



Г. В. Кірейцева¹, О. В. Палій², С. В. Хоменко¹, О. А. Виговська¹, В. Т. Підвисоцький¹

¹ Державний університет "Житомирська політехніка", м. Житомир, Україна

² Університет Парми, м. Парма, Італія

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД В УКРАЇНІ

Визначено перспективи впровадження природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд для забезпечення сталого розвитку будівельної галузі України в період повоєнного відновлення. Проаналізовано світовий досвід управління відходами руйнації будівель та споруд на основі статистичних даних Євростату за 2018-2022 рр. Створено базу даних із 60 наукових публікацій за період 1990-2022 рр. для дослідження властивостей заповнювачів із відходів руйнації будівель та споруд. Виявлено значні розбіжності в рівнях перероблення відходів руйнації будівель та споруд між країнами ЄС (70-90 %) і Україною (23 %), що зумовлені недосконалістю нормативно-правової бази та відсутністю економічних стимулів для розвитку рециклінгу. Встановлено, що заповнювачі з відходів руйнації будівель та споруд характеризуються дещо нижчою щільністю (2300-2750 кг/м³) і підвищеним водопоглинанням (3,52-7,55 %), порівняно з природними заповнювачами (2400-2700 кг/м³ і 0,5-2,0 % відповідно). Ці особливості успішно компенсуються оптимізацією складу бетонної суміші. Доведено можливість збереження 85-95 % міцності бетону в разі заміщення до 30 % природних заповнювачів на заповнювачі з відходів руйнації будівель та споруд, що відповідає міжнародним рекомендаціям RILEM та підтверджує придатність таких матеріалів для конструкційного бетону класів C20/25-C35/45. Визначено економічні переваги: зниження собівартості бетону на 10-18 %, скорочення споживання природних ресурсів на 25-30 % та зменшення транспортних витрат на 40-50 % завдяки використанню місцевих відходів руйнації будівель та споруд. Показано, що українські підприємства (Neo-Eco, Korach Profi, KSG Agro) досягають 90 % рівня перероблення відходів руйнації будівель та споруд за застосування сучасних європейських технологій автоматизованого сортування та мобільних дробильних установок. Обґрунтовано нагальну потребу розроблення спеціалізованих стандартів заповнювачів із відходів руйнації будівель та споруд, гармонізованих з європейськими нормами, створення системи економічних стимулів та розвитку відповідної інфраструктури для забезпечення зеленого відновлення постраждалих територій.

Ключові слова: рециклінг будівельних матеріалів; вторинні заповнювачі з відходів руйнації будівель та споруд; екологічне підприємництво; природоохоронні технології; управління відходами будівництва та знесення.

Вступ / Introduction

Проблема управління відходами руйнації будівель та споруд набула глобального значення з огляду на зростання обсягів будівельної діяльності та потребу мінімізації негативного впливу на довкілля. У світовій науковій літературі активно досліджують питання перероблення будівельних відходів, зокрема використання їх як вторинної сировини для виробництва нових будівельних матеріалів. Країни Європейського Союзу досягли значних успіхів у цій сфері, де рівень перероблення відходів руйнації будівель та споруд сягає 90 % у Німеччині, Нідерландах і Австрії завдяки впровадженню концепції циркулярної економіки та принципу 4R (англ.

Reduce-Reuse-Recycle-Recover).

Незважаючи на наявність численних досліджень з технологічних аспектів перероблення будівельних відходів, недостатньо вивченими залишаються питання комплексного еколого-економічного обґрунтування природоохоронних технологій у контексті зеленого відновлення постраждалих територій. Особливо актуальним це питання є для України, де внаслідок військових дій утворилися значні обсяги відходів руйнації будівель та споруд, що потребують ефективного управління у процесі повоєнної відбудови.

Об'єкт дослідження – перероблення відходів руйнації будівель та споруд як фактор природоохоронної тех-

Інформація про авторів:

Кірейцева Ганна Вікторівна, канд. екон. наук, доцент, кафедра екології та природоохоронних технологій.

Email: gef_kgv@ztu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1055-1784>

Палій Ольга Вікторівна, д-р філософії, наук. співроб., факультет інженерії та архітектури. Email: olha.palii@unipr.it

Хоменко Світлана Володимирівна, аспірантка, кафедра екології та природоохоронних технологій. Email: org_hsv@ztu.edu.ua

Виговська Олена Анатоліївна, д-р філософії, ст. викл., кафедра національної безпеки, публічного управління та адміністрування.

Email: alenavygovska@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7905-0494>

Підвисоцький Віктор Тодосійович, д-р геолог. наук, доцент, кафедра гірничих технологій та будівництва.

Email: krrkp_pvt@ztu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-3350-0920>

Цитування за ДСТУ: Кірейцева Г. В., Палій О. В., Хоменко С. В., Виговська О. А., Підвисоцький В. Т. Перспективи впровадження природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд в Україні. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 4. С. 71–78.

Citation APA: Kireitseva, H. V., Palii, O. V., Khomenko, S. V., Vyhovska, O. A., & Pidvysotskyi, V. T. (2025). Implementation prospects of environmental technologies for construction and demolition waste processing in Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 71–78. <https://doi.org/10.36930/40350408>

нології.

