

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

ПАЛІЙ Ольга Вікторівна

УДК 628.4:504.05:666.972.12

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА РАХУНОК
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЦИКЛІНГУ ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ У
ВИРОБНИЦТВО БЕТОНУ**

Спеціальність 101 – екологія
Галузь знань – 10 – природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О.В. Палій

Науковий керівник: **ПАЦЕВА Ірина Григорівна**, професор, доктор технічних наук.

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Палій О.В. Підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія» (10 – Природничі науки). – Державний університет «Житомирська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Житомир, 2024.

Дисертацію присвячено надзвичайно актуальній проблемі розробки комплексної системи управління відходами руйнації для зменшення негативного впливу на довкілля та впровадженню принципів сталого розвитку і циркулярної економіки в будівельній галузі України. В умовах масштабних руйнувань внаслідок військової агресії, питання ефективного поводження з будівельними відходами набуває критичного значення як з точки зору відновлення інфраструктури, так і з огляду на мінімізацію екологічних ризиків.

Актуальність дисертаційної роботи полягає у розв'язанні наукової проблеми щодо використання відходів руйнації як цінної вторинної сировини, зокрема у виробництві бетону.

У роботі здійснено ґрунтовний аналіз поточного стану проблеми відходів руйнації в контексті військових дій на території України. Наведено статистичні дані щодо масштабів руйнувань житлового фонду, інфраструктурних та промислових об'єктів у різних регіонах. Проаналізовано динаміку утворення відходів руйнації та прогнозовані обсяги в найближчій перспективі. Аргументовано, що традиційні підходи до поводження з будівельними відходами, такі як захоронення чи спалювання, є неприйнятними з економічної та екологічної точки зору, особливо в умовах дефіциту ресурсів та необхідності швидкого відновлення зруйнованих територій.

Проведено комплексний аналіз існуючих теоретичних підходів та практик управління відходами руйнації в Україні та світі. Розглянуто нормативно-правову

базу, організаційні механізми, технологічні рішення та інфраструктуру. Вивчено досвід країн ЄС щодо впровадження концепції "нульових відходів" та досягнення високих рівнів рециклінгу будівельних відходів. Виявлено основні бар'єри та прогалини в існуючій системі управління відходами в Україні, зокрема недосконалість законодавства, брак потужностей з переробки, низький рівень обізнаності та залученості стейкхолдерів.

Значну увагу в роботі приділено дослідженню впливу відходів руйнації на стан довкілля. Проаналізовано основні механізми негативного впливу, такі як забруднення ґрунтів, водних ресурсів, атмосферного повітря внаслідок неконтрольованого розміщення та поводження з відходами. Розглянуто ризики для здоров'я населення, пов'язані з потраплянням небезпечних речовин у навколишнє середовище. Обґрунтовано необхідність впровадження сучасних методів сортування, переробки та безпечної утилізації відходів руйнації для мінімізації екологічної шкоди.

Окремий розділ дисертації присвячено детальному аналізу можливостей використання відходів руйнації як вторинної сировини у виробництві будівельних матеріалів, зокрема бетону. Проведено огляд сучасних наукових досліджень та практичного досвіду застосування заповнювачів з рециклінгу бетону в контексті сталого будівництва. Розглянуто історію розвитку технологій переробки будівельних відходів, починаючи з післявоєнного періоду ХХ століття. Проаналізовано ключові властивості перероблених заповнювачів порівняно з природними, такі як щільність, водопоглинання, міцність, хімічний склад тощо. Висвітлено основні технологічні аспекти процесу рециклінгу бетону, включаючи методи дроблення, фракціонування, видалення домішок.

Експериментальна частина роботи присвячена розробленню та оптимізації рецептур бетонних сумішей із застосуванням заповнювачів з відходів руйнації. Для дослідження використано цемент марки СЕМ ІІ/А-LL 42.5 R, річковий пісок як дрібний заповнювач, гранітний щебінь як природний крупний заповнювач, а також перероблений бетон двох фракцій як альтернативний крупний заповнювач.

Проведено оцінку властивостей компонентів, таких як зерновий склад, насипна щільність, водопоглинання. Розроблено три базові склади бетонної суміші: контрольний без використання відходів, з 25% та 50% заміною природного щебню на бетон із матеріалів вторинної переробки. Всі суміші було виготовлено та досліджено в лабораторних умовах із забезпеченням нормованих показників легкоукладальності та міцності.

На основі експериментальних даних досліджено вплив додавання заповнювачів з відходів руйнації на механічні, фізичні та довговічні властивості бетону. Встановлено, що часткова заміна природного щебню на перероблений бетон до 50% не призводить до істотного зниження міцності на стиск та інших ключових показників. При цьому спостерігається деяке підвищення водопоглинання та капілярного підсосу внаслідок підвищеної пористості рециклінгових заповнювачів. Обґрунтовано доцільність використання добавок пластифікаторів та активних мінеральних компонентів для компенсації негативних ефектів та оптимізації складу бетонних сумішей.

Значну увагу приділено дослідженню довговічності бетону з рециклінговими заповнювачами в умовах агресивних впливів. Проаналізовано процеси проникнення хлоридів та карбонізації в залежності від складу бетонної суміші. Визначено коефіцієнти дифузії хлоридів та глибину карбонізації для різних рецептур. Встановлено, що підвищена пористість перероблених заповнювачів може сприяти прискоренню корозійних процесів арматури. Запропоновано шляхи підвищення довговічності бетону з відходами руйнації, такі як обмеження максимального вмісту рециклінгового щебню, зниження водоцементного відношення, використання добавок-інгібіторів корозії.

У роботі вперше для умов України застосовано методологію оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment) для порівняння екологічного впливу традиційного бетону та бетону з додаванням рециклінгових матеріалів. Обґрунтовано переваги підходу LCA, що дозволяє врахувати вплив на довкілля на всіх етапах - від видобутку сировини до кінцевої утилізації. Розроблено модель

життєвого циклу бетону з урахуванням стадій виробництва компонентів, транспортування, приготування суміші, експлуатації конструкцій та можливих сценаріїв поводження з відходами після закінчення терміну служби. Проведено збір даних щодо матеріальних та енергетичних потоків, викидів та відходів на всіх етапах. На основі розрахунків показано, що використання рециклінгових заповнювачів дозволяє суттєво знизити вплив на всіх стадіях за рахунок економії природної сировини, зменшення енергоємності видобутку та переробки, скорочення викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин. Наведено порівняльний аналіз ключових показників впливу для варіантів складу бетону, що продемонстрував екологічні переваги використання вторинних заповнювачів.

На основі отриманих результатів розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації рецептур бетону з рециклінговими матеріалами для забезпечення необхідної міцності та довговічності конструкцій. Запропоновано стратегію поетапного впровадження принципів циркулярної економіки в будівельній галузі України з урахуванням екологічних, економічних та соціальних аспектів. Розроблено концептуальну модель комплексної системи управління відходами руйнації, що включає організаційні, технологічні, економічні та інформаційні механізми. Визначено перспективні напрями подальших досліджень проблематики відходів руйнації, такі як розширення номенклатури рециклінгових матеріалів, вдосконалення нормативної бази, розробка регіональних програм та схем поводження з відходами, створення інформаційних систем та баз даних.

Загалом, дисертаційна робота є комплексним дослідженням, що пропонує науково обґрунтовані підходи до ефективного використання відходів руйнації для виробництва екологічно безпечних будівельних матеріалів. Отримані результати мають вагомe значення для відновлення зруйнованої інфраструктури України на засадах сталого розвитку з мінімізацією впливу на довкілля. Запропоновані рішення сприятимуть раціональному використанню ресурсів, зменшенню обсягів відходів та викидів, покращенню екологічної ситуації в регіонах. Подальше впровадження розроблених підходів та рекомендацій дозволить суттєво підвищити

рівень екологічної безпеки, стимулювати перехід до циркулярної економіки та забезпечити стале відновлення України в умовах повоєнної розбудови.

Ключові слова: відходи, екологічна безпека, відходи руйнації, екологічна безпека, забруднення навколишнього середовища, довкілля, екологічний моніторинг, природні ресурси, викиди, циркулярна економіка, сталий розвиток, рециклінг, оцінка життєвого циклу, переробка, технологія, фізико-хімічні процеси, виробництво, ефективність, системний аналіз, ситуаційний аналіз, експертний експеримент, виробництво будівельних матеріалів, відновлення інфраструктури, післявоєнний період, утилізація кам'яного шламу, геополімерний бетон, ресурсозбереження, ресурсоефективність, стале будівництво, вторинні ресурси, управління відходами, перероблені бетони заповнювачі, екологічна відповідальність.

ABSTRACT

Palii O.V. Improving environmental safety through the implementation of demolition waste recycling in concrete production. - Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 "Ecology" (10 - Natural Sciences). - Zhytomyr Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr, 2024.

The dissertation is devoted to the extremely urgent problem of developing a comprehensive demolition waste management system to reduce negative environmental impacts and implement the principles of sustainable development and circular economy in the construction industry of Ukraine. In the context of large-scale destruction due to military aggression, the issue of effective construction waste management becomes critical both in terms of infrastructure restoration and minimizing environmental risks.

The relevance of the dissertation lies in solving the scientific problem of using demolition waste as valuable secondary raw materials, particularly in concrete production. The work provides a thorough analysis of the current state of the demolition waste problem in the context of military actions on the territory of Ukraine. Statistical

data on the scale of destruction of housing stock, infrastructure and industrial facilities in different regions are presented. The dynamics of demolition waste generation and projected volumes in the near future are analyzed. It is argued that traditional approaches to construction waste management, such as landfilling or incineration, are unacceptable from economic and environmental perspectives, especially given resource scarcity and the need for rapid restoration of destroyed territories.

A comprehensive analysis of existing theoretical approaches and practices for demolition waste management in Ukraine and worldwide is conducted. The regulatory framework, organizational mechanisms, technological solutions, and infrastructure are examined. The experience of EU countries in implementing the "zero waste" concept and achieving high levels of construction waste recycling is studied. The main barriers and gaps in the existing waste management system in Ukraine are identified, including imperfect legislation, lack of processing capacities, and low levels of awareness and stakeholder engagement.

Significant attention is paid to studying the impact of demolition waste on the environment. The main mechanisms of negative impact are analyzed, such as soil, water resources, and atmospheric air pollution due to uncontrolled placement and handling of waste. Health risks associated with the release of hazardous substances into the environment are considered. The necessity of implementing modern methods of sorting, processing, and safe disposal of demolition waste to minimize environmental damage is substantiated.

A separate section of the dissertation is devoted to a detailed analysis of the possibilities of using demolition waste as secondary raw materials in the production of building materials, particularly concrete. A review of modern scientific research and practical experience in the use of recycled concrete aggregates in the context of sustainable construction is conducted. The history of the development of construction waste recycling technologies, starting from the post-war period of the 20th century, is examined. Key properties of recycled aggregates compared to natural ones, such as density, water absorption, strength, chemical composition, etc., are analyzed. The main

technological aspects of the concrete recycling process, including crushing methods, fractionation, and impurity removal, are highlighted.

The experimental part of the work is devoted to the development and optimization of concrete mix formulations using aggregates from demolition waste. The study used CEM II/A-LL 42.5 R cement, river sand as fine aggregate, granite gravel as natural coarse aggregate, and recycled concrete of two fractions as alternative coarse aggregate. An assessment of component properties, such as grain composition, bulk density, and water absorption, was conducted. Three basic concrete mix compositions were developed: a control without waste use, with 25% and 50% replacement of natural gravel with recycled concrete. All mixtures were prepared and studied under laboratory conditions, ensuring standardized indicators of workability and strength.

Based on experimental data, the influence of adding demolition waste aggregates on the mechanical, physical, and durability properties of concrete was investigated. It was established that partial replacement of natural gravel with recycled concrete up to 50% does not lead to a significant reduction in compressive strength and other key indicators. However, there is a slight increase in water absorption and capillary suction due to the increased porosity of recycled aggregates. The expediency of using plasticizer additives and active mineral components to compensate for negative effects and optimize the composition of concrete mixtures is substantiated.

Considerable attention is paid to studying the durability of concrete with recycled aggregates under aggressive influences. The processes of chloride penetration and carbonation depending on the concrete mixture composition are analyzed. Chloride diffusion coefficients and carbonation depth for different formulations are determined. It is established that the increased porosity of recycled aggregates can contribute to the acceleration of reinforcement corrosion processes. Ways to improve the durability of concrete with demolition waste are proposed, such as limiting the maximum content of recycled gravel, reducing the water-cement ratio, and using corrosion inhibitor additives.

