

УДК 504:628.4:691.32.

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.12>

## ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ РУЙНУВАНЬ В УКРАЇНІ: ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕРОБЛЕНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА

Палій О.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»  
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир  
asp\_pov@student.ztu.edu.ua

В умовах триваючих військових дій в Україні та їх руйнівних наслідків, проблема утилізації будівельних відходів руйнування набуває особливої гостроти. Велика кількість відходів, що утворилися в результаті обстрілів та руйнувань інфраструктури, становить значний екологічний та соціальний виклик. Дослідження зосереджується на вивченні впливу цих відходів на довкілля, виявленні шляхів їх безпечної та ефективної утилізації та рециклінгу.

Питання ефективного управління будівельними відходами в Україні стає ще більш актуальним у світлі необхідності відновлення зруйнованих територій. Наразі існуючі методи утилізації, як правило, обмежуються захороненням відходів, що призводить до додаткового навантаження на звалища та земельні ресурси. Відсутність комплексної стратегії управління відходами робить цю проблему ще більш важливою для розгляду та вирішення на державному рівні. В цьому аспекті особливу увагу заслуговує досвід інших країн, де вже впроваджені технології переробки будівельних відходів та його повторного використання. Наприклад, практика використання руїн як сировини для нового будівництва, яка була успішно застосована під час відновлення Варшави після Другої світової війни, може стати в нагоді Україні в післявоєнний період.

Розвиток «зеленого бетону», який включає в себе використання перероблених матеріалів, є одним із способів мінімізації екологічного впливу будівельної індустрії. «Зелений бетон» не тільки сприяє зменшенню викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних з виробництвом традиційного бетону, але й покращує механічні властивості та довговічність конструкцій. Однак, разом із перевагами, використання перероблених матеріалів може нести і ризики, зокрема пов'язані з корозією арматури через присутність хлоридів та інших корозійно-активних компонентів.

Дослідження показує, що інтеграція перероблених матеріалів у виробництво бетону вимагає ретельного вибору компонентів та контролю якості готової продукції. Необхідно враховувати такі фактори, як вміст солей та інших хімічних речовин у вторинних матеріалах, які можуть впливати на процеси корозії в бетонних конструкціях. Також важливо розглядати можливість модифікації складу бетону з використанням добавок, які можуть покращувати його властивості та збільшувати опір проникненню агресивних речовин.

Результати даного дослідження мають стратегічне значення, оскільки вони можуть бути використані для розробки комплексної державної політики у сфері управління будівельними відходами, екологічного будівництва та сталого розвитку інфраструктури. *Ключові слова:* управління відходами, сталий розвиток, відходи руйнування, екологічна безпека, зелений бетон, переробка будівельних відходів, корозія бетону, довговічність бетонних конструкцій.

### **Environmental aspects of utilization of destruction waste in Ukraine: using recycled material for sustainable construction. Paliy O.**

In the context of ongoing military actions in Ukraine and their destructive consequences, the problem of utilizing construction waste acquires particular urgency. The large amount of waste generated as a result of shelling and infrastructure destruction poses a significant environmental and social challenge. The research focuses on studying the impact of this waste on the environment, identifying ways for its safe and efficient disposal and recycling.

The issue of effective management of construction waste in Ukraine becomes even more relevant in light of the need to rebuild the destroyed areas. Current disposal methods are typically limited to waste landfilling, leading to additional strain on landfills and land resources. The absence of a comprehensive waste management strategy makes this problem even more important to consider and resolve at the national level. In this regard, the experience of other countries that have implemented technologies for the processing of construction waste and its reuse is of particular interest. For example, the practice of using rubble as raw material for new construction, successfully applied during the reconstruction of Warsaw after World War II, may be useful to Ukraine in the post-war period.

The development of «green concrete,» which includes the use of recycled materials, is one way to minimize the environmental impact of the construction industry. «Green concrete» not only contributes to reducing CO<sub>2</sub> emissions associated with the production of traditional concrete but also improves the mechanical properties and durability of structures. However, along with the advantages, the use of recycled materials can also carry risks, particularly related to the corrosion of reinforcement due to the presence of chlorides and other corrosive-active components.

Research shows that the integration of recycled materials into concrete production requires careful selection of components and quality control of the finished product. Factors such as the content of salts and other chemical substances in secondary materials, which can affect corrosion processes in concrete structures, need to be considered. It is also important to consider the possibilities of modifying the concrete composition using additives that can improve its properties and increase resistance to the penetration of aggressive substances.