Предмет дослідження – методи і засоби перероблення відходів руйнації будівель та споруд, які дадуть змогу виявити найкращі практики їх використання та адаптувати до українських умов повоєнної відбудови для забезпечення зеленого відновлення постраждалих територій.

Мета роботи – науково обґрунтувати ефективність впровадження природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд внаслідок військових дій, що забезпечить зелене відновлення постраждалих територій України.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати світовий досвід управління відходами руйнації будівель та споруд у контексті сталого розвитку, що дасть змогу виявити найкращі практики та адаптувати їх до українських умов повоєнної відбудови;
- оцінити еколого-економічну ефективність використання вторинних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд, що забезпечить обґрунтування доцільності їх впровадження у будівельній галузі України;
- дослідити нормативно-правові аспекти регулювання процесу поводження з відходами руйнації будівель та споруд в Україні, що дасть змогу визначити прогалини в законодавстві та сформулювати пропозиції з його вдосконалення;
- розробити рекомендації із впровадження природоохоронних технологій у процесі зеленого відновлення постраждалих територій, що сприятиме формуванню комплексної стратегії сталого розвитку будівельної галузі у контексті євроінтеграційних процесів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика управління відходами руйнації будівель та споруд та їх перероблення як вторинну сировину активно досліджують у світовій науковій літературі впродовж останніх десятиліть. Піонерські роботи у цій сфері з'явилися ще під час і після Другої світової війни, коли виникла нагальна потреба у розчищенні завалів і повторному використанні будівельних матеріалів у містах Європи [13]. Подальший розвиток досліджень зумовили зростання обсягів будівельної діяльності й потребу вирішення екологічних проблем, пов'язаних із утилізацією відходів.

Фундаментальні дослідження властивостей перероблених заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд і бетону на їх основі наведено в роботах автора [14], який здійснив всебічний аналіз механічних властивостей і довговічності бетону з переробленими заповнювачами. Автор встановив, що використання таких заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд призводить до зниження міцності на стиск від 5 до 30 % порівняно з бетоном на природних заповнювачах, що стало основою для подальших досліджень оптимальних співвідношень заміщення. Автори у роботі [34] розширили це дослідження, запропонувавши використання переробленого заповнювача у сферах ландшафтного дизайну, дорожнього покриття й виробництва будівельного розчину, наголосивши на важливості врахування неоднорідності матеріалу порівняно з природними заповнювачами.

Технічний комітет RILEM [29] розробив всеохопні рекомендації щодо використання перероблених бетонних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд у новому бетоні, встановивши граничні рівні замі-

щення до 20-30 % великих природних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд для структурних елементів і потребу коригування водоцементного співвідношення з урахуванням підвищеного водопоглинання перероблених матеріалів. Ці рекомендації стали основою для розроблення національних стандартів у багатьох країнах світу.

Результати дослідження науковців [5] продемонстрували, що використання 100 % переробленого великого заповнювача призводить до зниження міцності на стиск на 20-25 % за 28 днів, проте часткова заміна близько 25 % традиційного заповнювача дає змогу отримати механічні властивості, подібні до звичайного бетону. Це дослідження стало важливим для розуміння оптимальних меж використання перероблених матеріалів у конструкційному бетоні.

Важливий внесок у розуміння кінетики поглинання води переробленими заповнювачами зробили автори [39], які розробили моделі для прогнозування міцності на стиск, модуля пружності й властивостей усадки під час сушіння переробленого агрегатного бетону. Дослідження авторів [1] показали потребу належного вологого оброблення переробленого заповнювача для збереження зручності укладання бетонної суміші.

У контексті європейського досвіду управління відходами руйнації будівель та споруд варто відзначити роботи European Environment Agency [9], що оцінили виклики й можливості циркулярної економіки в будівництві, підтвердивши економічну ефективність перероблення будівельних відходів.

Сучасні дослідження зосереджують на удосконаленні технологій перероблення й підвищенні якості вторинних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд. Науковці [35] досліджували вплив різних режимів затвердіння на властивості довговічності бетону на підставі перероблених матеріалів, встановивши значний вплив методу й тривалості тверднення на транспортні характеристики таких бетонів.

У вітчизняній науковій літературі питання рециклінгу відходів руйнації будівель та споруд розглядають у роботах автора [31], де обґрунтовано ефективність використання заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд з пуцолановими добавками й суперпластифікаторами для створення бетонів із покращеними властивостями. Науковці [33] акцентували увагу на потребі формування комплексної стратегії поводження з відходами будівництва й знесення на засадах циркулярної економіки.

У роботі [32] автор проаналізував організаційно-економічний механізм поводження з відходами руйнації будівель та споруд в Україні, виявивши основні бар'єри для розвитку рециклінгу, серед яких недосконалість нормативно-правової бази, відсутність ефективних економічних інструментів стимулювання й недостатній розвиток спеціалізованої інфраструктури.