For the first time in Ukraine, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology is applied to compare the environmental impact of traditional concrete and concrete with

the addition of recycled materials. The advantages of the LCA approach, which allows considering environmental impact at all stages - from raw material extraction to final disposal - are substantiated. A life cycle model of concrete is developed, taking into account the stages of component production, transportation, mixture preparation, structure operation, and possible waste management scenarios after the end of service life. Data collection on material and energy flows, emissions, and waste at all stages is conducted. Based on calculations, it is shown that the use of recycled aggregates can significantly reduce impact at all stages by saving natural raw materials, reducing the energy intensity of extraction and processing, and reducing greenhouse gas emissions and other pollutants. A comparative analysis of key impact indicators for concrete composition variants is presented, demonstrating the environmental benefits of using secondary aggregates.

Based on the obtained results, practical recommendations for optimizing concrete formulations with recycled materials to ensure the necessary strength and durability of structures are developed. A strategy for the phased implementation of circular economy principles in the construction industry of Ukraine is proposed, taking into account environmental, economic, and social aspects. A conceptual model of a comprehensive demolition waste management system is developed, including organizational, technological, economic, and information mechanisms. Promising directions for further research on demolition waste issues are identified, such as expanding the range of recycled materials, improving the regulatory framework, developing regional programs and waste management schemes, and creating information systems and databases.

Overall, the dissertation is a comprehensive study offering scientifically grounded approaches to the effective use of demolition waste for the production of environmentally safe building materials. The obtained results are of significant importance for the restoration of Ukraine's destroyed infrastructure on the principles of sustainable development with minimal environmental impact. The proposed solutions will contribute to the rational use of resources, reduction of waste and emissions, and improvement of the environmental situation in the regions. Further implementation of the developed

approaches and recommendations will significantly increase the level of environmental safety, stimulate the transition to a circular economy, and ensure sustainable recovery of Ukraine in the conditions of post-war reconstruction.

Keywords: waste, environmental safety, demolition waste, environmental pollution, environment, environmental monitoring, natural resources, emissions, circular economy, sustainable development, recycling, life cycle assessment, processing, technology, physicochemical processes, production, efficiency, systems analysis, situational analysis, expert experiment, production of building materials, infrastructure restoration, post-war period, stone sludge utilization, geopolymer concrete, resource conservation, resource efficiency, sustainable construction, secondary resources, waste management, recycled concrete aggregates, environmental responsibility.

Список публікацій здобувача:

1. Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Статті та публікації у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Kireitseva H., Demchyk L., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80. pp. 267-276. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2170582> (заг. обсяг 1,0 друк. арк., особисто автору належить 0,25 друк. арк.)

2. Paliy O., Sirico A., Belletti B., Bernardi P. Building a Sustainable Future: Database of Concrete with Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024. p. 167-174. 16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.025> (заг. обсяг 0,69 друк. арк., особисто автору належить 0,3 друк. арк.)

3. Plaza P., Sirico A., Paliy O., Belletti B., Bernardi P., Medina C., Sánchez J. Chloride migration for concrete containing recycled aggregate and supplementary cementitious material. *ELETTRONICO*. 2023. P. 1-4. URL: <https://air.unipr.it/handle/11381/2970132> (заг. обсяг 0,32 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.).

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

4. Палій О., Пацева І., Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І. Використання відходів гірничо-видобувної галузі, як альтернативної сировини у будівництві. Проблеми хімії та сталого розвитку, 2023. № 1. С. 27–35. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-4> (заг. обсяг 0,74 друк. арк., особисто автору належить 0,19 друк. арк.)

5. Пацева І.Г., Валерко Р.А., Пацев І.С., Палій О.В. Особливості логістичних процесів транспортування комунальних відходів та відходів руйнації. Екологічні науки. 2023. № 5 (50). с.187-192. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.27> (заг. обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,19 друк. арк.)

6. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Пацева І.Г., Демчук Л.І., Палій О.В. Оцінка якісних показників поліетиленової плівки та її енвіроментологічний вплив. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2023. №4. С. 63-70 https://ecocorptzd.com.ua/gallery/%D0%95%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0%20%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D0%B0%204_2023.pdf (заг. обсяг 0,74 друк. арк., особисто автору належить 0,28 друк. арк.)

7. Палій О. Екологічні аспекти утилізації відходів руйнувань в Україні: використання переробленого матеріалу для сталого будівництва. Екологічні науки. 2024. № 1(52), Том 1. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.12> (заг. обсяг 0,56 друк. арк., особисто автору належить 0,56 друк. арк.)

2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Коцюба І.Г., Кірейцева Г.В., Палій О.В. Екологічна політика як інструмент досягнення цілей сталого розвитку країни. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 12 листопада 2020 р., Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. С.16 (заг. обсяг 0,23 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.)

2. Коцюба І.Г., Палій О.В., Кірейцева Г.В. Обґрунтування

ресурсозберігаючої та екологічно безпечної технології видобутку блочного каменю на гранітних кар'єрах. Тези XVII Всеукраїнська наукова on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю «Сучасні проблеми екології». 15 березня 2021 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021, С. 110. (заг. обсяг 0,12 друк. арк., особисто автору належить 0,06 друк. арк.)

3. Коцюба І.Г., Палій О.В., Кірейцева Г.В. Аналіз міжнародного досвіду в сфері управління та поводження з відходами. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 11 листопада 2021 р., Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. С. 65 (заг. обсяг 0,17 друк. арк., особисто автору належить 0,07 друк. арк.)

4. Кірейцева Г.В., Палій О.В. Аналіз найкращих світових практик впровадження системи розширеної відповідальності виробника (EPR). Тези доповідей 7-го Міжнародного молодіжного конгресу «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 10-11 лютого 2022, Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2022. С.158. (заг. обсяг 0,11 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.)

5. Пацева І.Г., Палій О.В., Кірейцева Г.В. Аналіз шляхів використання відходів, отриманих внаслідок видобування блочної сировини, як основних компонентів бетонних сумішей. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 30 листопада 2022 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. С. 39 (заг. обсяг 0,2 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.)

6. Кірейцева Г.В., Палій О.В., Кірейцев В.О. Характеристика відходів, отриманих внаслідок видобування блочної сировини. Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених

«Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів», 17 листопада 2022 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. С. 43 (заг. обсяг 0,07 друк. арк., особисто автору належить 0,03 друк. арк.)

7. Палій О.В., Кірейцева Г.В., Кірейцев В.О. Значення оцінки життєвого циклу (LCA) для сталого будівництва. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія» (присвячена Дню науки)». 15 травня 2024 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». С. 220-221. (заг. обсяг 0,21 друк. арк., особисто автору належить 0,11 друк. арк.)

8. Палій О.В., Кірейцев В.О. Етапи оцінки життєвого циклу будівельних матеріалів. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія» (присвячена Дню науки)». 15 травня 2024 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». С. 222-223. (заг. обсяг 0,09 друк. арк., особисто автору належить 0,06 друк. арк.).

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ РУЙНАЦІЇ	24
1.1. Екологічна політика та сталий розвиток: аналіз світових практик управління відходами та перспективи їх використання.....	24
1.2. Відходи руйнації: поняття та види.....	37
1.3. Вплив на довкілля відходів руйнації.....	46
1.4. Розвиток підходів до рециклінгу відходів руйнації.....	51
1.5. Стале будівництво: огляд існуючих досліджень і практик використання відходів руйнації як заповнювачів бетону	59
Висновки до розділу 1.....	67
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ	69
2.1. Методика дослідження.....	69
2.2. Характеристика матеріалів	74
2.3. Експериментальні методи дослідження.....	96
Висновки до розділу 2.....	102
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕТОНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЗАПОВНЮВАЧІВ З ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ	106
3.1. Властивості заповнювачів з відходів руйнації.....	106
3.2. Розробка та дослідження рецептур бетонних сумішей	110
3.3. Результати експерименту: оцінка механічних, фізичних та довговічних властивостей бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації	116
3.3.1. Властивості свіжого бетону.....	120
3.3.2. Властивості затверділого бетону.....	124
3.3.3. Довговічні властивості бетону.....	127
Висновки до розділу 3.....	135

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA) ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ.....	138
4.1. Значення оцінки життєвого циклу (LCA) для сталого будівництва.....	138
4.2. Етапи життєвого циклу будівельних матеріалів.....	155
4.3. Порівняльна оцінка життєвого циклу бетону із заповнювачами з відходів руйнації та звичайного бетону для будівельних конструкцій.....	163
Висновки до розділу 4.....	173
РОЗДІЛ 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ БЕТОНУ З ДОДАВАННЯМ ЗАПОВНЮВАЧА З ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ В УКРАЇНІ З ВРАХУВАННЯМ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ.....	176
5.1. Система роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках.....	176
5.2. Перспективи використання відходів руйнації як заповнювачів у виробництві бетону	182
Висновки до розділу 5.....	196
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	200
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	203
ДОДАТКИ.....	243

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів відходів руйнації внаслідок інтенсифікації будівельної діяльності та процесів урбанізації в глобальному масштабі. За оцінками експертів, щорічний обсяг будівельних відходів у світі може досягти 2,5 мільярдів тон до 2025 року [153]. Неналежне поводження з цими відходами призводить до значних екологічних проблем, таких як забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосферного повітря, а також вилучення значних площ земельних ресурсів під звалища та полігони [267, 167].

В умовах переходу до моделі сталого розвитку традиційні методи управління відходами руйнації, що базуються на захороненні або спалюванні, виявляються неприйнятними з точки зору економічної ефективності та екологічної безпеки [257]. Натомість актуалізується потреба у розробці та впровадженні інноваційних стратегій, спрямованих на мінімізацію утворення відходів, їх повторне використання та рециклінг [108, 216]. Залучення відходів руйнації як вторинної сировини в будівельну галузь може забезпечити суттєву економію природних ресурсів, зниження матеріальних витрат та зменшення навантаження на довкілля [191, 214].

Проте ефективне вирішення проблеми управління відходами руйнації вимагає ґрунтовного наукового опрацювання та розроблення комплексних стратегій на засадах міждисциплінарного підходу. Наявність значних прогалів у теоретичних та прикладних аспектах даної проблематики, фрагментарність та відсутність системності в існуючих дослідженнях обумовлюють необхідність формування цілісної науково-методологічної бази для обґрунтування та реалізації ефективних рішень у сфері поводження з відходами руйнації [233, 232].

Особливо гостро проблема відходів руйнації постає в специфічних умовах України, що пов'язано з високими темпами нового будівництва та реконструкції застарілого житлового фонду і промислових об'єктів, активними процесами

урбанізації та значними обсягами накопичених будівельних відходів на територіях населених пунктів [318]. Додатковим викликом є необхідність управління відходами руйнації, що утворилися внаслідок бойових дій та пошкодження інфраструктури в умовах військової агресії [256]. За таких обставин розроблення та впровадження науково обґрунтованих стратегій поводження з відходами руйнації на всіх етапах життєвого циклу об'єктів будівництва набуває особливої актуальності в контексті забезпечення сталого розвитку регіонів України [39].

Інноваційні технології рециклінгу та утилізації відходів руйнації, адаптовані до вітчизняних реалій, здатні мінімізувати екодеструктивний вплив будівельної галузі, сприяти формуванню замкнених циклів використання матеріалів та ресурсів, забезпечити отримання економічних переваг на засадах циркулярної економіки [1, 311]. Це відкриває можливості для підвищення рівня екологічної безпеки, раціонального використання сировинної бази, зниження енергоємності та вуглецевого сліду будівельного виробництва, що відповідає ключовим цілям сталого розвитку [29, 293].

Таким чином, розроблення теоретико-методологічних засад та практичних рекомендацій щодо підвищення екологічної безпеки шляхом впровадження ефективних стратегій управління відходами руйнації є актуальним та своєчасним науковим завданням, що має вагоме значення для розвитку будівельної галузі України на принципах сталості. Вирішення цієї проблеми дозволить підвищити еколого-економічну ефективність використання ресурсів, мінімізувати негативний вплив на довкілля, забезпечити відповідність міжнародним стандартам у сфері поводження з відходами та сформуванню підґрунтя для довгострокового збалансованого розвитку територій в умовах посилення антропогенного навантаження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження було проведено в рамках реалізації науково-дослідного гранту за темою "Будівельна інженерія: залізобетоні та попередньо напружені бетонні конструкції" на базі Університету міста Парма, Італія, в період з 2022 по 2024 роки. Проєкт фінансувався у межах ініціативи "National Recovery and Resilience Plan" (NRRP) та Екосистеми

для стійкого переходу в регіоні Емілія-Романья (Ecosister). Крім того, отримані результати були інтегровані у виконання проекту Erasmus+ KA220-HED 2023 року "Transformational learning network for resilience Enabling Ukrainian HE to ensure a sustainable and robust reconstruction of (post-war) Ukraine". Також дослідження є частиною проекту фундаментальних наукових досліджень, прикладних наукових досліджень та науково-технічних (експериментальних) розробок молодих вчених, які працюють (навчаються) у закладах вищої освіти та наукових установах на тему: «Розробка технології переробки відходів гірничого виробництва в будівельній індустрії» (державний реєстраційний номер 0124U000398), що забезпечить комплексний підхід до розв'язання проблематики утилізації відходів.