The results of this research have strategic importance, as they can be used to develop a comprehensive national policy in the field of construction waste management, ecological construction, and sustainable infrastructure development. *Key words:* waste management, sustainable development, demolition waste, environmental safety, green concrete, recycling of construction waste, concrete corrosion, durability of concrete structures.

**Постановка проблеми.** Ще до початку війни будівельні відходи становили значну частину відходів, що вивозилися на звалища, через їх об'єм та велику кількість, що залишалася після реконструкції та будівництва [1].

За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів, за майже два роки Великої війни росіяни пошкодили або зруйнували майже 60 000 об'єктів. Найбільше постраждали житлові будинки – 48 000. Обласна військово-цивільна адміністрація підраховує кількість відходів, накопичених внаслідок руйнування об'єктів: на початок літа 2023 року кількість будівельного сміття сягне 450 000 тонн, повідомили ЕП у Міністерстві екології [2]. Процес відновлення європейських міст після Другої світової війни був прискорений завдяки інноваційному підходу до використання залишкових будівельних матеріалів. Втілюючи принципи сталого розвитку, використовувалася цегла, врятована з руїн, для повторного використання, а також будівельне сміття, яке перероблялось у новий бетон. Цей метод дозволив не тільки зекономити ресурси, але й забезпечити ефективне використання матеріалів [3]. Подібні практики переробки та повторного використання відходів утвердилися в таких країнах, як Данія, Нідерланди, Німеччина, де законодавство вимагає використання певного відсотка перероблених матеріалів у новому будівництві. Австрія, наприклад, досягла вражаючих результатів, переробляючи близько 87% будівельних відходів [4].

Події, подібні до урагану «Катріна» у 2005 році у Луїзіані (США), де було вивезено понад 30 мільйонів кубометрів відходів на звалища, вказують на необхідність покращення управління відходами після катастроф [5]. Неурядові організації та ООН активно працюють над розробкою ефективних стратегій утилізації відходів, з метою мінімізувати їх негативний вплив на довкілля [6].

Станом на лютий цього року кількість відходів, знищених в Україні внаслідок російської військової агресії, вже становила близько 10–12 мільйонів тонн. Ця цифра продовжує зростати. Зокрема, станом на початок липня 2023 року обсяг відходів від знищеної російської техніки становив 527 000 тонн [7].

Відходи, що утворюються в результаті знищення, мають бути утилізовані таким чином, щоб не завдавати шкоди навколишньому середовищу або мінімізувати цей вплив. Зокрема, частина цих відходів може бути одразу відсортована та перероблена. Однак частина цих відходів є небезпечними і має бути утилізована відповідно до різних нормативних актів [2].

Будівельне сміття містить багато токсичних речовин, які потрапляють у ґрунтові води. Крім того, будівельні відходи від бойових дій містять багато токсичних частинок, таких як вибухівка, електроніка та батарейки. Ситуація ускладнюється незаконним захороненням відходів у лісах та водоймах.

Будівельні відходи можна утилізувати трьома способами: захоронення, переробка та повторне використання. В Україні переважають перші два способи. Наприклад, у Київській області створено 48 місць тимчасового зберігання будівельних відходів. Їх загальна площа становить 55 га, що еквівалентно 77 футбольним полям [1]. У короткостроковій перспективі уряд хоче зменшити безпосередні ризики для здоров'я людей і довкілля. У довгостроковій перспективі він має намір зосередитися на розвитку більш чистої, зеленої економіки. Досі закон не містив вимог щодо повторного використання будівельних відходів. Громади обирали найпростіший шлях і вивозили відходи на полігони для твердих побутових відходів.

У 2022 році Уряд затвердив «Порядок поводження з відходами, що утворилися внаслідок пошкодження (руйнування) будівель і споруд внаслідок воєнних дій, терористичних актів, диверсій або робіт з ліквідації їхніх наслідків». Цей документ регулює питання, пов'язані з поводженням з відходами [8].

Зокрема, він встановлює вимоги до класифікації та обліку відходів, поводження з ними, місць тимчасового зберігання та переробки відходів. Документ відповідає стандартам ЄС.