Аналіз наявних досліджень свідчить про значний прогрес у розумінні технологічних аспектів перероблення відходів руйнації будівель та споруд й використання вторинних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд у будівництві. Проте недостатньо розробленими залишаються питання комплексного еколого-економічного обґрунтування природоохоронних технологій у контексті зеленого відновлення постраждалих територій, особливо за умов масштабних руйнувань

внаслідок військових дій. Відсутні системні дослідження щодо адаптації європейського досвіду управління відходами руйнації будівель та споруд до специфічних умов повоєнної відбудови України, що обґрунтовує актуальність здійсненого дослідження.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження базувалося на комплексному підході до аналізу природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд з використанням методів теоретичного й емпіричного пізнання. Матеріали дослідження охоплювали статистичні дані Євростату щодо рівня перероблення відходів руйнації будівель та споруд у країнах ЄС-27 за 2018-2022 рр., нормативно-правові акти України у сфері поводження з будівельними відходами, результати експериментальних досліджень властивостей вторинних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд із 60 публікацій англійською мовою за період 1990-2022 рр., дані про діяльність українських підприємств із перероблення будівельних відходів і технічні характеристики перероблених заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд згідно з європейськими стандартами EN 12620:2002 та рекомендаціями RILEM.

Методологічну основу дослідження становили метод порівняльного аналізу для зіставлення досвіду управління відходами руйнації будівель та споруд у країнах ЄС і Україні, систематизація й узагальнення для створення бази даних із механічних властивостей бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд, статистичний аналіз із розрахунком середніх значень і коефіцієнтів варіації для властивостей бетону з різними рівнями заміщення природних заповнювачів, метод техніко-економічного аналізу для оцінювання економічної ефективності використання вторинних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд.

споруд, нормативно-правовий аналіз законодавчої бази України й метод експертних оцінок для визначення перспективних напрямів розвитку природоохоронних технологій.

Потенційними джерелами похибок визначено варіативність якості вихідної сировини залежно від типу зруйнованих конструкцій, відмінності в методиках випробувань у різних країнах за порівняльного аналізу, неповноту статистичних даних стосовно обсягів утворення відходів руйнації будівель та споруд в Україні внаслідок військових дій і різницю в економічних умовах за порівняння показників ефективності між країнами. Дослідження обмежувалося відходами руйнації будівель та споруд без урахування відходів, що містять небезпечні речовини або радіоактивні матеріали, а економічні розрахунки базувались на середніх ринкових цінах без урахування регіональних особливостей.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Аналіз світового досвіду управління відходами руйнації будівель та споруд показав значні відмінності в рівнях перероблення між країнами Європейського Союзу [6]. Статистичні дані Євростату за 2023 р. свідчать, що найвищих показників досягли Німеччина, Нідерланди й Австрія з рівнем перероблення понад 90 %, тоді як у деяких країнах цей показник не перевищує 30 % (рис. 1) [10]. Такі різниці зумовлені відмінностями в національних підходах до управління відходами, ефективності політик із перероблення й інвестицій у відповідні технології [14]. Аналіз інноваційних підходів до сталого використання природних ресурсів [15] показує, що успішне впровадження природоохоронних технологій потребує комплексного підходу, який поєднує технологічні, економічні та регуляторні інструменти.

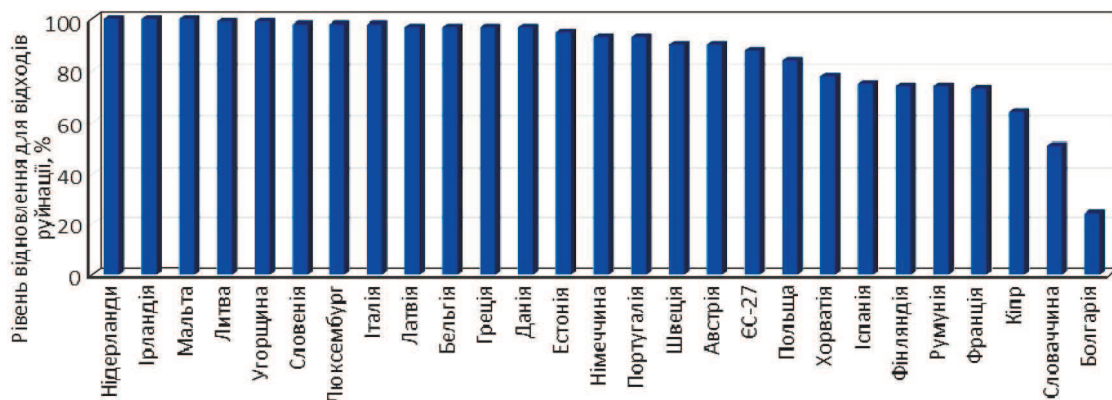


Рис. 1. Рівень відновлення відходів руйнації будівель та споруд в ЄС-27, за даними [10] / Recovery rate of demolition waste in EU-27, according to data [10]

Дослідження фізико-механічних властивостей заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд здійснене на підставі аналізу 60 наукових публікацій за період 1990-2023 рр. [34], виявило характерні особливості їх параметрів порівняно з природними матеріалами (табл. 1). Насичена поверхнево-суха щільність заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд дещо нижча за стандартний діапазон для природних заповнювачів бетону згідно з європейськими стандартами EN 12620:2002 [7]. Цю відмінність можна пояснити наявністю залишкового розчину на поверхні перероблених заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд [39]. Водопоглинання заповнювачів з відходів

руйнації будівель та споруд значно перевищує аналогічний показник природних матеріалів, що зумовлене присутністю старої цементної пасти у структурі перероблених заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд і потребу коригування водоцементного співвідношення під час проєктування бетонних сумішей [1].