Метою роботи є вдосконалення комплексної системи управління відходами руйнації, що базується на принципах сталого розвитку і циркулярної економіки, для зменшення негативного впливу на довкілля.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати існуючі теоретичні підходи та практики управління відходами руйнації.
2. Проаналізувати та оцінити масштаби руйнувань внаслідок військових дій в Україні як фактор, що впливає на обсяги утворення відходів руйнації та потребує врахування при розробці стратегій управління ними.
3. Проаналізувати вплив відходів руйнації на стан довкілля та дослідити можливі шляхи їх утилізації.
4. Провести комплексний аналіз існуючих досліджень і практик використання відходів руйнації як заповнювачів бетону.
5. Дослідити властивості бетону з використанням заповнювачів з відходів руйнації.
6. Розробити рецептури бетонних сумішей із застосуванням заповнювачів з відходів руйнації.
7. Експериментально дослідити механічні, фізичні та довговічні властивості бетону із заповнювачів з відходів руйнації.
8. Провести оцінку життєвого циклу для порівняння впливу на довкілля

відходів руйнації (бетону).

9. Розробити рекомендації щодо застосування бетону з додаванням заповнювача з відходів руйнації в Україні з врахуванням оцінки життєвого циклу.

Виконання цих завдань сприятимуть реалізації поставленої мети та допоможуть у формуванні ефективної, екологічно безпечної системи управління відходами в будівельній галузі, що відповідає потребам сталого розвитку.

Об'єктом дослідження є процес утворення відходів руйнації, що виникають внаслідок будівельних, демонтажних робіт та військових дій, а також можливості їх повторного використання як ресурсу для виробництва бетонних сумішей.

Предметом дослідження є управління відходами руйнації в будівельній індустрії, зокрема рециклінг та повторне використання матеріалів як заповнювачів у бетонних сумішах.

Методи досліджень. Для оцінки масштабів руйнувань було використано методи статистичного аналізу для обробки даних щодо обсягів утворених відходів руйнації в регіонах, які зазнали найбільших руйнувань. Для дослідження властивостей заповнювачів з відходів руйнації та їх дисперсної складової, були застосовані різноманітні методи: тест на усадку (EN 12350-2), випробування на міцність при стискаючому навантаженні (EN 12390-3), стійкість до ударних навантажень (EN 12390-5), метод водопоглинання, мікроскопічний аналіз, метод акселерованої імітації корозійних процесів.

Створення бази даних за допомогою Excel передбачало збір інформації про склад, фізичні та механічні властивості цих матеріалів, забезпечуючи аналіз та оптимізацію компонентів для бетонних сумішей. Тест на усадку (стандарт-тест EN 12350-2) дозволив визначити оптимальні пропорції компонентів бетонної суміші, що містять заповнювачі з відходів руйнації, для забезпечення необхідних робочих характеристик. Використовуючи стандарти EN 12390-3 і EN 12390-5, було проведено випробування на міцність при стискаючому навантаженні та стійкість до ударних навантажень, що є критичними параметрами для бетонів. Параметри порожнинної структури заповнювачів визначались через метод водопоглинання та

мікроскопічний аналіз, дозволяючи оцінити водонепроникність та довговічність матеріалів. Застосування методу акселерованої імітації дозволило відтворити умови, що спричиняють корозію, і в максимально стислі терміни оцінити стійкість матеріалів до корозійних процесів. Завдяки LCA (Оцінка життєвого циклу) було можливо порівняти екологічний вплив різних рецептур бетону, що включають заповнювачі з відходів руйнації.

Наукова новина роботи полягає в наступному:

уперше: - розроблено концептуальну модель комплексної системи управління відходами руйнації в Україні, що базується на принципах циркулярної економіки та екологічного менеджменту, враховуючи специфіку поточної ситуації та масштаби руйнувань внаслідок військових дій;

- запропоновано методологічний підхід до оцінки життєвого циклу бетону з рециклінговими заповнювачами, адаптований до специфічних умов України, з урахуванням особливостей військових руйнувань, використанням сучасних методів оцінки життєвого циклу та розробкою практичних рекомендацій для підвищення екологічної безпеки і сталого розвитку будівельної галузі, що дозволяє кількісно оцінити зниження впливу на довкілля порівняно з традиційним складом бетону.

удосконалено:

- класифікацію відходів руйнації за походженням, складом та потенціалом рециклінгу, що сприяє ефективним процесам сортування, переробки та повторного використання матеріалів;

- рецептури бетонних сумішей з частковою заміною природних заповнювачів на рециклінгові, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості та довговічність конструкцій;

- експериментальні методи дослідження процесів корозії арматури в бетоні з рециклінговими заповнювачами, що дозволяють прискорено оцінити довготривалу стійкість матеріалів в агресивних середовищах шляхом застосування методу акселерованої імітації корозійних процесів, який включає використання

підвищеної концентрації хлоридів та кислот для прискорення умов, що спричиняють корозію, та дозволяє оцінити довговічність матеріалів у скорочені терміни.

набули подальшого розвитку:

- наукові основи еколого-економічної оцінки доцільності рециклінгу відходів руйнації: удосконалено методи оцінки екологічних і соціальних ефектів від впровадження технологій рециклінгу, які включають аналіз впливу на довкілля, підвищення рівня екологічної безпеки та соціальні вигоди, такі як створення нових робочих місць і зниження обсягу відходів, що підлягають утилізації;

- теоретичні засади та практичні рекомендації щодо покращення поводження з відходами руйнації: запропоновано систему роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках, що сприяє більш ефективному використанню ресурсів та мінімізації утилізації відходів;

- методи оцінки екологічного впливу: розроблено методи, які дозволяють оцінити відносний внесок різних забруднюючих речовин у загальний вплив на навколишнє середовище на основі розрахунку характеристичного коефіцієнту, що забезпечує точнішу екологічну оцінку та допомагає у прийнятті рішень щодо управління відходами.

Практичне значення одержаних результатів:

Отримані результати мають вагомим практичним значенням для відновлення зруйнованої інфраструктури України на засадах сталого розвитку та мінімізації негативного впливу на довкілля. Запропоновані підходи та рекомендації дисертаційної роботи щодо ефективного рециклінгу відходів руйнації реалізовані в конкретних розробках, придатних до використання:

на регіональному рівні:

– розроблено рекомендації щодо включення в регіональну програму управління відходами руйнації в Житомирській області, що передбачає створення інфраструктури для збору, сортування та переробки будівельних відходів, а також механізми економічного стимулювання їх рециклінгу. Програма має бути

спрямована на максимальне залучення відходів як вторинних ресурсів у процесі відновлення зруйнованих територій та об'єктів (Державна екологічна інспекція Поліського округу, довідка № 9086/02 від 09.06.2024 р).

на рівні суб'єктів господарювання:

– розроблено методичні рекомендації щодо організації процесів поводження з відходами на різних етапах будівельних робіт, запропоновано систему роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках, що дозволяє ефективно виділяти фракції, придатні для подальшої переробки та повторного використання. Розроблено (ТОВ "Компанія Гранкор", довідка № 8 від 22.03.2024 р.).

– розроблено методичні рекомендації щодо можливостей виробництва альтернативного палива з органічної складової відходів руйнації (деревини, паперу, текстилю тощо) шляхом їх подрібнення, сушки та гранулювання (ТОВ "Центр біопалива", довідка № 090624 від 09.06.2024 р.);

у навчальному процесі:

– програма та навчально-методичне забезпечення дисциплін: "Стратегічне управління для сталої реконструкції та реставрації в природоохоронній сфері", "Ресурсозберігаючі технології та рециклінг", "Інтегроване управління відходами". Матеріали дисертаційного дослідження використовуються для формування у студентів компетентностей щодо інноваційних підходів до управління відходами, еколого-економічних аспектів рециклінгу, застосування принципів циркулярної економіки в процесах відновлення зруйнованої інфраструктури (навчальний процес Державного університету "Житомирська політехніка", довідка № 44-45/708 від 30.04.2024 р.).

Особистий внесок здобувача Особистий внесок здобувача полягає в самостійному формулюванні мети та завдань дослідження, розробці програми експериментальних випробувань, виконанні лабораторних досліджень властивостей рециклінгових заповнювачів та бетонів на їх основі, статистичній обробці, аналізі та узагальненні одержаних результатів, проведенні оцінки

життєвого циклу будівельних матеріалів, обґрунтуванні наукових положень та висновків роботи. Здобувачем особисто розроблено концептуальну модель комплексної системи управління відходами руйнації та запропоновано стратегію її реалізації в умовах України. Дисертантом сформульовано наукову новизну одержаних результатів та визначено практичне значення роботи.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідались та обговорювались на 10 науково-технічних конференціях: Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції» (12 листопада 2020 р., Житомир), 7-ий Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (10-11 лютого 2022, Львів), VII Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів в процесі експлуатації: діагностика та прогнозування» (18-20 жовтня 2023 р, Тернопіль) та інших.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, з них: 7 статей, в тому числі 3 статті у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 8 публікацій апробаційного характеру в інших наукових виданнях, загальним обсягом 5,86 ум.-друк. арк., з яких особисто автору належить 2,5 ум.-друк. арк.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 257 сторінок та включає 14 таблиць, 40 рисунків, список використаних джерел із 368 найменувань на 40 сторінках і 7 додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ РУЙНАЦІЇ

1.1. Екологічна політика та сталий розвиток: аналіз світових практик управління відходами та перспективи їх використання

Протягом тривалого часу економічний розвиток держави супроводжувався незбалансованою експлуатацією природних ресурсів, низькою пріоритетністю питань захисту довкілля, що унеможливлювало досягнення цілей сталого розвитку. Нещадна експлуатація природних ресурсів створює надлишкове навантаження антропогенної діяльності на довкілля, яке має глобальні наслідки. Вчені стверджують, що протягом свого існування людство знищило 2/3 лісів планети [183]. Як зазначає ЮНЕСКО в своїх документах, в умовах техногенного тиску відбувається «генетична ерозія», тобто щорічно безслідно зникають від 150 до 200 видів організмів [349]. Процеси глобалізації та суспільних трансформацій підвищили пріоритетність збереження довкілля, а отже, потребують від України вжиття термінових заходів. На початку XXI століття наша країна все ще посідає одне з перших місць у світі за рівнем споживання енергії, води та інших ресурсів на одиницю ВВП [219,75,83]. Україна має найбільші у світі обсяги промислових відходів на душу населення (загальна маса накопичених відходів в нашій державі становить більше 30 млрд. тон, з них майже 2,5 млрд. тон – токсичні) [60,235]. Обсяг шкідливих викидів у повітря в Україні складає понад 6,6 млн. тон на рік (з них 2 млн. тон – викиди від автотранспорту) [62]. 30% води в Україні втрачається через застарілі водопровідні мережі та практично всі поверхневі та підземні води забруднені небезпечними та токсичними для навколишнього природного середовища речовинами різного походження [352,234].

На думку експертів, першопричинами таких екологічних проблем України є:

- підпорядкованість екологічних пріоритетів економічній доцільності;

- неврахування наслідків для довкілля у законодавчих та нормативно-правових актах;
- переважання ресурсо- та енергоємних галузей у структурі економіки із здебільшого негативним впливом на довкілля, що значно посилюється через неврегульованість законодавства при переході до ринкових умов господарювання;
- фізичне та моральне зношення основних фондів у всіх галузях національної економіки;
- неефективна система державного управління у сфері охорони навколишнього природного середовища та регулювання використання природних ресурсів, зокрема неузгодженість дій центральних і місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування, незадовільний стан системи державного моніторингу навколишнього природного середовища;
- низький рівень розуміння в суспільстві пріоритетів збереження довкілля та переваг сталого розвитку, недосконалість системи екологічної освіти та просвіти;
- незадовільний рівень дотримання природоохоронного законодавства та екологічних прав і обов'язків громадян;
- незадовільний контроль за дотриманням природоохоронного законодавства та незабезпечення невідворотності відповідальності за його порушення;
- недостатнє фінансування з державного та місцевих бюджетів природоохоронних заходів, фінансування таких заходів за залишковим принципом, тощо [71,288].