Рис. 1. Порядок поводження із відходами від руйнувань [9]

Таким чином, виникає актуальна потреба в ефективному використанні відходів від руйнувань. Одним із можливих рішень є створення бетонних сумішей, які включають перероблені відходи, розроблені на основі принципів сталого розвитку. В останні роки стали популярними рецептури «зеленого бетону», спрямовані на вирішення основних екологічних проблем, пов'язаних з виробництвом бетону, яке вимагає великих обсягів природних ресурсів і на яке припадає 8% світових викидів CO<sub>2</sub> [10]. З метою збере-

ження природних ресурсів та зменшення впливу на навколишнє середовище, сировину для бетону замінують різними видами відходів [11]. Ці нові композиції зазвичай добре характеризуються з точки зору механічних короткочасних властивостей (28-денна міцність на стиск і розтяг), але слід звернути увагу на їхню довговічність і корозійну поведінку, які можуть бути змінені введенням відходів у бетонну матрицю порівняно зі стандартним бетоном.

Корозія є одним з основних механізмів руйнування залізобетонних конструкцій, особливо у випадку хлоридної точкової корозії [12]. Як відомо, хлориди руйнують пасивну плівку, що захищає сталеву арматуру, і запускають процес корозії [12]. Коли хлорид досягає порогової концентрації, ініціюється корозійний процес, який скорочує термін служби бетонних конструкцій через розтріскування і відшарування бетонного покриття та пошкодження арматури [13]. Цей корозійний процес присутній у більшості бетонних конструкцій, збільшуючи витрати на обслуговування і скорочуючи фактичний термін служби бетонних конструкцій.

У цьому дослідженні були проведені прискорені міграційні випробування «зеленого бетону», що містить перероблені бетонні агрегати отримані з відходів будівництва та знесення в якості заповнювача, щоб краще зрозуміти поведінку міграції хлоридів і вплив введення такого типу відходів у бетон.

**Матеріали для дослідження.** Для замішування бетонних сумішей використовували два типи природних заповнювачів: річковий пісок (РП) і природний гравій (ПГ). В якості вторинного заповнювача використовувався подрібнений бетонний гравій (БГ), отриманий з відходів будівництва та знесення, який постачався компанією Araplasa, що займається утилізацією твердих побутових відходів, яка працює на півночі Іспанії. В якості цементу використовувався портландцемент типу СЕМ II/A-LL 42.5 R. У всіх сумішах використовувався суперпластифікатор Marei Dynamon Extend W202R для зменшення кількості води і поліпшення оброблюваності.

Використання всіх компонентів матеріалів, використаних у цьому дослідженні, для виготовлення конструкційного бетону дозволено в EN 197-1 [14], EN 12620 [15] та EN 206 [16].

**Викладення основного матеріалу.** Три типу сумішей були розроблені і залиті в Інституті матеріалів, випробувань і конструкцій Університету Парми, Італія. Еталонний бетон (ЕБ) містив лише природ-

ний заповнювач і портландцемент. Враховуючи два рівні заміни крупного заповнювача, було визначено два види сумішей, які порівнювалися з еталонним бетоном. Точніше, дві суміші замінили природний гравій на 25% і 50% подрібненого бетонного гравію, названі С25 і С50 відповідно. Різні суміші підсумовані в таблиці 1, де кількості відносяться до твердого залишкового стану заповнювача.

Всі суміші змішувалися за допомогою змішувача барабанного типу з сухим заповнювачем всередині. Потім до суміші додавали воду (50% від загального об'єму) (для перемішування та поглинання заповнювача). Наступним додавали цемент разом з 25% води. Нарешті, додавали воду, що залишилася, і суперпластифікатор та перемішували протягом 3 хв, поки компоненти бетону не стали майже однорідними. У таблиці 1 також наведено середні значення міцності на стиск за 28 днів, отримані згідно з [17] для трьох випробуваних кубів розміром 100x100x100 мм. З метою проведення тесту на міграцію хлоридів для кожної суміші було випробувано три циліндричні зразки розміром 100 мм x 50 мм. Для їх отримання було зроблено зразки розміром 100 мм x 200 мм відповідно до EN 12390-1 [18] для кожної суміші, а потім розрізані на частини для проведення випробування на прискорену міграцію хлоридів. Для отримання результатів, подібних до природної міграції, до всіх зразків було застосовано потенціал 4,5 В. Випробувальна установка представлена на рис. 2. Через деякий час вимірювали середню глибину залягання хлоридів, розрізаючи зразок на дві частини і розпилюючи AgNO<sub>3</sub> для проведення колориметричного тесту [11]. Для кожного зразка та потенційного часу застосування глибина була виміряна в 40 точках. Потім розраховували коефіцієнт дифузії К відповідно до рівняння 1, запропонованого в іспанському стандарті для бетону ЕНЕ-08 [19].