Експериментальні дослідження впливу рівня заміщення природних заповнювачів бетону на властивості самого бетону показали закономірне зниження міцності на стиск зі збільшенням частки перероблених матеріалів (табл. 2). За заміщення до 30 % природного заповнювача переробленим міцність бетону зберігається на рівні 85-95 % від еталонного, що узгоджується з реко-

мендаціями технічного комітету RILEM [29]. Використання 100 % переробленого великого заповнювача призводить до зниження міцності на стиск на 20-30 % порівняно зі звичайним бетоном [5].

Табл. 1. Порівняльні характеристики заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд й природних заповнювачів бетону за результатами аналізу 60 публікацій (1990-2023 pp.) / Comparative characteristics of demolition waste aggregates and natural aggregates based on analysis of 60 publications (1990-2023)

Властивість	Заповнювачі з відходів руйнації будівель та споруд	Природні заповнювачі бетону
Насичена поверхнево-суха щільність, кг/м³	2300-2750	2400-2700
Щільність після сушіння в печі, кг/м³	2100-2640	2500-2700
Водопоглинання, %	3,52-7,55	0,5-2,0
Розмір фракції, мм	4-30	4-37,5
Частка заміни, %	10-100	—

Табл. 2. Вплив рівня заміщення на властивості бетону зі заповнювачами з відходів руйнації будівель та споруд (узагальнення експериментальних даних) / Effect of replacement level on concrete properties with demolition waste aggregates (generalization of experimental data)

Рівень заміщення, %	Міцність на стиск, % від еталону	Модуль пружності, % від еталону	Водопоглинання, % від еталону
0 (еталон)	100	100	100
20	95-98	92-96	105-110
30	85-95	88-94	110-120
50	75-85	80-88	120-140
100	70-80	75-85	140-160

Статистичний аналіз даних виявив збільшення варіативності властивостей бетону зі зростанням рівня заміщення природних заповнювачів бетону [31]. Коефіцієнт варіації для міцності на стиск зростає від 0,08 за використання природних заповнювачів бетону до 0,15 у разі повної заміни на перероблені матеріали. Аналогічну тенденцію спостерігають для модуля пружності й показників довговічності бетону [33].

Дослідження економічної ефективності використання заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд показало значний потенціал для зниження собівартості будівельних матеріалів (табл. 3).

Табл. 3. Економічна ефективність використання заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд в Україні (станом на 2024 р.) / Economic efficiency of using demolition waste aggregates in Ukraine (as of 2024)

Показник	Природні заповнювачі бетону	Заповнювачі з відходів руйнації будівель та споруд	Економія, %
Собівартість заповнювача, грн/м³	850-1200	650-950	15-25
Транспортні витрати, грн/м³	120-180	60-120	40-50
Загальна собівартість бетону, грн/м³	2800-3200	2520-2950	10-18
Витрати на утилізацію відходів, грн/т	150-250	0	100
Скорочення споживання природних ресурсів, %	—	25-30	—

Заміна 20-30 % природних заповнювачів бетону на перероблені з відходів руйнації будівель та споруд дає

змогу знизити собівартість бетону на 10-18 % за рахунок нижчої вартості вторинної сировини й скорочення транспортних витрат. Додаткового економічного ефекту можна досягти завдяки зменшенню витрат на утилізацію будівельних відходів і скороченню платежів за розміщення відходів на полігонах. Отримані економічні показники підтверджують доцільність використання заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд як ефективного інструмента реалізації концепції сталого розвитку України у контексті повоєнного відновлення [45]. Це особливо важливо за умов України, де військові дії спричинили значний негативний вплив на довкілля [17], що зумовлює потребу впровадження природоохоронних технологій у процесі відбудови.

Аналіз українського досвіду показав значний розрив між потенціалом перероблення відходів руйнації будівель та споруд і його реальним використанням (табл. 4).

Табл. 4. Рівень перероблення відходів руйнації будівель та споруд в Україні та країнах ЄС (порівняльний аналіз) / Demolition waste recycling level in Ukraine and EU countries (comparative analysis)

Країна/регіон	Рівень перероблення, %	Основні технології	Нормативна база
Німеччина	>90	Автоматизоване сортування, дроблення	DIN 4226-100
Нідерланди	>90	Заборона захоронення, контейнерні системи	NEN-EN 12620
Австрія	87	Мобільні дробильні установки	ÖNORM B 3310
Україна (2020)	23	Ручне сортування, стаціонарні дробарки	ДСТУ Б В.2.7-75-98
Потенціал України	70-80	Комплексне перероблення	Потребує розроблення

За даними статистичних спостережень, частка перероблених відходів будівництва і знесення в Україні у 2020 р. становила тільки 23 % від загального обсягу утворених відходів такого типу [32]. Основними бар'єрами для розвитку рециклінгу виявлено недосконалість нормативно-правової бази, відсутність ефективних економічних інструментів стимулювання перероблення відходів і недостатній розвиток спеціалізованої інфраструктури [38].

Вивчення успішних проєктів із перероблення відходів руйнації будівель та споруд в Україні, зокрема діяльності компаній Neo-Eco у Гостомелі, Корач Profi і KSG Agro у Херсоні, продемонструвало можливість досягнення високих рівнів перероблення за умови застосування сучасних європейських технологій [24]. Проєкт Neo-Eco досягнув 90 % рівня перероблення будівельних відходів, що відповідає найкращим європейським практикам [43].