Для вирішення зазначених екологічних проблем, а також завдань, спрямованих на збереження умов існування людини і формування екологічної культури населення країни було прийнято Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (від 28.02.2019 року) [27]. Під «екологічною політикою» слід розуміти комплекс заходів, спрямованих на охорону довкілля, збереження і відновлення природних ресурсів, запровадження безвідходних і маловідходних, екологічно чистих технологій,

розвиток природоохоронного виховання й освіти, правову охорону екосистем [67]. Метою державної екологічної політики є досягнення задовільного стану довкілля шляхом запровадження екосистемного підходу до всіх напрямів соціально-економічного розвитку України з метою забезпечення конституційного права кожного громадянина України на чисте та безпечне довкілля, впровадження збалансованого природокористування і збереження та відновлення природних екосистем [27, 10, 11]. Реалізація засад державної екологічної політики повинна здійснюватися з дотриманням наступних принципів: відкритості, підзвітності, гласності органів державної влади; участі громадськості у формуванні державної політики; дотримання екологічних прав громадян; заохочення до ведення екологічно відповідального бізнесу та екологічно свідомої поведінки громадян; запобігання екологічній шкоді; міжнародної співпраці та євроінтеграції [27,32]. Дотримання зазначених принципів є основою для розробки та реалізації інструментів державної екологічної політики.

Серед основних завдань екологічної політики є: суттєве підвищення екологічної свідомості громадян, поширення екологічних цінностей та популяризація екологічної освіти; сталий розвиток та збалансоване використання природних ресурсів, обов'язкова присутність екологічних вимог в усіх сферах життєдіяльності, зменшення екологічних ризиків та належне екологічне врядування; міжсекторальне партнерство та залучення зацікавлених сторін; підвищення рівня екологічної безпеки (у тому числі в зоні відчуження); застосування принципів перестороги, превентивності (запобігання), пріоритетності усунення джерел шкоди довкіллю, "забруднювач платить", а також стимулювання державою вітчизняних суб'єктів господарювання, що здійснюють екологічну діяльність та зменшують навантаження на навколишнє природне середовище; упровадження новітніх засобів і форм комунікацій та ефективною інформаційної політики у сфері охорони навколишнього природного середовища [27, 85, 86].

До основних засад екологічної політики України було включено досягнення Україною Цілей сталого розвитку, які були затверджені на Саміті ООН зі сталого

розвитку у 2015 році [67]. Необхідно відмітити, що хоча Цілі сталого розвитку ООН і бралися до уваги під час підготовки державних стратегічних документів, однак уперше вони прописані на рівні окремого закону [27,13]. Цілі сталого розвитку ООН — це загальний заклик до дій, спрямованих на подолання бідності, захист планети, забезпечення миру та достатку для кожного. Іншими словами — це чіткі орієнтири з конкретними цільовими показниками, які повинні бути виконані до 2030 року [351]. Отже, закон передбачає, що:

- до 2030 року 17% енергії отримуватиметься з відновлюваних джерел (на сьогодні цей показник не перевищує 6%);
- частка сільського населення, що має доступ до покращених умов водовідведення й санітарії, становитиме 80% (зараз це 2%);
- частка відходів, які захоронюються на полігонах, зменшиться до 35%;
- викиди підприємств в атмосферне повітря скоротяться на 77,6%;
- викиди в атмосферне повітря від транспорту зменшаться на третину;
- частка територій зі статусом природно-заповідного фонду (заповідники, національні парки тощо) збільшиться з 3803 га до 9095 га;
- енергоємність економіки зменшиться удвічі; третина водних ресурсів (річки, озера тощо) матимуть належний екологічний стан [27].

Центр екологічного права і політики (Center for environmental law & policy) Єльського університету спільно з Центром міжнародної інформаційної мережі наук про Землю (Center for international Earth science information Network) Колумбійського університету провели глобальне дослідження, що стосується досягнень країн щодо стану та управління природними ресурсами. На підставі зроблених вимірів розраховується Індекс екологічної ефективності (The Environmental Performance Index – EPI) – комбінований показник стану навколишнього природного середовища та ефективності управління природними ресурсами [361]. Індекс екологічної ефективності розраховується з 2006 р. Результати дослідження публікуються один раз у два роки. Цей індекс дає змогу орієнтуватися національним урядам щодо прогресу в досягненні країнами

встановлених цілей екологічної політики [361]. За рейтингом EPI у 2020 р. Україна серед 180 країн посіла 60 місце з показником 49,5 балів, і значно покращила свої позиції в порівнянні з даними 2018 року. У 2018 році індекс EPI становив 52,87 балів, і Україна посідала 109 місце у рейтингу [361].

Отже, останні кілька років можна сміливо позначити як період формування цілісної української екологічної політики. Вперше за історію незалежності управління природними ресурсами перейшло від локальних, часто змістовно не пов'язаних між собою законопроектів до утворення стратегічної матриці, в якій законодавчі ініціативи ґрунтуються на спільних принципах і орієнтирах [14,34,35]. Це стало можливим, по-перше, через вимогу наближення українського законодавства до законодавства ЄС в рамках Угоди про асоціацію. По-друге — через залучення до екологічної політики низки профільних експертів і налагодження тісної співпраці між ними [14]. Екологічна політика України, яка тривалий час орієнтувалася на подолання негативних наслідків, тепер повинна буде ґрунтуватися на їхньому запобіганні, усуненні першопричин їх виникнення та займатися покращенням якості довкілля, а отже — і поліпшенням якості життя кожного українця [59, 82, 80].

Одним із ключових інструментів реалізації ефективної екологічної політики є впровадження системи розширеної відповідальності виробника (Extended Producer Responsibility - EPR).

Основне завдання EPR полягає в підтриманні муніципалітетів щодо управління відходами через перенесення відповідальності за утворення відходів з уряду чи муніципалітету на виробників та імпортерів продукції; заохочення виробників розробляти, виготовляти та продавати продукцію, урахувавши її вплив на довкілля [349]. Система EPR базується на принципі "забруднювач платить", який передбачає, що виробники несуть фінансову та/або організаційну відповідальність за поводження з відходами на етапі після споживання продукції [279].

Аналіз найкращих світових практик впровадження системи розширеної відповідальності показав, що заходи, які застосовуються в системах управління відходами країн, можна розділити на п'ять великих груп (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Успішні приклади передової міжнародної практики щодо встановлення передумов впровадження системи розширеної відповідальності виробника

Група заходів	Приклади успішного зарубіжного досвіду
законодавча база, стратегії і планування поведінки з відходами	<ul style="list-style-type: none"> - формування комплексної правової бази, яка охоплює всі аспекти управління відходами (спостерігається в більшості європейських країн); - розробка планів (стратегій) поведінки з відходами, які включають в себе чіткі кількісні показники, заходи по їх здійсненню і досягненню, джерела фінансування встановлених заходів, а також процес моніторингу та огляду реалізації прийнятих планів (стратегій) (спостерігається в більшості зарубіжних країн); - координація національного і регіонального планування управління відходами (наприклад, Польща)
використання принципів економіки замкненого циклу	<ul style="list-style-type: none"> - розроблені політичні і правові основи використання принципів економіки замкненого циклу управління відходами (Японія, Корея, Нідерланди); - інтеграція і актуалізація підходів економіки замкненого циклу в існуючих політичних і правових межах (більшість країн ЄС, зокрема Норвегія); - встановлення пріоритетів щодо запобігання утворенню відходів (Чеська Республіка, Польща та інші країни ЄС)
встановлення інституційних рамок взаємодії державних органів влади	<ul style="list-style-type: none"> - управління окремими послугами з утилізації відходів на місцевому рівні з метою інтеграції механізмів управління муніципальними відходами в загальну систему державного управління відходами (більшість країн ОЕСР); - створення інституційної структури для підтримки горизонтальної координації політики у відповідних виробничих секторах (більшість розвинених країн) - проведення конкурсних торгів (де це можливо) для підвищення якості послуг з утилізації ТПВ (в більшості країн ОЕСР); - створення інституційного потенціалу для місцевих органів влади з метою ефективного управління тендерами і нагляду за зверненням у сфері ТПВ (Польща);
посилення ролі муніципальних служб в утилізації	<ul style="list-style-type: none"> - міжмуніципальне співробітництво (Японія, Норвегія і Польща); - роздільний збір вторинної сировини для переробки в цілях стимулювання сортування відходів і підвищення ефективності загального рівня переробки (багато країн ОЕСР).
взаємодія з приватним сектором	<ul style="list-style-type: none"> - державно-приватне співробітництво в сфері планування і реалізації заходів щодо управління відходами (Японія, Нідерланди); - співпраця державного та приватного сектора в частині стимулювання переробки відходів (Колумбія, Ізраїль та інші країни)

Джерело: розроблено автором на основі [359], [280], [270]

Встановлено, що держави з найбільш стійкими економіками та успішними прикладами реалізації EPR, серед яких практично всі Скандинавські країни, а також Польща, Бельгія, Німеччина, мають наступні спільні риси: місцеве самоврядування базового рівня має вагому управлінську та бюджетну самостійність; місцеві громади отримують частку податків на економічну активність фізичних та юридичних осіб, зареєстрованих на їх території, тому вони всіляко підтримують бізнес й інвестиції у себе; існує чіткий розподіл повноважень та ресурсів між державою, регіональною та місцевою владою [292, 9].

Важливо зазначити, що ефективність системи EPR залежить від ряду факторів, зокрема від рівня екологічної свідомості населення, розвитку інфраструктури збору та переробки відходів, а також від наявності економічних стимулів для виробників та споживачів. Так, в країнах ЄС широко застосовуються такі інструменти, як еко-дизайн продукції, маркування продукції щодо її екологічності, податки на продукцію, яка не підлягає переробці або містить небезпечні речовини, депозитно-заставні системи для тари та упаковки тощо [174].

Наприклад, у Німеччині діє одна з найбільш розвинених систем EPR, яка охоплює різні види відходів, включаючи упаковку, електронне обладнання, батарейки, автомобілі та ін. Виробники та імпортери зобов'язані брати участь у системі збору та переробки відходів, фінансуючи її через спеціальні організації (Duales System Deutschland - DSD). Завдяки цьому вдалося досягти високих показників переробки відходів (понад 60% для побутових відходів) та зменшити обсяги захоронення на полігонах [180].

У Швеції система EPR також є досить розвинутою і поширюється на упаковку, електронні відходи, шини, автомобілі, батарейки та фармацевтичні препарати. Шведська модель EPR базується на принципах співпраці між муніципалітетами та виробниками, які спільно організують збір та переробку відходів. Муніципалітети відповідають за інформування населення та надання послуг зі збору відходів, тоді як виробники фінансують систему через створені ними організації (наприклад, FTI - Förrpacknings- och Tidningsinsamlingen для

упаковки). Такий підхід дозволив Швеції стати одним зі світових лідерів у сфері управління відходами та досягти рівня переробки побутових відходів у 49% [332].

В Україні впровадження системи EPR знаходиться на початковій стадії. У 2017 році було прийнято Національну стратегію управління відходами до 2030 року, яка передбачає поступовий перехід до EPR для окремих видів відходів, таких як упаковка, електронне обладнання, батарейки та акумулятори [92]. Після прийняття Закону України «Про управління відходами» [28] у 2023 році, який замінив Закон України «Про відходи», принцип розширеної відповідальності виробника став невід'ємною частиною національного законодавства. Цей принцип покладає на виробників та імпортерів обов'язки щодо організації збору та переробки відходів, які утворюються в результаті використання їхньої продукції. Незважаючи на законодавче закріплення РВВ, практична реалізація цих положень все ще потребує значних зусиль та співпраці між державою та бізнесом для забезпечення ефективного функціонування системи управління відходами в Україні.

Серед основних перешкод для впровадження EPR в Україні можна виділити недосконалість законодавчої бази, відсутність чіткого розподілу повноважень між державними органами та місцевим самоврядуванням, низький рівень екологічної свідомості населення та бізнесу, недостатній розвиток інфраструктури збору та переробки відходів [30]. Для подолання цих перешкод необхідно забезпечити формування комплексної правової бази, яка б охоплювала всі аспекти управління відходами, розробити чіткі плани та стратегії поводження з відходами з конкретними цільовими показниками, посилити роль муніципалітетів в організації роздільного збору вторинної сировини, а також стимулювати співпрацю держави з приватним сектором у сфері управління відходами [57, 73].

Важливим кроком на шляху до впровадження EPR в Україні стало прийняття у 2021 році Закону "Про управління відходами" [28], який встановлює загальні правові та організаційні засади діяльності у сфері поводження з відходами і спрямований на захист довкілля та здоров'я людини від негативного впливу відходів, забезпечення ощадливого використання матеріально-сировинних та

енергетичних ресурсів, зменшення обсягів утворення відходів, збільшення обсягів їх переробки та повторного використання. Закон передбачає впровадження EPR для таких видів відходів як упаковка, електричне та електронне обладнання, батареї і акумулятори, мастила (оливи), шини, текстиль та взуття, а також визначає обов'язки виробників щодо досягнення цілей із збирання та переробки відходів [79].