$$D(mm) = K \left( \frac{mm}{h^{0.5}} \right) \times \sqrt{t(h)} \quad (1)$$

**Головні висновки.** Для того, щоб зрозуміти вплив перероблених заповнювачів, результати з точки зору глибини хлоридів в залежності від часу представлені на рис. 3, для сумішей з табл. 1 з 0%, 25% та 50% перероблених заповнювачів. Отримані результати показані в табл. 2 показують, що значення К є вищими при більшому заміщенні переробленого заповнювача. Ці результати підтверджують тенденцію, вже визнану в літературі іншими авторами, які виявили, що початковий час корозії скорочується при збільшенні коефіцієнта заміни перероблених

Таблиця 1

Склад міксів зразків для експериментальних сумішей

Код міксу	Відсоток заміни БГ (%)	РП (кг/м <sup>3</sup> )	ПГ (кг/м <sup>3</sup> )	БГ (кг/м <sup>3</sup> )	Цемент (кг/м <sup>3</sup> )	Вода (кг/м <sup>3</sup> )	Суперпластифікатор (кг/м <sup>3</sup> )	Міцність на стиск 28д, МПа
ЕБ	0	1139	567	0.00	400	200	2.6	45.52
С25	25	1139	426	134	400	200	2.6	47.09
С50	50	1139	284	268	400	200	2.6	42.57

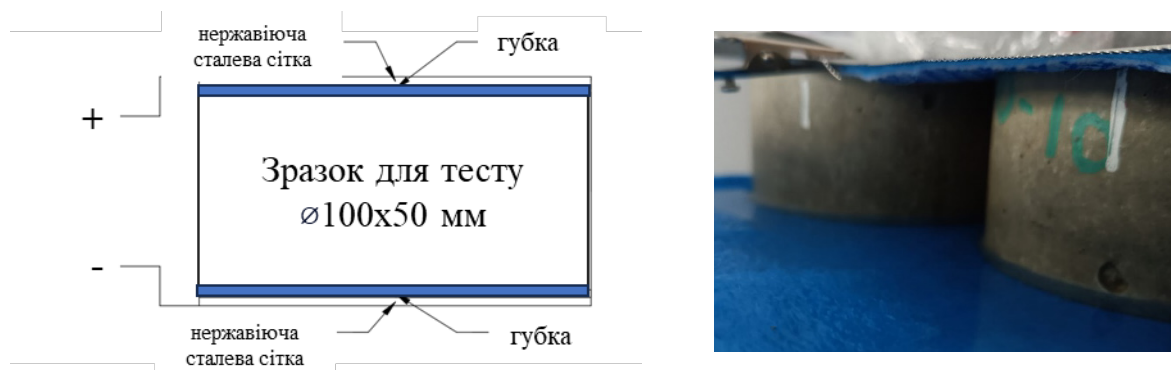


Рис. 2. Випробувальна установка

заповнювачів через низькі показники цементно-заповнювальної перехідної зони бетону [20].

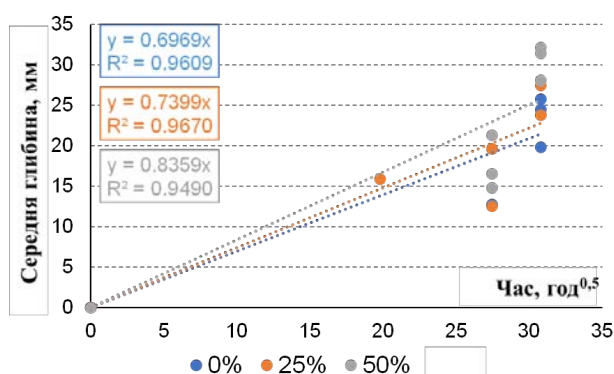


Рис. 3. Глибина залягання хлоридів у залежності від часу для міксів з БГ

Коефіцієнт заміщення і більш високе поглинання вторинних заповнювачів є основними параметрами, що визначають більш пористу структуру [21]. Відомо, що менша структура пор сприяє збільшенню опору проникненню хлоридів [20].