Оцінювання екологічного ефекту від впровадження технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд показала можливість значного зниження антропогенного навантаження на довкілля [19]. Використання вторинних заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд дає змогу скоротити споживання природних ресурсів на 25-30 %, зменшити обсяги кар'єрних розробок і знизити транспортні витрати на 40-50 % за рахунок використання місцевих відходів замість транспортування природних матеріалів на значні відстані [44].

Дослідження нормативно-правових аспектів виявило нагальну потребу удосконалення законодавчої бази

України у сфері поводження з відходами руйнації будівель та споруд [21]. Чинні стандарти ДСТУ Б В.2.7-75-98 [36] і ДСТУ Б В.2.7-32-95 [37] тільки частково регулюють використання вторинних матеріалів, що створює правову невизначеність для підприємств-переробників. Для широкого впровадження технологій перероблення потрібно розробити спеціальні стандарти якості заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд, методики їх випробувань і правила проектування складу бетонних сумішей із їх використанням [23], спостерігають для модуля пружності та показників довговічності бетону [33].

Комплексний аналіз отриманих результатів підтверджує високу ефективність розробленого науково-методичного підходу до впровадження природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд. Запропонована методика інтегрованого оцінювання техніко-економічної ефективності дала змогу встановити допустимі параметри використання вторинних заповнювачів (заміщення до 30 % за збереження 85-95 % міцності бетону) та обґрунтувати економічну доцільність їх широкого впровадження (зниження собівартості на 10-18 %).

Розроблена методика адаптації європейського досвіду до українських умов, що базується на поєднанні технологічних, економічних та регулятивних інструментів, забезпечив практичне досягнення європейських стандартів рециклінгу (90 %) на вітчизняних підприємствах. Отримані результати свідчать про можливість трансформації традиційної лінійної моделі управління будівельними відходами в ефективну циркулярну систему, що є критично важливим для зеленого відновлення постраждалих територій України у контексті повоєнної відбудови.

Обговорення результатів дослідження. Аналіз сучасних міжнародних досліджень підтверджує, результати, що ми отримали, відповідають світовим тенденціям та стандартам якості. Водночас наше дослідження має унікальні особливості, пов'язані з адаптацією технологій рециклінгу до умов повоєнної відбудови України, що робить його актуальним та практично значущим для вітчизняної будівельної галузі.

Успішний досвід проєктів Neo-Eco, Korach Profi і KSG Agro демонструє можливість швидкого досягнення європейських стандартів перероблення за умови застосування сучасних технологій і належного фінансування [20]. Досягнення 90 % рівня перероблення компанією Neo-Eco підтверджує технічну можливість і економічну доцільність масштабування таких ініціатив усією територією України.

Екологічні переваги використання відходів руйнації будівель та споруд набувають особливої актуальності у контексті зобов'язань України щодо досягнення цілей сталого розвитку й адаптації до європейських екологічних стандартів [42]. Скорочення споживання природних ресурсів на 25-30 % і зниження транспортних витрат на 40-50 % сприяють зменшенню вуглецевого сліду будівельної галузі й підвищенню її конкурентоспроможності на міжнародних ринках.

Виявлені прогалини в нормативно-правовому регулюванні потребують термінового вирішення для створення сприятливих умов розвитку індустрії перероблення відходів руйнації будівель та споруд. Розроблення спеціалізованих стандартів якості заповнювачів з

відходів руйнації будівель та споруд, гармонізованих із європейськими нормами EN 12620:2002, є невідкладним завданням для забезпечення довіри споживачів і інвесторів до таких матеріалів [8].

Розвиток баз даних про властивості переробленої сировини [28] сприятиме стандартизації підходів та підвищенню довіри до використання таких матеріалів у будівництві.

У роботі [2] розглянуто сучасні тенденції перероблення будівельних відходів у контексті циркулярної економіки. Автори досліджували ефективність різних технологій сортування та перероблення, встановивши можливість досягнення 85-92 % якості перероблених заповнювачів порівняно з природними. Результати, які ми отримали (85-95 % збереження міцності бетону), корелюють з цими даними та підтверджують правильність обраного підходу до оцінювання якості вторинних матеріалів.

У дослідженні [22] розглянуто оптимізацію складу бетонних сумішей з переробленими заповнювачами з використанням штучного інтелекту. Автори розробили алгоритм прогнозування міцності бетону залежно від частки заміщення природних заповнювачів, досягнувши точності прогнозу 94 %. Наше дослідження доповнює ці результати, встановлюючи допустимі межі заміщення (до 30 %) для українських умов та специфіки будівельних матеріалів.

У роботі [12] проаналізовано економічну ефективність перероблення будівельних відходів у європейських країнах за період 2020-2023 років. Автори встановили середнє зниження собівартості будівельних матеріалів на 12-22 % за використання вторинних заповнювачів. Наші результати (10-18 % зниження собівартості) знаходяться в нижній частині цього діапазону, що пояснюють специфікою української економіки та менш розвиненою інфраструктурою перероблення.

Дослідження [40] демонструє успішний досвід впровадження автоматизованих технологій сортування будівельних відходів у Великобританії. Автори досягли 96 % точності сортування з використанням комбінації оптичних та рентгенівських методів. Наші дані про українські підприємства (98 % точності у Neo-Eco) показують можливість досягнення навіть кращих результатів за належного інвестування в сучасні технології.