Отже, впровадження системи розширеної відповідальності виробника є важливим інструментом для реалізації ефективної екологічної політики та переходу до економіки замкненого циклу. Досвід країн ЄС показує, що EPR дозволяє значно підвищити рівень збору та переробки відходів, зменшити навантаження на довкілля та стимулювати розвиток циркулярної економіки. Для успішного впровадження EPR в Україні необхідно забезпечити формування комплексної законодавчої бази, розвиток інфраструктури поводження з відходами, посилення ролі муніципалітетів та співпраці держави з бізнесом, а також проведення широкої інформаційної кампанії серед населення щодо важливості роздільного збору відходів та відповідального споживання.

Впровадження системи розширеної відповідальності виробника (EPR) є важливим інструментом для реалізації ефективної екологічної політики та переходу до економіки замкненого циклу [312]. Однак, окрім відходів споживання, значний внесок у забруднення довкілля роблять також відходи, що утворюються в процесі видобування корисних копалин, зокрема блочної сировини. Тому комплексний підхід до управління відходами повинен враховувати не лише відходи пост-споживання, але й відходи гірничо-видобувної галузі.

За минуле століття видобуток рудних матеріалів та гірничо-хімічної сировини збільшився у 27 разів, видобуток корисних копалин для потреб будівництва – у 34 рази, в той час як обсяг продукування біомаси збільшився лише у 3,4 рази [166]. Збільшення попиту на корисні копалини означає збільшення освоєння та експлуатації запасів, а також збільшення швидкості мінерального виснаження в різних регіонах. Згідно зі статистичними даними, опублікованими у 2020 році країнами, де активно розвивається індустрія виробництва блочної сировини,

загальна кількість матеріалу, що щорічно видобувається з кар'єрів з видобутку блочної сировини, становить близько 316 млн. т., а близько 161,5 млн.т. стають кар'єрними відходами, що становить 51% видобутої сировини [93]. Це є суттєвим показником економічних втрат та екологічних збитків.

Україна належить до провідних мінерально-сировинних держав світу. Поєднання різновікових (від архею до кайнозою) структурних елементів, що сформувалися внаслідок впливу всіх властивих становленню земної кори процесів, зумовило широкий діапазон корисних копалин, що становлять мінерально-сировинну базу країни [93, 76]. Український кристалічний масив (також Український щит) - піднятий блок порід фундаменту в південно-західній частині Східноєвропейської платформи, що простягається вздовж середнього і нижнього Дніпра. Масив має площу близько 200 000 км². Саме в цій частині знаходяться запаси високоякісної сировини - гранітоїдів, що характеризуються міцністю на стиск 100-300 МПа/см², високою зносо- і морозостійкістю [5, 77]. Саме на Житомирщину припадає 60% видобутку порід цієї сировини - граніту, мармуру, травертину, вапняку тощо. Ці породи є основою для отримання будівельний матеріалів не тільки в Україні.

Провівши аналіз можливих шляхів використання відходів гірничо-видобувної галузі (табл. 1.2) встановлено, що найчастіше їх використовують у будівництві, а саме, для виготовлення бетонних сумішей.

Розглянемо основні шляхи використання відходів для виробництва бетонних сумішей, отриманих внаслідок видобування блочної сировини трьох основних груп корисних копалин: осадові породи (вапняк), метаморфічні породи (мармур), магматичні породи (граніт).

Вапняк - це тип осадової гірської породи, що складається в основному з кальциту і арганіту і є основним джерелом матеріального вапна. Було проведено ряд досліджень щодо використання відходів вапнякового порошку та інших компонентів в якості заміни цементу в легких бетонах. Таким чином, використання

відходів вапнякових кар'єрів в якості заміни цементу дозволило б зменшити насипну щільність суміші та отримати порівняно легший блок.

Таблиця 1.2

Можливі шляхи використання відходів гірничо-видобувної галузі

Тип відходів	Можливі шляхи використання відходів
Дрібні кам'яні відходи (включаючи шлам)	<ul style="list-style-type: none"> - Виробництво асфальту та бетону - Виробництво цегли - Заповнювачі для будівельних матеріалів - Виробництво синтетичних заповнювачів - Засоби для систем біофільтрації або рекультивації ґрунту - Мінеральний заповнювач для ґрунту - Виробництво шинних сумішей - Будівельні суміші і як інгредієнт будівельних сумішей
Відходи у вигляді заповнювачів	<ul style="list-style-type: none"> - Інгредієнт будівельних сумішей - Заповнювач для доріг - Рекультивація при ландшафтному дизайні та декоративне застосування - Засоби для систем біофільтрації - Заповнювач для габійонних конструкцій та фундаменту
Великі елементи каменю та бруківка	<ul style="list-style-type: none"> - Рекультивація при ландшафтному дизайні та декоративне застосування - Заповнювач фундаментів - Виробництво заповнювачів
Пошкоджені блоки та плити (неконденційна сировина)	<ul style="list-style-type: none"> - Для матеріалів невеликого розміру - Виробництво бруківки та плитки

Джерело: розроблено автором

Науковцями було проведено порівняльну характеристику використання відходів вапнякового порошку, золи рисового лушпиння та відходів деревних волокон як заміників цементу в легкому бетоні. Кожен вид відходів був доданий у співвідношенні 25% до цементу, а цемент був випробуваний на фізико-механічні властивості та довговічність. Результат випробувань показав, що серед змішаних відходів найкращі показники міцності на стиск спостерігалися при додаванні відходів вапнякового порошку [133]. Також було відзначено, що використання відходів вапнякових кар'єрів в якості заміни цементу може знижувати насипну щільність суміші, що дозволить отримати порівняно легший блок [109].

Мармур – це метаморфічна гірська порода, яка утворюється, коли вапняк піддається впливу тепла і тиску. Він складається в основному з мінералу кальциту. Дослідження показало, що використання мармурового пилу в якості заміни піску в бетоні має значний вплив на механічні властивості бетону в порівнянні з заміною цементу. Дослідники використовували відходи мармурового кар'єру у виробництві цементу та бетону. Мармуровий пил додавали до цементу у співвідношенні 5%, 7,5%, 10% та 15% як заміник цементу при водоцементному відношенні 0,5 та 0,4 [247]. На основі експериментальних досліджень встановлено, що міцність на стиск підвищується при введенні мармурового пилу в якості заміни піску до 15% від маси піску. Також зафіксовано підвищення міцності при розтягуванні, покращення міцності зчеплення сталі з бетоном при введенні мармурового пилу до складу суміші [353]. В цілому дослідження показало, що використання мармурового пилу в якості заміни піску в бетоні має значний вплив на механічні властивості бетону в порівнянні з заміною цементу.

Граніт - інтрузивна магматична гірська порода, що складається в основному з кварцу. Науковцями були проведені дослідження використання відходів гранітного кар'єру як часткової заміни річкового піску для виробництва бетонних сумішей. Включення таких відходів дало знижену оброблюваність, покращену міцність на стиск і кращу стійкість до стирання, ніж у контрольному варіанті суміші. У цьому дослідженні відходи гранітних кар'єрів використовувалися як часткова заміна річкового піску при відсотках заміни 10%, 25%, 40%, 55% і 70% при водоцементному відношенні 0,30, 0,35 і 0,40 [248]. Включення відходів дало підвищення міцності на стиск і кращу стійкість до стирання порівняно з контрольним складом суміші. Відмічено, що при 55% заміщенні гранітні відходи зменшили водопроникність та водопоглинання суміші, що покращило її стійкість до впливів хімічних компонентів, таких як хлориди, сульфати та луки [357]. В цілому дослідження показало, що використання гранітних відходів в якості 25-40% заміни річкового піску позитивно вплинуло на міцність та довговічність сумішей.

До завдань екологічно сталого розвитку добувних галузей відносять: впровадження маловідходних ресурсозберігаючих технологій добування та комплексної поглибленої переробки сировини; удосконалення механізмів ліцензування та оплати за використання надр; пошук нових родовищ мінеральної сировини на принципах еколого-економічної доцільності їх освоєння; забезпечення можливості використання техногенних родовищ і відходів при формуванні балансу природних ресурсів на всіх рівнях природокористування; забезпечення державного контролю над обсягами, повнотою, ефективністю та доцільністю використання невідновлювальних природних ресурсів [61]. На основі проведених досліджень можна стверджувати, що повторне використання відходів, що утворюються при розробці кар'єрів, дає змогу: змінити комплексний підхід до виробничих процесів; зменшити потребу у видобутку, збагаченні та переробці сировини, що призводить до забруднення навколишнього середовища; знизити загальні витрати на будівництво; створити новий альтернативний будівельний матеріал [258].

Отже, при регулюванні управління відходами видобувної галузі потрібно виходити з принципів концепції сталого розвитку, тобто необхідності встановлення балансу між задоволенням сучасних економічних потреб країни та її громадян і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу в безпечному і здоровому довкіллі [104, 12, 42, 44, 45].

Особливо актуальним питання управління відходами стало для України в умовах війни. Російська агресія призвела до масштабних руйнувань інфраструктури, житлових та промислових об'єктів, що спричинило утворення величезної кількості будівельних відходів - так званих відходів руйнації. За оцінками експертів, обсяг відходів руйнації в Україні вже перевищує 100 млн тон і продовжує зростати [65, 69]. Ці відходи не лише займають значні площі, але й створюють екологічні та санітарно-епідеміологічні загрози через можливість забруднення ґрунтів, водойм та повітря небезпечними речовинами.

Тому одним із пріоритетних завдань у процесі відбудови України має стати розробка ефективної системи поводження з відходами руйнації, яка б дозволила

максимально залучити їх у господарський обіг як вторинну сировину. Досвід використання відходів гірничо-видобувної галузі у виробництві будівельних матеріалів може стати в нагоді при вирішенні цієї проблеми. Зокрема, бетонний лом від зруйнованих споруд після відповідної переробки може використовуватись як заповнювач для нових бетонних сумішей, щебінь - для будівництва доріг, а цегляний бій - для виробництва керамічних виробів [294].

Однак для реалізації цього потенціалу необхідно створити відповідну нормативно-правову базу, яка б встановлювала чіткі вимоги до класифікації, сортування та переробки відходів руйнації, а також економічні стимули для залучення будівельних компаній та інвесторів до цієї діяльності [41, 43]. Крім того, важливо забезпечити належний екологічний контроль за процесами поводження з відходами руйнації, щоб мінімізувати їх негативний вплив на довкілля та здоров'я людей [63].

Таким чином, раціональне використання відходів гірничо-видобувної галузі та відходів руйнації є важливою складовою сталого розвитку України, яка дозволить не лише зменшити екологічне навантаження, але й забезпечити будівельну галузь додатковими ресурсами в умовах повоєнної відбудови. Це потребує комплексного підходу та співпраці держави, бізнесу та громадськості задля перетворення викликів на можливості для зеленого відновлення України.

1.2. Відходи руйнації: поняття та види

Якщо відходи гірничо-видобувної галузі утворюються в процесі планової економічної діяльності, то відходи руйнації, спричинені військовими діями, є наслідком надзвичайних ситуацій, що вимагає особливого підходу до їх управління [295, 84].

Відходи руйнації – це залишки будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, що утворюються в результаті нового будівництва, знесення, реконструкції чи ремонту будівель і споруд, воєнних дій [64]. Відходи від руйнації

інфраструктури внаслідок військових дій в Україні становлять комплексну проблему, що виникає через знищення або пошкодження будівель, доріг, мостів, комунальних систем та інших важливих об'єктів.

За інформацією згідно звіту Київської економічної школи про збитки від руйнувань [25] опублікованого у червні 2023 року, внаслідок військового вторгнення росії більше 50% житлового фонду у значній кількості міст та містечок України було пошкоджено або зруйновано. Особливо сильних руйнувань зазнали Маріуполь, Харків, Чернігів, Сєвєродонецьк, Рубіжне, Бахмут, Мар'їнка, Лисичанськ, Попасна, Ізюм та Волноваха. Наприклад, у Сєвєродонецьку пошкоджено 90% житлового фонду, а міста Бахмут і Мар'їнка повністю зруйновані. Кількість пошкоджених будинків продовжує зростати через триваючі бойові дії та тимчасову окупацію частини України.

Обсяги утворення відходів руйнації в Україні оцінюються в мільйони тон. За попередніми оцінками Міністерства розвитку громад та територій України, станом на серпень 2022 року, обсяг будівельних відходів становив близько 100 млн.тон [66]. Проте, враховуючи продовження бойових дій та масштабні руйнування в таких містах як Маріуполь, Сєвєродонецьк, Рубіжне, Бахмут та інших, реальні обсяги відходів руйнації можуть бути значно більшими.

Відходи руйнації створюють не лише проблеми для навколишнього середовища та здоров'я людей, але й становлять значний економічний тягар для України. Вартість відновлення зруйнованої інфраструктури оцінюється в сотні мільярдів доларів США. Зокрема, за оцінками Київської економічної школи, станом на червень 2023 року, прямі збитки від руйнування та пошкодження житлового фонду становлять близько 50 млрд дол. США, а загальні збитки від руйнування інфраструктури перевищують 100 млрд дол. США [102].

