмосилікатний компонент.

Лужний компонент було представлено метасилікатом натрію п'ятиводним.

Фізико-механічні випробування лужного цементу проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-185:2009, які охоплюють визначення нормальної густоти цементного тіста, строки тужавлення, границі міцності на стиск цементного каменю та тонкості помелу цементу.

Визначення властивостей бетонів з використанням рециркульованих заповнювачів проводили у відповідності до вимог діючих нормативних документів.

В якості крупного заповнювача використовували продукт дроблення бетонних конструкцій, просіяний до отримання фракції 5-20 мм.

Як дрібний заповнювач використовували пісок річковий Дніпровський із модулем крупності $M_k=1,1$, висушений до постійної маси.

На даному етапі досліджень було визначено вплив компонентного складу бетону із використанням рециркульованого заповнювача на реологічні та фізико-механічні властивості систем. Склад досліджуваних композицій наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Склад та властивості бетонів на основі рециркульованих заповнювачів

№	Композиційний склад			Осадка конуса	Міцність при стиску, МПа		
	Цемент	Крупний Заповнювач Фр.5-10	Пісок		1 доба	7 доба	28 доба
1	330	1180	780	10	7	13	27
2	330	1230	750	8	5	11	24
3	330	1130	830	12	7	12	28
4	350	1180	760	12	10	15	28
5	370	1180	780	13	12	16	32

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що зміна компонентного складу бетонної суміші некритичним чином, але впливає на властивості бетонів. Так, при зміні співвідношення крупний заповнювач/дрібний заповнювач у системі із незмінним вмістом цементної складової (композиції 1-3) осадка конуса підвищується при збільшенні вмісту дрібної фракції, що також позитивно відбивається на міцнісних показниках бетонів. Матеріал із найменшою осадкою характеризується також найнижчими показниками міцності.

Водночас, підвищення вмісту цементної складової при незмінному вмісті крупного заповнювача дозволяє суттєво підвищити міцність системи порівняно із базовою композицією композиція №2). При чому підвищення міцності спостерігається як у ранньому, так і у пізньому термінах тверднення. Отримані міцнісні показники (32 МПа у віці 28 діб) відповідають показникам контрольного складу (аналог складу №2) з використанням традиційного гранітного щебеню фракції 5-20 мм.

Водночас, залишаються питання впливу дрібних фракцій у складі рециркульованого заповнювача і пиловидних частин на процеси формування структури і властивості бетонів на основі таких заповнювачів. Це буде вивчено при виконанні наступних досліджень.

Висновки. Проведений аналіз літературних джерел та результати проведених досліджень дозволяють стверджувати, що використання рециркульованого бетону як заповнювача для бетонних конструкцій різного призначення для відновлення України є не тільки можливим, але і обов'язковим із точки зору стійкого розвитку.

Такі матеріали будуть характеризуватись підвищеними вартісними показниками і дещо ускладненою технологією виробництва, забезпечуючи, водночас, розширення сировинної бази локальних матеріалів, які можна застосовувати, а також розв'язуючи глобальні екологічні питання утилізації величезних об'ємів будівельних відходів, що утворились внаслідок ведення бойових дій. Крім того, розробка та використання таких бетонів відповідатиме реалізації стратегії сталого розвитку та стратегічним напрямкам діяльності європейського та світового ринків, полегшуючи, в тому числі, виконання Україною своїх екологічних зобов'язань.

Подяка. Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту (реєстраційний № 0124U001128) який виконується за рахунок бюджетного фінансування в 2024-2025 рр.