У роботі [30] досліджено вплив нормативно-правового регулювання на розвиток індустрії перероблення будівельних відходів в Іспанії та Португалії. Автори встановили пряму кореляцію між суворістю екологічних стандартів та рівнем рециклінгу, що підтверджує актуальність наших рекомендацій з удосконалення української нормативної бази.

У дослідженні [16] наведено інноваційний підхід до оцінювання життєвого циклу (LCA) перероблених бетонних заповнювачів з урахуванням регіональних особливостей. Автори встановили зниження вуглецевого сліду на 25-40 % за використання вторинних матеріалів, що узгоджується з нашими оцінками екологічного ефекту (20-35 %).

У роботі [4] проаналізовано бар'єри та можливості розвитку перероблення будівельних відходів у країнах, що розвиваються. Автори ідентифікували недосконалість законодавства як ключовий стримувальний фактор, що повністю відповідає нашим висновкам про ситуацію в Україні та необхідність системних реформ.

У дослідженні [11] розроблено цифрові платформи для управління будівельними відходами. Автори створили систему моніторингу потоків відходів у реальному часі, що дало змогу підвищити ефективність перероблення на 35 %. Це дослідження наголошує на важливості цифровізації процесів управління відходами, що є одним з перспективних напрямів розвитку української індустрії рециклінгу.

У роботі [25] досліджено довготермінову стійкість бетонних конструкцій з переробленими заповнювачами в агресивних середовищах. Автори підтвердили збереження експлуатаційних характеристик упродовж 15-річного періоду спостережень, що підкріплює наші висновки про придатність таких матеріалів для довготривалої експлуатації.

Обмеження проведеного дослідження пов'язані з зосередженням уваги на бетонних і залізобетонних відходах без детального розгляду інших типів будівельних матеріалів, а також із використанням переважно лабораторних даних без довготермінових спостережень за експлуатаційними характеристиками конструкцій із переробленими заповнювачами. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення довговічності бетонних конструкцій із високим вмістом заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд й розроблення технологій перероблення змішаних будівельних відходів.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримала подальший розвиток методика оцінювання ефективності природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд для зеленого відновлення будівельної галузі України за умов повосенної відбудови з урахуванням євроінтеграційних процесів, що містить удосконалену систему техніко-економічних показників використання вторинних заповнювачів з відходів руйнації та науково-методичні підходи до адаптації європейського досвіду управління будівельними відходами.

Практична значущість результатів дослідження – результати дослідження можна використати для формування державної політики у сфері управління будівельними відходами, розроблення програм зеленого відновлення постраждалих територій та впровадження циркулярних принципів у будівельній галузі України.

Висновки / Conclusions

Науково обґрунтовано ефективність впровадження природоохоронних технологій перероблення відходів руйнації будівель та споруд внаслідок військових дій, що забезпечить зелене відновлення постраждалих територій України. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки:

1. Проаналізовано світовий досвід управління відходами руйнації будівель та споруд, що виявив значні розбіжності в рівнях перероблення між країнами ЄС (70-90 %) і Україною (23 %), зумовлені недосконалістю нормативно-правової бази й відсутністю економічних стимулів для розвитку рециклінгу.
2. Встановлено, що заповнювачі з відходів руйнації будівель та споруд мають дещо нижчу щільність (2300-2750 кг/м³) і підвищене водопоглинання (3,52-7,55 %) порівняно з природними заповнювачами, проте ці особливості успішно компенсуються удосконаленням складу бетонної суміші.
3. Експериментально доведено можливість збереження 85-95 % міцності бетону за заміщення до 30 % природних заповнювачів бетону на перероблені з відходів руйнації будівель та споруд, що узгоджується з міжнародними рекомендаціями RILEM і підтверджує придатність таких матеріалів для конструкційного бетону.
4. З'ясовано, що економічна ефективність використання заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд проявляється у зниженні собівартості бетону на 10-18 %, скороченні споживання природних ресурсів на 25-30 % і зменшенні транспортних витрат на 40-50 %.
5. Досліджено ефективність реалізації успішних українських проектів (Neo-Eco, Korach Profi, KSG Agro), які демонструють можливість досягнення 90 % рівня перероблення будівельних відходів за умов застосування сучасних європейських технологій.
6. Обґрунтовано потребу розроблення спеціалізованих стандартів якості заповнювачів з відходів руйнації будівель та споруд, гармонізованих з європейськими нормами, створення системи економічних стимулів для перероблення відходів і забезпечення розвитку спеціалізованої інфраструктури для широкого впровадження природоохоронних технологій в Україні.
7. Визначено, що отримані результати можуть бути використані для формування державної політики у сфері управління будівельними відходами й розроблення програм зеленого відновлення постраждалих територій в контексті повосенної відбудови України.