Однією з ключових проблем управління відходами руйнації в Україні є відсутність належної інфраструктури для їх збирання, сортування та переробки [72, 70]. Зруйновані будівлі та споруди часто містять небезпечні матеріали, такі як азбест, свинець, ртуть, які вимагають спеціальних методів

поводження та утилізації [350]. Крім того, значна частина відходів руйнації забруднена нафтопродуктами, хімічними речовинами та вибухонебезпечними предметами, що створює додаткові ризики для довкілля та здоров'я людей [31, 81].

Для вирішення проблеми відходів руйнації в Україні необхідно розробити комплексну стратегію управління цими відходами, яка б включала такі ключові елементи:

1. Створення нормативно-правової бази, яка б регулювала питання класифікації, інвентаризації, збирання, транспортування, сортування, переробки та утилізації відходів руйнації [54]. Зокрема, важливо встановити чіткі критерії для розмежування небезпечних та безпечних відходів, а також визначити вимоги до поводження з ними.

2. Проведення детальної інвентаризації та оцінки обсягів і складу відходів руйнації в постраждалих регіонах України. Це дозволить визначити пріоритетні напрямки роботи та необхідні ресурси для управління цими відходами [40].

3. Створення інфраструктури для збирання, сортування та переробки відходів руйнації. Зокрема, необхідно облаштувати спеціальні майданчики для тимчасового зберігання відходів, забезпечити їх транспортування до місць переробки, а також побудувати сучасні комплекси з переробки будівельних відходів [40].

4. Впровадження сучасних технологій переробки відходів руйнації, які дозволяють максимально залучити їх у господарський обіг як вторинну сировину. Наприклад, бетонний лом може використовуватись як заповнювач для нових бетонних сумішей, металобрухт - як сировина для металургійної промисловості, а цегляний бій - для виробництва керамічних виробів [242].

5. Стимулювання використання перероблених відходів руйнації у будівництві та інших галузях економіки. Для цього необхідно розробити відповідні стандарти та технічні регламенти, які б встановлювали вимоги до якості та безпечності продукції з перероблених відходів, а також передбачити економічні стимули для компаній, які використовують такі матеріали [315].

6. Проведення інформаційно-просвітницької кампанії серед населення та бізнесу щодо важливості належного поводження з відходами руйнації та переваг їх переробки та повторного використання. Це дозволить підвищити екологічну свідомість суспільства та залучити громадськість до вирішення проблеми відходів [4].

7. Налагодження міжнародної співпраці для залучення передового досвіду, технологій та інвестицій у сферу управління відходами руйнації. Зокрема, Україна може скористатися підтримкою країн ЄС, які мають успішний досвід поводження з будівельними відходами, а також міжнародних фінансових організацій, таких як Світовий банк, ЄБРР та інших [173].

Впровадження ефективної системи управління відходами руйнації в Україні матиме значні екологічні, економічні та соціальні переваги. По-перше, це дозволить зменшити негативний вплив відходів на довкілля та здоров'я людей, запобігти забрудненню ґрунтів, водойм та повітря небезпечними речовинами. По-друге, переробка відходів руйнації дозволить зменшити потребу у видобутку первинної сировини, що сприятиме збереженню природних ресурсів та зниженню викидів парникових газів. По-третє, використання перероблених матеріалів у будівництві дозволить знизити вартість відбудови зруйнованої інфраструктури та створити нові робочі місця у сфері переробки відходів [52].

Таким чином, відходи руйнації внаслідок військових дій в Україні становлять значну екологічну та економічну проблему, яка потребує комплексного та системного підходу до вирішення. Розробка та впровадження ефективної стратегії управління відходами руйнації, яка включає удосконалення нормативно-правової бази, створення інфраструктури для переробки відходів [41, 49], впровадження сучасних технологій та стимулювання використання вторинної сировини [46, 51], дозволить мінімізувати негативні наслідки війни для довкілля та здоров'я людей [43, 47, 48, 50], а також забезпечити сталий розвиток України в процесі повоєнної відбудови.

За попередніми даними обласних військових адміністрацій, у червні 2023

року загальна кількість зруйнованих або пошкоджених житлових будівель становила близько 167,2 тис.од., з яких 147,8 тис. – приватні будинки, 19,1 тис. – багатоквартирні будинки, 0,35 тис. – гуртожитки. Внаслідок підриву Каховської ГЕС під загрозою затоплення опинилися ще майже 37 тисяч будівель, більшість з яких розташовані у Херсонській області. З них близько 1000 – багатоповерхівки, решта – приватні будинки. Поточний стан ситуації вимагає не лише відновлення окремих будівель, але й комплексної реконструкції міст, розробки нової містобудівної документації та інших заходів. На рисунку 1.1 зображена карта постраждалих регіонів від руйнувань та пошкоджень житлового фонду. Ця карта показує регіональний розподіл зруйнованих або пошкоджених об'єктів у житловому секторі. Колірна градація від світло-оранжевого до темно-червоного відображає кількість пошкоджень в тисячах одиниць по кожному регіону. Чим темніший відтінок, тим більша кількість пошкоджених об'єктів. На карті використані такі показники: менше 1 тис. од., 2-4 тис. од., 6-82 тис. од.

Враховуючи складність та масштаб відходів від руйнації інфраструктури, надзвичайно важливим є детальне розуміння та класифікація різних видів цих відходів. Цей крок є критично важливим для визначення оптимальних методів їх збору, обробки, переробки та безпечного утилізування. Саме тому, ми можемо виділити декілька класифікацій відходів руйнації в залежності від походження та складу самих відходів.

За походженням розрізняють такі види відходів руйнації [24]:

- Відходи планової руйнації - утворюються під час запланованих робіт зі знесення або реконструкції будівель в рамках реалізації будівельних проектів.
- Відходи аварійної руйнації - виникають раптово в результаті обвалень і аварій будівель та споруд внаслідок фізичного зносу, порушення правил експлуатації, стихійних лих тощо.
- Відходи військової руйнації - утворюються в результаті цілеспрямованого знищення або пошкодження цивільних та військових об'єктів під час воєнних

(бойових) дій. До таких відходів належить будівельне сміття від зруйнованих житлових будинків, лікарень, шкіл, заводів, інфраструктурних об'єктів тощо.

В силу ситуації в країні і тривалості військових дій, постає нагальне питання вирішення проблеми саме відходів військової руйнації. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, унаслідок війни в Україні (станом на початок 2023 р.) утворилося понад 15,2 млн тон відходів руйнації і ця кількість продовжує зростати [33].

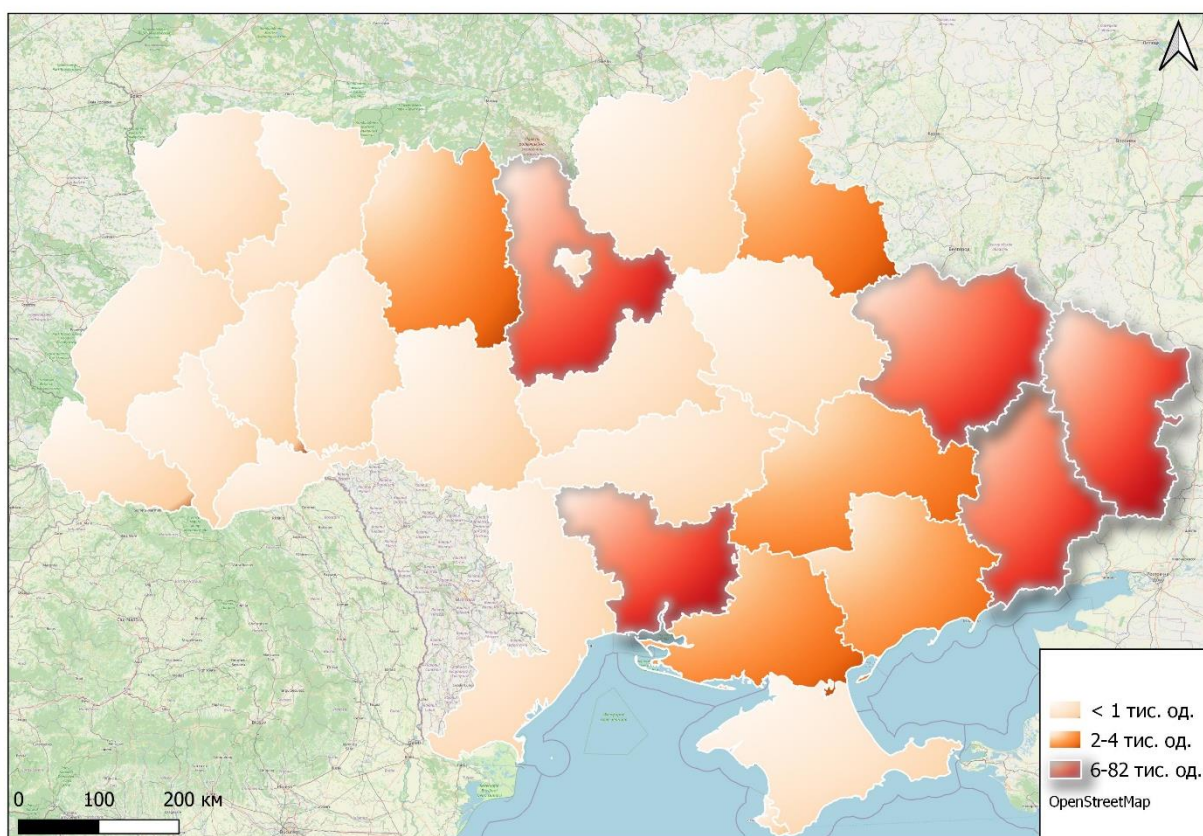


Рис. 1.1. Карта інтенсивності пошкодження житлових об'єктів за регіонами України (розроблено автором за [25])

Великомасштабне руйнації призводить до утворення значних обсягів відходів, які складаються з різноманітних матеріалів, таких як бетон, метал, деревина, скло, пластик тощо. Класифікація відходів є ключовим аспектом ефективного управління ресурсами та зменшення впливу на довкілля. Відходи можна поділити на кілька основних типів, кожен з яких має свої властивості та способи переробки або утилізації.

До основних типів відходів руйнації відносяться [18]:

- Будівельні відходи: матеріали, що залишаються після будівництва або ремонтних робіт.
- Відходи дорожнього покриття: матеріали, які видаляються при реконструкції або ремонті дорожньої інфраструктури.
- Комунальна інфраструктура: відходи від комунальних підприємств, включаючи електричні та телекомунікаційні компоненти.
- Побутові відходи: щоденні відходи, що утворюються в домогосподарствах.
- Небезпечні відходи: матеріали, які можуть завдати шкоди здоров'ю людей або довкіллю.

Більш детально конкретні матеріали кожного типу відходів, зображені на рис. 1.2., де представлена візуальна схема з переліком та класифікацією.

Збір точної інформації про кількість та типи відходів представляє собою складне завдання, проте він є надзвичайно важливим для розробки стратегій управління відходами та координації відповідних процесів. Ключовим аспектом ефективного управління відходами є глибоке розуміння складу матеріалів, що підлягають переробці. Для більш детального розуміння розберемося з основними компонентами цих відходів [18, 7, 68, 89], які включають:

- Будівельне сміття - уламки цегли, бетону, черепиці, каменю, гіпсу, кераміки, штукатурки тощо. За оцінками експертів, частка таких відходів становить 60-80% загального об'єму відходів руйнації.
- Деревина - залишки дерев'яних конструкцій, балок, дошок, старі віконні та дверні блоки. Частка деревини у відходах - 5-15%.
- Метал - арматура, металеві труби, профільований метал. Частка металу - 5-10%.
- Скло та пластик від розбитих вікон, дверей, опалювальних систем тощо. Їх частка становить 1-5%.
- Ізоляційні матеріали - залишки мінеральної вати, пінопласту, інших

утеплювачів (1-5%).

- Бітум - рештки гідро- та пароізоляції, покрівлі (1-5%).
- Азбестовмісні матеріали - старі труби, листи, плитка (1-2%).