Таблиця 2

#### Значення коефіцієнта заміщення К для всіх сумішей

Номенклатура	ЕБ	С25	С50
Коефіцієнт К $\left(\frac{mm}{h^{0.5}}\right)$	0.837	0.781	0.925

**Перспективи використання результатів дослідження.** Еталонний бетон (ЕБ) має коефіцієнт К, рівний 0.837, що свідчить про середній рівень проникнення хлоридів. Варіант С25, де 25% природного заповнювача було замінено на БГ, показує трохи нижчий коефіцієнт (0.781), що може вказувати на кращу захищеність від хлоридів. Однак, мікс С50, в якому 50% природного заповнювача замінено, має найвищий коефіцієнт К (0.925), що свідчить про більш високу пористість і, відповідно, більшу схильність до проникнення хлоридів.

Ці дані вказують на те, що хоча використання перероблених матеріалів у бетонних сумішах може мати екологічні переваги, воно також може збільшувати ризики пов'язані з корозією. Зокрема, мікс С50, який має вищий коефіцієнт дифузії, може бути менш підходящим для використання в умовах, де присутній агресивний вплив хлоридів.

Однак, існують способи модифікації складу бетону, щоб зменшити цей ризик. Введення пуццоланових матеріалів, які вступають у реакцію з гідроксидом кальцію, утворюючи додаткові гідратовані силікати кальцію, може зменшити пористість бетону та підвищити його стійкість до корозії. Крім того, використання мікросиліки може сприяти утворенню більш щільної структури матриці та зменшити розмір пор, що також позитивно впливає на стійкість матеріалу до впливу хлоридів [21].

#### Література

1. Відходи від війни: що це таке та як із ними впоратись?. URL:Режим доступу: <https://rubryka.com/article/waste-from-war/> (дата звернення: 06.12.2023).
2. Construction Waste in Ukraine: What's the Solution? Property Forum. URL: <https://www.property-forum.eu/news/construction-waste-in-ukraine-whats-the-solution/15592> (дата звернення 1.12.2023).
3. J. T. Tanacredi. «Sustainable Waste Management: Strategies and Solutions.» International Journal of Environmental Studies. 2023. № 81 (1). P. 157-171.
4. M. Bjerregaard, et al. «Disaster Waste Management: A Systems Approach.» Environmental Management Review. 2023. № 29 (4). P. 399-416.
5. D. Lu, W. Yuan. «Construction and Demolition Waste Recycling: A Literature Review.» Waste Management & Research. 2023. № 41 (6). P. 830-845.

6. S. A. Mahpour. «Managing Construction and Demolition Waste: Environmental and Economic Issues.» *International Journal of Waste Resources*. 2023. №13 (2). P. 202-218.
7. Н. Kireitseva, L. Demchuk, O. Paliy, A. Kahukina. Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. № 80 (2). P. 267-276.
8. Постанова Кабінету Міністрів України від 27 вересня 2022 року № 1073. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення 15.12.2023).
9. Чому поховати рештки знищених будинків на звалищах – погана ідея. Хмарочос. <https://hmarochos.kiev.ua/2023/11/29/chomu-pohovaty-reshtky-znyshhenyh-budynkiv-na-zvalyshhah-pogana-ideya/> (дата звернення 20.12.2023).
10. Палій О., Пацева І., Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І. (2023). Використання відходів гірничо-видобувної галузі, як альтернативної сировини у будівництві. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 27–35 <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-4>.
11. Cantero, Blas, et al. 2020. “Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate”. *Journal of Cleaner Production* 275: 122913.
12. Torres, Julio, Andrade Carmen and Sánchez Javier. 2020. “Initiation period of corrosion by chloride ion according to EHE08 in cracked concrete elements”. *Informes de la Construcción* 72(557): e331.
13. Tian, Ye, et al. 2023. “Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments”. *Construction and Building Materials* 369: 130504.
14. EN 197-1: 2011. Cement, Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
15. EN 12620:2003+A1:2009. Aggregates for concrete.
16. EN 206:2013+A2:2021/IM:2022. Concrete. Specification, performance, production and conformity.
17. EN 12390-3:2020. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.
18. EN 12390-1: 2021. Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds.
19. Code on Structural Concrete (EHE-08). 2008. Madrid: Ministry of Public Works.
20. Liang, Chaofeng, et al. 2021. “Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete: A review”. *Construction and Building Materials* 282: 122547.
21. Golafshani, E. Mohammadi, et al. 2023. “Modeling the chloride migration of recycled aggregate concrete using ensemble learners for sustainable building construction”. *Journal of Cleaner Production*, 407: 136968.