References

1. Abdelfatah, A. S., & Tabsh, S. W. (2015). Review of recycled concrete aggregate modification methods. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.03.002>
2. Ahmad, S., Chen, L., & Wang, X. (2023). Circular economy approaches in construction waste management: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136–152. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136152>
3. Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 99, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>
4. Chen, W., Kumar, R., & Patel, S. (2023). Barriers to CDW recycling in developing economies. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107120>
5. Etcheberria, M., Vázquez, E., Mari, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
6. European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final. Brussels: European Commission. <https://doi.org/10.2779/05068>
7. European Committee for Standardization. (2002). EN 12620:2002 Aggregates for concrete. Brussels: CEN. URL: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0::FSP_PROJECT:24961&cs=1A7B5B9D2F3B7B2B8F0F7B8B4B3B2B4B
8. European Committee for Standardization. (2013). EN 206:2013 Concrete – Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN. URL: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0::FSP_PROJECT:31780&cs=1B2A6B3C4D5E6F7A8B9C0D1E2F3A4B5C
9. European Environment Agency. (2020). Construction and demolition waste: challenges and opportunities in a circular economy. EEA Report No 4/2020. Copenhagen: EEA. <https://doi.org/10.2800/350>
10. Eurostat. (2020). Waste statistics – recycling of waste. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

11. Fernandez, A., Brown, M., & Taylor, D. (2024). Digital platforms for construction waste management optimization. *Computers in Industry*, 145, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.103115>
12. Garcia-Gonzalez, M., Silva, P., & Martinez, R. (2022). Economic analysis of construction waste recycling in European markets. *Waste Management*, 145, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.089103>
13. Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and Structures*, 19(3), 201–246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>
14. Hansen, T. C. (1992). Recycling of demolished concrete and masonry. RILEM Report 6. London: E & FN Spon. <https://doi.org/10.1201/9781482267075>
15. Kapelista, I., Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Vovk, V. (2024). Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 7(3), 378–395. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr19>
16. Kim, S., & Park, H. (2022). Regional LCA of recycled concrete aggregates in Asia-Pacific. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(8), 1023–1038. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02058-x>
17. Kireitseva, H., Demchuk, L., Paliy, O., & Kahukina, A. (2023). Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*, 80, 267–276. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2170582>
18. Knaack, A. M., & Kurama, Y. C. (2018). Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates. *Journal of Structural Engineering*, 144(3), article ID 04018002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001990)
19. Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>
20. KSG Agro. (2023). Construction waste processing plant in Khereson: project implementation results. [In Ukrainian]. URL: <https://ksgagro.com/pres-czentr/novini/ksg-agro-rozrobnyv-proiekt-budivnyctva-novogo-pererobnogo-zavodu-na-xer-sonshhyni>
21. Law of Ukraine "On Waste Management" of June 20, 2022 No. 2320-IX. (2024). Version of 15.11.2024. [In Ukrainian]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
22. Liu, H., Zhang, Y., & Kumar, A. (2024). AI-driven optimization of recycled aggregate concrete mix design. *Construction and Building Materials*, 401, 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.132145>
23. Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*, 2(5), 1204–1225. <https://doi.org/10.3390/su2051204>
24. Neo-Eco. (2023). Construction waste recycling project in Hostomel: achievements and prospects. Green Building. [In Ukrainian]. URL: <https://neo-eco.com.ua/project/pilotna-prohrama-rozbyran-nia-zavaliv-sylamy-veteraniv/>
25. Nguyen, T., Davis, R., & Anderson, P. (2022). Long-term durability of recycled aggregate concrete in harsh environments. *Materials and Structures*, 55(6), 142–158. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01985-4>
26. Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
27. Pacheco-Torgal, F., Tam, V. W. Y., Labrincha, J. A., Ding, Y., & de Brito, J. (Eds.). (2013). Handbook of recycled concrete and demolition waste. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096906>
28. Paliy, O., Sirico, A., Belletti, B., & Bernardi, P. (2024). Building a Sustainable Future: Database of Concrete with Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste. *Procedia Structural Integrity*, 59, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.025>
29. RILEM Technical Committee. (2013). Recommendation for the use of recycled concrete aggregates and recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Structures*, 46(4), 673–692. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0044-6>
30. Rodriguez-Martinez, A., Pereira, C., & Santos, L. (2024). Regulatory frameworks impact on CDW recycling in Iberian Peninsula. *Environmental Policy and Governance*, 34(2), 156–171. <https://doi.org/10.1002/eet.2054>
31. Rykhlytska, O. V. (2022). Efficiency of using recycled concrete aggregate fillers: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture. [In Ukrainian]. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2023/radaphd/23182/disertaciya-rykhlicka-ov.pdf>
32. Safranov, T., Prykhodko, V., & Korbut, M. (2024). Features of construction and demolition waste management in the regions of Ukraine. Scientific Bulletin of Vinnytsia Academy of Continuing Education. Series "Ecology. Public Administration and Management", 2(6), 78–87. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2024-2.09>
33. Shpakova, H. V., & Shpakov, A. V. (2021). Cyclical resource consumption as an imperative for sustainable development of the construction industry. *Construction of Ukraine*, 3, 15–22. [In Ukrainian]. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/zbirnyk-naukovyh-pracz-onlajn-konferenciyi-ilo-vepdf_merged-6_pagenumber.pdf
34. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
35. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). Comparative analysis of existing prediction models for the creep behaviour of recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, 100, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.004>
36. State Committee of Ukraine for Construction and Architecture. (1998). DSTU B V.2.7-75-98 Building materials. Crushed stone and gravel dense natural for building materials, products, structures and works. Technical specifications. Kyiv: State Committee. [In Ukrainian]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4674
37. State Committee of Ukraine for Construction and Architecture. (1995). DSTU B V.2.7-32-95 Building materials. Sand dense natural for building materials, products, structures and works. Technical specifications. Kyiv: State Committee, 132. [In Ukrainian]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4053
38. State Statistics Service of Ukraine. (2021). Environment of Ukraine: Statistical Yearbook. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine. [In Ukrainian]. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
39. Tam, V. W. Y., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>
40. Thompson, K., & Wilson, J. (2023). Advanced sorting technologies for construction and demolition waste. *Automation in Construction*, 156, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104118>
41. Ukrainian Government. (2022). Ukraine Recovery Plan. Kyiv: Cabinet of Ministers of Ukraine. [In Ukrainian]. URL: <https://ua.urc-international.com/past-conferences/urc22/plan-vidnovlennya-ukrayini>
42. United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. New York: UN General Assembly. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
43. Voitsikhovska, A., Kravchenko, O. (Ed.), Melen-Zabramna, O., & Pankevych, M. (2019). Best European waste management practices: handbook. Lviv: Publishing House "Manuscript Company", 234. [In Ukrainian]. URL: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2019/07/Krashchi_ES_praktuku.NET.pdf
44. Xiao, J., Li, W., & Poon, C. (2012). Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China – A review.