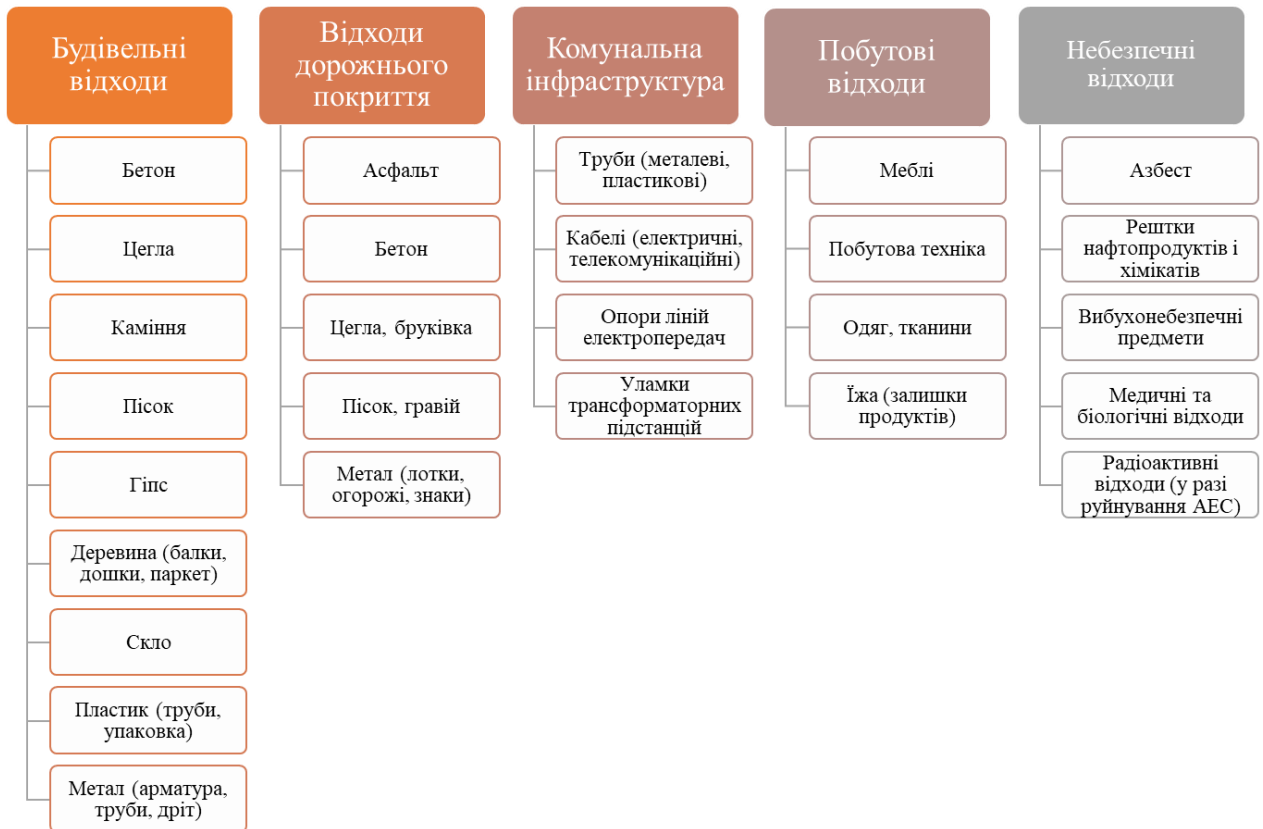


Рис. 1.2. Класифікація відходів за типами (власна розробка за даними [18, 89])

На рисунку 1.3 представлена діаграма, яка ілюструє відсоткове розподілення типового складу відходів, що утворюються в результаті руйнації будівель. На цій діаграмі чітко видно, які матеріали є найбільш розповсюдженими у відходах, що дозволяє визначити ключові напрямки для вдосконалення технологій переробки. Розуміння складу відходів не тільки спрощує їх класифікацію та сортування, але й відіграє вирішальну роль у мінімізації впливу на довкілля. Наприклад, знання вмісту бетону, який часто містить армуючу сталь, вимагає розробки технологій, які можуть ефективно відділяти ці компоненти для подальшої переробки. Аналогічно, деревина, яка може бути використана для виробництва енергії або як вторинна

сировина у виробничих процесах, потребує розробки методів, що мінімізують її забруднення під час демонтажу та сортування. Крім того, ідентифікація токсичних чи небезпечних компонентів, таких як азбест або важкі метали, є критичною для забезпечення безпечного поводження з такими матеріалами та запобігання шкоди для здоров'я робітників та місцевих громад. Таким чином, аналіз складу відходів не просто дозволяє розробити більш цілеспрямовані та ефективні методи переробки, але й є ключовим для запобігання створення нових екологічних проблем. Він також відіграє важливу роль у відновленні цінних ресурсів із відходів, сприяючи таким чином економіці замкнутого циклу, де матеріали постійно повертаються в ужиток, замість того, щоб опинятися на сміттєзвалищах.

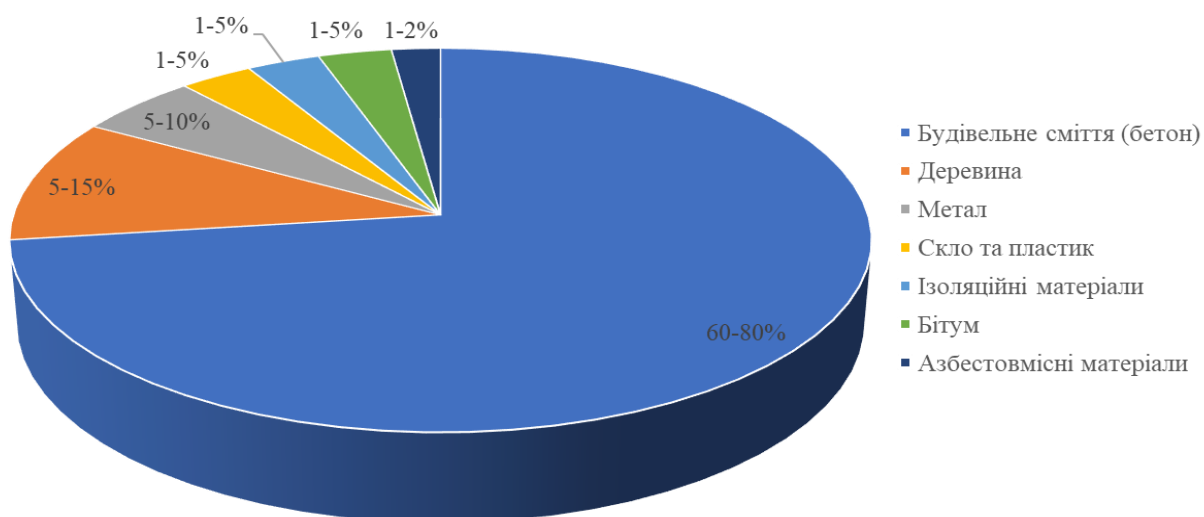


Рис. 1.3. Склад відходів руйнації за відсотковим співвідношенням компонентів [власна розробка за даними [18, 7, 68]

Відходи, без належного управління та переробки, можуть призвести до серйозних проблем з забрудненням навколишнього середовища. Екологічні виклики, пов'язані з цими відходами, включають потенційне забруднення ґрунту та водних ресурсів, а також проблеми з неконтрольованим скиданням і спалюванням сміття [89]. Кожен з цих типів забруднення має причини та наслідки, які впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей.

1.3. Вплив на довкілля відходів руйнації

Забруднення ґрунтів, водойм та повітря будівельними відходами є серйозною екологічною проблемою, яка вимагає комплексного підходу та впровадження ефективних методів управління відходами. Останні наукові дослідження підтверджують масштаби та наслідки цієї проблеми, а також пропонують потенційні рішення.

Відходи руйнації, які утворюються внаслідок військових дій, стихійних лих або знесення старих будівель, становлять значну загрозу для навколишнього середовища. Неналежне поводження з цими відходами може призвести до забруднення ґрунтів, водойм та повітря, а також негативно вплинути на здоров'я людей та біорізноманіття. Особливо гостро ця проблема постала в Україні в умовах російської агресії, яка призвела до масштабних руйнувань інфраструктури та житлового фонду [348].

Вплив відходів руйнації на ґрунти та землекористування. Однією з основних проблем, пов'язаних з відходами руйнації, є їх вплив на ґрунти та землекористування. При неконтрольованому накопиченні будівельних відходів відбувається механічне пошкодження ґрунтового покриву, порушення його структури та ущільнення [251]. Це призводить до погіршення водно-повітряного режиму ґрунтів, зниження їх родючості та здатності підтримувати рослинність. Крім того, відходи руйнації часто містять небезпечні речовини, такі як важкі метали (свинець, кадмій, ртуть), нафтопродукти, азбест, які можуть вимиватися з відходів та накопичуватися в ґрунтах [147]. Ці речовини здатні мігрувати по ґрунтовому профілю, потрапляти в ґрунтові води та поглинатися рослинами, що створює ризики для здоров'я людей та тварин [269].

Накопичення відходів руйнації на значних територіях також призводить до вилучення земель з господарського обігу та зміни ландшафтів. Це особливо актуально для України, де через військові дії утворюються цілі завали зруйнованих будівель та інфраструктури, які потребують значних площ для складування та

переробки [56].

Забруднення водних ресурсів відходами руйнації. Відходи руйнації також становлять загрозу для водних ресурсів, оскільки можуть потрапляти у поверхневі та підземні води внаслідок вимивання небезпечних речовин з місць їх накопичення. Зокрема, при контакті з водою будівельні відходи здатні вивільняти такі забруднювачі, як сульфати, хлориди, феноли, нафтопродукти, які погіршують якість води та порушують функціонування водних екосистем [358]. Особливу небезпеку становлять відходи, що містять азбест - канцерогенну речовину, яка здатна потрапляти у водойми через повітря або з поверхневим стоком [90]. Потрапляння азбестових волокон у питну воду може призводити до розвитку онкологічних захворювань у людей та тварин.

Військові дії в Україні також призвели до руйнування очисних споруд та каналізаційних систем, що спричинило потрапляння неочищених стічних вод у річки та водосховища [55]. Це створює додаткові ризики для забруднення водних ресурсів патогенними мікроорганізмами, біогенними елементами та іншими небезпечними речовинами.

Вплив відходів руйнації на атмосферне повітря. Відходи руйнації можуть негативно впливати на якість атмосферного повітря через емісію пилу та газоподібних речовин. При руйнуванні будівель та споруд утворюється значна кількість пилу, який містить частинки бетону, цегли, гіпсу, азбесту та інших матеріалів [252]. Вдихання цього пилу може призводити до респіраторних захворювань, таких як силікоз, азбестоз, бронхіт та інші.

Крім того, при горінні відходів руйнації, особливо тих, що містять пластик, гуму та інші синтетичні матеріали, в атмосферу виділяються токсичні гази, такі як діоксини, фурани, поліароматичні вуглеводні [313]. Ці речовини здатні переноситися на значні відстані, осідати на ґрунтах та рослинності, а також потрапляти в організм людини через дихання та харчові ланцюги.

В умовах військових дій в Україні проблема забруднення повітря відходами руйнації збільшується через масштабні пожежі на об'єктах інфраструктури,

складах боєприпасів та паливно-мастильних матеріалів [362]. Горіння цих об'єктів призводить до викидів в атмосферу значної кількості небезпечних речовин, таких як оксиди сірки, азоту, чадний газ, сажа та інші.

Вплив відходів руйнації на біорізноманіття. Накопичення відходів руйнації на значних територіях може призводити до деградації природних екосистем та втрати біорізноманіття. Механічне пошкодження ґрунтів та рослинного покриву, забруднення води та повітря токсичними речовинами, зміна ландшафтів - все це порушує умови існування багатьох видів флори і фауни [127]. Особливо вразливими до впливу відходів руйнації є рідкісні та зникаючі види, які потребують специфічних умов середовища та мають обмежений ареал поширення. Руйнування їх оселищ внаслідок військових дій та неналежного поводження з відходами може призвести до незворотної втрати цих видів [38]. Крім того, відходи руйнації можуть ставати пастками для диких тварин, які можуть травмуватися або гинути, потрапляючи в завали та ями з будівельним сміттям. Також тварини можуть отруюватися, споживаючи забруднену відходами воду та їжу [19].

Дослідження, проведене групою вчених на чолі з Янгом, виявило, що будівельні відходи, особливо ті, що містять цемент, бетон та цеглу, можуть суттєво змінювати хімічний склад ґрунту. Зокрема, вони збільшують рівень рН та вміст карбонатів, що призводить до погіршення родючості та пригнічення росту рослин [229]. Крім того, важкі метали, такі як свинець, кадмій та хром, що містяться у будівельних відходах, можуть накопичуватися в ґрунті та потрапляти в харчовий ланцюг, становлячи загрозу для здоров'я людей та тварин [286].

Забруднення водою будівельними відходами також має серйозні наслідки для водних екосистем. Дослідження, проведене Пастор та Ернандез, показало, що замулення водою внаслідок потрапляння будівельного сміття призводить до зниження прозорості води, зменшення кількості розчиненого кисню та порушення життєвих циклів водних організмів [189]. Токсичні речовини, такі як поліхлоровані біфеніли (ПХБ) та поліароматичні вуглеводні (ПАВ), що містяться в будівельних матеріалах, можуть накопичуватися в тканинах риб та інших гідробіонтів, що

призводить до їх отруєння та загибелі [206].