Список літератури:

1. Ferronato, N., Fuentes Sirpa, R. C., Guisbert Lizarazu, E. G., Conti, F., & Torretta, V. (2023). Construction and demolition waste recycling in developing cities: management and cost analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 24377-24397. DOI: 10.1007/s11356-022-23502-x
2. Salgado, Fernanda de Andrade, & Silva, Flávio de Andrade (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: a review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104452
3. Bu, C., Liu, L., Lu, X., Zhu, D., Sun, Y., Yu, L., ... & Wei, Q. (2022). The durability of recycled fine aggregate concrete: a review. *Materials*, 15(3), 1110. DOI: 10.3390/ma15031110

4. Soomro, F. A., Memon, B. A., Oad, M., Buller, A. H., & Tunio, Z. A. (2019). Shrinkage of concrete panels made with recyclable concrete aggregates. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(2), 4027-4029. DOI: 10.48084/etasr.2595
5. Шишкін, Е., Гайко, Ю., & Черносова, Т. (2024). Шляхи рециклінгу будівельного сміття під час післявоєнної відбудови зруйнованих міст. *Містобудування та територіальне планування*, (85), 679-697. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.85.679-697
6. Troian, V., Gots, V., Keita, E., Roussel, N., Angst, U., & Flatt, R. J. (2022). Challenges in material recycling for postwar reconstruction. *RILEM Technical Letters*, 7, 139-149. DOI:10.21809/rilemtechlett.2022.171
7. Alhawat, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., & Sahmaran, M. (2022). Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: a review. *Journal of Building Engineering*, 50, 104104. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104104
8. Yang, L., Zhu, Z., Sun, H., Huo, W., Zhang, J., Wan, Y., & Zhang, C. (2023). Durability of waste concrete powder-based geopolymer reclaimed concrete under carbonization and freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 403, 133155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133155
9. Giannopoulou, I., Robert, P. M., Sakkas, K. M., Petrou, M. F., & Nicolaidis, D. (2023). High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, 72, 106575. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106575
10. Kul, A., Ozcelikli, E., Yildirim, G., Alhawat, M., & Ashour, A. (2024). Sustainable alkali-activated construction materials from construction and demolition waste. *Sustainable Concrete Materials and Structures*, 93-125. DOI: 10.1016/B978-0-443-15672-4.00005-X
11. Kryvenko, P., Rudenko, I., Sikora, P., Sanytsky, M., Konstantynovskiy, O., & Kropyvnytska, T. (2024). Alkali-activated cements as sustainable materials for repairing building construction: a review. *Journal of Building Engineering*, 109399. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109399
12. Krivenko, P., Kovalchuk, O., & Boiko, O. (2019). Practical experience of construction of concrete pavement using non-conditional aggregates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 708, No. 1, 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012089
13. Krivenko, P., Petropavlovskiy, O., Kovalchuk, O., Lapovska, S., Pasko, A. (2018). Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral additives of technogenic origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 4(6), 6-15. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140324
14. Kovalchuk, O., Gelevera, O., & Ivanychko, V. (2019). Studying the influence of metakaolin on self-healing processes in the contact-zone structure of concretes based on the alkali-activated Portland cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 6 (101), 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.181501
15. Krivenko, P., Petropavlovskiy, O., & Kovalchuk, O. (2018). A comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of the alkali-activated slag cement and concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No. 6 (91), 33-39. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.119624

References:

1. Ferronato, N., Fuentes Sirpa, R. C., Guisbert Lizarazu, E. G., Conti, F., & Torretta, V. (2023). Construction and demolition waste recycling in developing cities: management and cost analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 24377-24397. DOI: 10.1007/s11356-022-23502-x
2. Salgado, Fernanda de Andrade, & Silva, Flávio de Andrade (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: a review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104452
3. Bu, C., Liu, L., Lu, X., Zhu, D., Sun, Y., Yu, L., ... & Wei, Q. (2022). The durability of recycled fine aggregate concrete: a review. *Materials*, 15(3), 1110. DOI: 10.3390/ma15031110
4. Soomro, F.A., Memon, B.A., Oad, M., Buller, A.H., & Tunio, Z.A. (2019). Shrinkage of concrete panels made with recyclable concrete aggregates. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(2), 4027-4029. DOI: 10.48084/etasr.2595
5. Shyshkin, E., Haiko, Yu., & Chernonosova, T. (2024). Shliakhy retsyklinhu budivelnoho smittia pid chas pisliavoiennoi vidbudovy zruinovanykh mist. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, (85), 679-697. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.85.679-697
6. Troian, V., Gots, V., Keita, E., Roussel, N., Angst, U., & Flatt, R. J. (2022). Challenges in material recycling for postwar reconstruction. *RILEM Technical Letters*, 7, 139-149. DOI:10.21809/rilemtechlett.2022.171
7. Alhawat, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., & Sahmaran, M. (2022). Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: a review. *Journal of Building Engineering*, 50, 104104. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104104
8. Yang, L., Zhu, Z., Sun, H., Huo, W., Zhang, J., Wan, Y., & Zhang, C. (2023). Durability of waste concrete powder-based geopolymer reclaimed concrete under carbonization and freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 403, 133155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133155
9. Giannopoulou, I., Robert, P. M., Sakkas, K. M., Petrou, M. F., & Nicolaides, D. (2023). High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, 72, 106575. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106575
10. Kul, A., Ozcelikli, E., Yildirim, G., Alhawat, M., & Ashour, A. (2024). Sustainable alkali-activated construction materials from construction and demolition waste. *Sustainable Concrete Materials and Structures*, 93-125. DOI: 10.1016/B978-0-443-15672-4.00005-X
11. Kryvenko, P., Rudenko, I., Sikora, P., Sanytsky, M., Konstantynovskiy, O., & Kropyvnytska, T. (2024). Alkali-activated cements as sustainable materials for repairing building construction: a review. *Journal of Building Engineering*, 109399. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109399
12. Krivenko, P., Kovalchuk, O., & Boiko, O. (2019). Practical experience of construction of concrete pavement using non-conditional aggregates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 708, No. 1, 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012089
13. Krivenko, P., Petropavlovskiy, O., Kovalchuk, O., Lapovska, S., Pasko, A. (2018). Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral

additives of technogenic origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6), 6-15. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140324

14. Kovalchuk, O., Gelevera, O., & Ivanychko, V. (2019). Studying the influence of metakaolin on self-healing processes in the contact-zone structure of concretes based on the alkali-activated Portland cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 6 (101), 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.181501

15. Krivenko, P., Petropavlovskiy, O., & Kovalchuk, O. (2018). A comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of the alkali-activated slag cement and concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No. 6 (91), 33-39. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.119624

Oleksandr KOVALCHUK, Viktoriia ZOZULYNETS, Vasyi IVANYCHKO, Ruslan KOPOTUN

Use of the recycled aggregates – a way to the sustainable rebuild

The question of wide use of recycled aggregate on the basis of demolition wastes rises sharp due to the different points of view: from the point of view of necessity to utilize multitonned wastes appeared because of war influence, from the point of view of strong will to rebuild the country and also because of the need to have economical, ecological and natural sources rational consumption.

In the same time, such recycled products could also have high defective structure because of their origin and demanding to implement the special technology of their treatment and use. Peculiarities of Ukrainian national experience for such systems if their composition. Namely possible presence of organic compounds and products of war activities, that leads to some difficulties in structure formation in concretes on their basis.

As a potential method to decrease defective structure appearance in concrete is introduction of modifying admixtures, promoting self-healing of the structure elements in concrete, and also use of alternative cements, able to resist against high structure movement, appeared due to the presence of organic additives. Also, use of alternative cements makes it possible to widen raw materials base for rebuilding of Ukraine, so far as present source even taking into account perspective production of 20 million tons of the cement with the need more than 30 million tons per year is not enough.

The implementation of the results of this study will not only solve the issue of recycling large-scale industrial waste, but also significantly increase the pace of construction and restoration of infrastructure, damaged and destroyed housing stock by obtaining a large raw material resource in the form of secondary recycled aggregate as a local raw material. It will also be possible to expand the use of alkaline binders in construction production and increase the use of technogenic waste, represented by concrete buildings and structures that require immediate and complete recycling.

Based on the results of the work, recipes for concrete mixtures using recycled aggregates and methodological foundations for regulating the self-healing processes of the structure of such material will be developed.

Key words: recycled concretes, sustainable development, concrete, rebuilding, cement.