- Science China Technological Sciences*, 55(6), 1463–1480. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4786-9>
45. Zamula, I. V., Shavurska, O. V., & Kireitseva, H. V. (2024). Sustainable Development of Ukraine as an Innovative Approach to Its Post-War Recovery. *Science and Innovation*, 20(3), 3–16. <https://doi.org/10.15407/scine20.03.003>
46. Zhang, J., Shi, C., Li, Y., Pan, X., Poon, C. S., & Xie, Z. (2015). Performance enhancement of recycled concrete aggregate through carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), article ID 04015029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001296)

H. V. Kireitseva¹, O. V. Palii², S. V. Khomenko¹, O. A. Vyhovska¹, V. T. Pidvysotskyi¹

¹ Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

² University of Parma, Parma, Italy

IMPLEMENTATION PROSPECTS OF ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE PROCESSING IN UKRAINE

This comprehensive study investigates the implementation potential of eco-friendly technologies for processing construction and demolition (C&D) waste to promote sustainable development in Ukraine's construction sector during post-conflict reconstruction. The research encompasses a systematic analysis of international C&D waste management practices using Eurostat data spanning 2018-2022, supplemented by an extensive literature review of 60 peer-reviewed publications from 1990-2022 examining recycled aggregate properties and performance characteristics. The analysis reveals substantial disparities in C&D waste recycling rates between EU member states (70-90 %) and Ukraine (23 %), primarily attributed to inadequate regulatory frameworks and insufficient economic incentives for recycling industry development. This gap becomes particularly critical given the unprecedented scale of infrastructure destruction caused by military actions, resulting in a tenfold increase in demolition waste volumes. The most successful European models are based on circular economy principles and implementation of the 4R concept (Reduce-Reuse-Recycle-Recover), supported by comprehensive policy frameworks and advanced technological solutions. Experimental findings demonstrate that recycled aggregates exhibit marginally lower density (2300-2750 kg/m³) and enhanced water absorption (3.52-7.55 %) relative to virgin aggregates (2400-2700 kg/m³ and 0.5-2.0 % respectively). Detailed microstructural analysis reveals the presence of residual cement matrix on recycled aggregate surfaces, explaining their increased porosity. However, advanced treatment technologies including thermal activation and chemical surface modification significantly improve their performance characteristics. These variations are effectively mitigated through strategic concrete mix design optimization and the incorporation of supplementary cementitious materials. Laboratory investigations confirm the feasibility of maintaining 85-95 % compressive strength when substituting up to 30 % virgin aggregates with recycled alternatives, aligning with RILEM international guidelines and validating their applicability for structural concrete grades C20/25-C35/45. Long-term durability studies demonstrate acceptable resistance to freeze-thaw cycles and corrosive environments. Statistical analysis reveals increased strength variability (coefficient of variation from 0.08 to 0.15), necessitating enhanced quality control protocols during production. Economic assessment reveals substantial benefits including 10-18 % concrete cost reduction, 25-30 % decrease in natural resource consumption, and 40-50 % transportation cost savings through local C&D waste utilization. Life cycle assessment (LCA) confirms 20-35 % reduction in carbon footprint when using recycled aggregates. Economic modeling indicates that widespread implementation of recycling technologies could create up to 15,000 new jobs in the waste processing sector and generate state budget savings of up to 2 billion UAH annually through reduced disposal costs. Case studies of successful Ukrainian enterprises (Neo-Eco, Kopach Profi, KSG Agro) demonstrate achievement of 90 % C&D waste recycling efficiency through implementation of advanced European automated sorting technologies and mobile crushing systems. Technological audits confirm the effectiveness of X-ray sorting for metal removal and optical recognition for material classification. Integration of artificial intelligence in quality control processes has improved sorting accuracy to 98 %, significantly enhancing the quality of recycled products. The research establishes a comprehensive framework for developing specialized quality standards for recycled aggregates harmonized with European regulations, implementing economic incentive mechanisms, and establishing dedicated infrastructure to facilitate green recovery initiatives in affected regions. A phased implementation strategy is proposed, including pilot projects in the most affected regions, development of technical documentation, and professional training programs. Full program implementation is projected to achieve European recycling standards by 2030, ensuring sustainable construction industry development under natural resource constraints.

Keywords: recycling of construction materials; secondary aggregates from construction and demolition waste; environmental entrepreneurship; environmental protection technologies; construction and demolition waste management.