Забруднення повітря, спричинене спалюванням будівельних відходів, є ще однією серйозною проблемою. Дослідження, проведене Нжоу та його командою, виявило, що при спалюванні відходів, особливо пластику та деревини, в атмосферу викидається значна кількість діоксинів, фуранів та інших токсичних речовин [277]. Ці забруднювачі можуть викликати респіраторні захворювання, алергічні реакції та навіть онкологічні захворювання у людей, які зазнають тривалого впливу [129].

Для вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища будівельними відходами необхідно впроваджувати комплексні стратегії управління відходами. Одним із ключових підходів є розробка ефективних методів сортування та переробки будівельного сміття. Дослідження, проведене Ксьяо та його колегами, показало, що впровадження автоматизованих систем сортування на основі оптичних сенсорів дозволяє відокремити вторинну сировину (метали, скло, деревину) від небезпечних компонентів з точністю до 95% [366]. Це дозволяє значно збільшити частку відходів, що направляються на переробку та повторне використання.

Іншим важливим аспектом є розробка нових будівельних матеріалів на основі перероблених відходів. Дослідження, проведене Карвало та його командою, продемонструвало можливість використання подрібненого бетонного сміття як часткової заміни природного заповнювача в нових бетонних сумішах без істотного зниження міцності та довговічності [130]. Використання вторинних матеріалів не тільки зменшує потребу в природних ресурсах, але й скорочує обсяги відходів, що підлягають захороненню.

Для ефективної боротьби із забрудненням навколишнього середовища будівельними відходами також необхідно посилювати законодавче регулювання та контроль у цій сфері. Дослідження, проведене Там і Лу, показало, що країни з більш суворими нормами щодо управління відходами та вищими штрафами за незаконне розміщення сміття мають значно нижчі показники забруднення ґрунтів та водойм [338].

Важливу роль у вирішенні проблеми відіграє також екологічна освіта та просвітництво. Дослідження, проведене Юсуф та його командою, виявило, що проведення інформаційних кампаній та навчальних програм для будівельних компаній та населення сприяє підвищенню рівня обізнаності про наслідки неналежного поводження з відходами та заохочує до більш відповідального ставлення [368].

Впровадження принципів "зеленого будівництва" та екологічного проектування також може суттєво зменшити обсяги будівельних відходів та їх негативний вплив на довкілля. Дослідження, проведене К. Брауном та його колегами, показало, що застосування модульних конструкцій, використання екологічно чистих матеріалів та оптимізація будівельних процесів дозволяють скоротити кількість відходів на 60-80% порівняно з традиційними методами будівництва [254].

Для зменшення негативного впливу відходів руйнації на навколишнє середовище необхідно впроваджувати комплексні заходи щодо їх збирання, сортування, переробки та безпечного захоронення. Ключовими напрямками роботи в цій сфері мають бути [254]:

- удосконалення нормативно-правової бази щодо поводження з відходами руйнації, встановлення чітких вимог до їх класифікації, інвентаризації та утилізації;

- створення інфраструктури для роздільного збирання та сортування відходів руйнації, облаштування спеціальних майданчиків для їх тимчасового зберігання;

- впровадження сучасних технологій переробки відходів руйнації, таких як подрібнення бетону та цегли для використання як вторинного заповнювача, вилучення металобрухту для переплавки, утилізація деревини тощо;

- будівництво полігонів для безпечного захоронення відходів руйнації, які не підлягають переробці, з дотриманням санітарно-екологічних норм та обладнанням системами моніторингу;

- проведення рекультивації територій, забруднених відходами руйнації,

відновлення ґрунтового та рослинного покриву, очищення водою;

- посилення контролю за дотриманням природоохоронного законодавства при поводженні з відходами руйнації, притягнення до відповідальності осіб та організацій, які допускають порушення;

- проведення інформаційно-просвітницької роботи серед населення та бізнесу щодо необхідності роздільного збирання та переробки відходів руйнації, популяризація принципів циркулярної економіки.

Важливу роль у мінімізації впливу відходів руйнації на довкілля також відіграє міжнародна співпраця та залучення донорської допомоги. Зокрема, Україна може скористатися досвідом інших країн, які стикалися з проблемою масштабних руйнувань внаслідок військових конфліктів або стихійних лих, таких як Боснія і Герцеговина, Ліван, Японія. Також важливо залучати кошти міжнародних організацій та фондів для фінансування проектів з переробки відходів руйнації та відновлення довкілля.

Рациональне управління відходами руйнації дозволить не лише зменшити їх негативний вплив на довкілля, але й отримати додаткові ресурси для відбудови зруйнованої інфраструктури. Використання перероблених будівельних відходів як вторинної сировини сприятиме зменшенню потреби у видобутку природних ресурсів та зниженню викидів парникових газів. Тому питання поводження з відходами руйнації має стати одним з пріоритетів державної екологічної політики України в умовах повоєнного відновлення.

1.4. Розвиток підходів до рециклінгу відходів руйнації

У світовій практиці спостерігається постійне зростання обсягів відходів руйнації, що вимагає розвитку ефективних підходів до їх утилізації та рециклінгу.

Оскільки Україна рухається шляхом інтеграції з ЄС, а отже і запровадження основних законодавчих актів та директив, варто розглянути наявну систему управління цими відходами саме в країнах Європейського Союзу.

В країнах ЄС впроваджено концепцію «нульових відходів», яка передбачає максимально можливе вторинне використання матеріалів, отриманих з відходів [144]. Управління відходами руйнації є ключовим аспектом у ЄС, особливо в рамках Директиви про відходи [175], яка має на меті підвищити рівень переробки та відновлення цього типу відходів. До 2020 року директива встановила ціль збільшити повторне використання, переробку та інші способи відновлення таких відходів до мінімуму 70% за вагою. І на той час багато країн досягли, і навіть перевиконали цей план. Ця ціль є частиною ширшої мети переходу до циркулярної економіки, де можна реалізувати повний потенціал відходів руйнації за допомогою екологічно безпечного управління. Незважаючи на потенціал, рівень переробки та матеріального відновлення цих відходів значно варіюється по ЄС, у деяких країнах переробляється понад 90% відходів руйнації, тоді як у інших - менше ніж 30% [299,176].

На рисунку 1.4, відображено відсоток утилізації відходів від будівництва та демонтажу в країнах ЄС-27 за останніми статистичними даними 2018 року.

Проекти, як-от «Seramco» у північно-західній Європі, є одними із перших у цій сфері, використовуючи відходи від будівництва та демонтажу для виготовлення залізобетонних виробів, метою яких є створення ринку для цих сталих продуктів по всій Європі [314]. Ця ініціатива не тільки сприяє створенню робочих місць та зниженню залежності від природних ресурсів, а і відображає тенденцію до більш сталої практики, з будівельним сектором як пріоритетом для переходу до циркулярної економіки в Європі [172].

Дані показують, що країни значно відрізняються за рівнем відновлення цих відходів. Це відображає різницю у національних підходах до управління відходами, їх переробки та повторного використання, а також може віддзеркалювати ефективність політик з управління відходами та інвестицій у відповідні технології. Країни з високими показниками можуть бути прикладом ефективної практики та стратегій у сфері будівельних відходів та відходів руйнації.

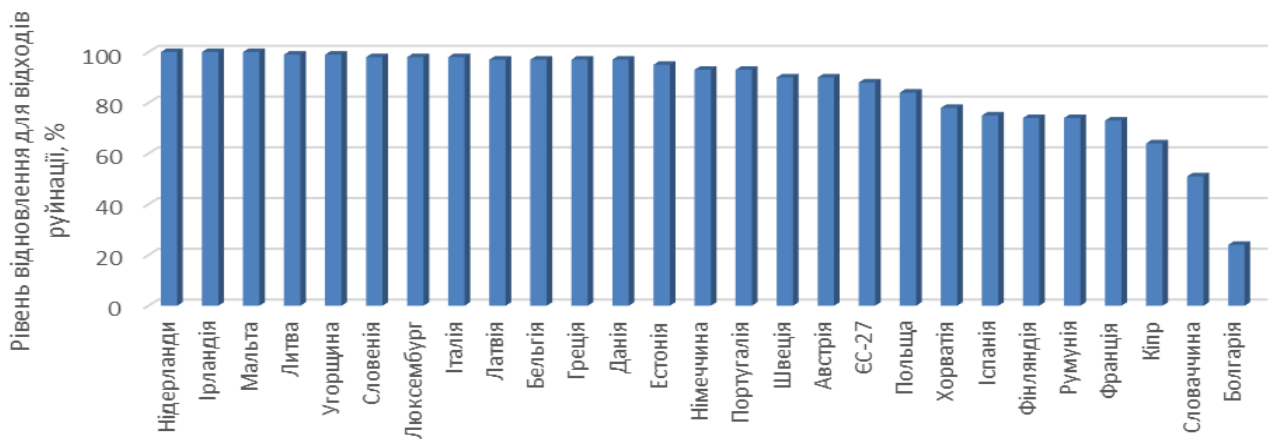


Рис. 1.4. Рівень відновлення відходів руйнації в ЄС-27 у 2018 році, за країнами [299]

Наприклад, такі країни як Німеччина, Нідерланди та Австрія відомі своїми передовими стратегіями управління відходами. Німеччина та Нідерланди мають суворі правила, які відмовляють від використання звалищ для перероблених матеріалів з будівництва та демонтажу, сприяючи переробці та повторному використанню. В Австрії високі показники переробки — близько 87% відходів будівництва та демонтажу, зі збором відходів, який зазвичай відбувається безпосередньо на місці через контейнерні системи, керовані спеціалізованими операторами. У Бельгії були вжиті рішучі заходи проти захоронення будівельних відходів, заборонивши утилізацію вторинно перероблених будівельних матеріалів. Ця політика частково обумовлена високою густотою населення та обмеженістю місця на існуючих звалищах. У Нідерландах вже майже десятиліття діє законодавство, яке забороняє вивезення на звалища перероблених будівельних відходів. Цей закон відображає ширший європейський тренд, за яким країни не тільки заохочуються, але іноді зобов'язуються надавати докази неможливості переробки відходів перед їх дозволом на захоронення. Для підтримки цих зусиль Європейська комісія розробила нормативні вказівки в рамках Протоколу про відходи від будівництва та демонтажу, щоб підвищити довіру до процесу управління відходами та віри в якість перероблених матеріалів. Це включає

поліпшення ідентифікації відходів, їх роздільного збору та переробки, а також управління якістю [176, 314].

Циркулярні практики ЄС у будівельному секторі є ключем до збільшення переробки матеріалів та зменшення кількості небезпечних відходів. Це включає в себе збереження цінності матеріалів якомога довше та зменшення кількості небезпечних речовин у продуктах та відходах. Спочатку концепція циркулярної економіки виникла на основі принципу 3R (Reduce-Reuse-Recycle - скорочення-повторне використання-переробка). Згодом вона перетворилася на концепцію 4R (Reduce-Reuse-Recycle-Recower), зосереджуючись на операціях зі скорочення-використання-переробки-відновлення сировини [172].

Ось детальніше пояснення концепції 4R, що може бути застосована до комплексного управління відходами руйнації [115, 274]:

1. Скорочення (Reduce):

- Ретельне проектування будівель і споруд для мінімізації відходів шляхом оптимізації розмірів конструктивних елементів, узгодження проектних рішень між усіма учасниками будівництва.
- Раціональне планування постачання і зберігання матеріалів на будмайданчику для запобігання пошкодженням, крадіжкам та псуванню.
- Детальні розрахунки потреби в матеріалах, виробках, конструкціях з урахуванням технологічних відходів та втрат.
- Підбір більш економних і екологічних матеріалів, наприклад збірного залізобетону замість моноліту.

2. Повторне використання (Reuse):

- Багаторазове застосування опалубки, риштувань та інших тимчасових споруд шляхом їх демонтажу, транспортування і монтажу на нових об'єктах.
- Збирання та реалізація в інші проекти б/в матеріалів: цегли, балок, арматури, плит. За потреби - їх додаткова обробка чи сортування.
- Окремий демонтаж придатних для повторного застосування конструкцій, виробів та матеріалів.

3. Переробка (Recycle):

- Сортування відходів за видами (метал, деревина, бетон, цегла, пластмаса тощо) для підготовки до подальшої утилізації.
- Подрібнення відсортованих відходів у мобільних дробарках для отримання вторинної сировини. Наприклад, бетону в щебінь.
- Застосування виготовлених матеріалів з перероблених відходів (золи, шлаку, пластику, ґрунту) у новому будівництві і дорожніх роботах.

4. Відновлення (Recower):

- Спалювання деревних, паперових та інших відходів на місці або на сміттєпереробних заводах для отримання теплової енергії.
- Виробництво будівельних матеріалів з побутових органічних решток, наприклад, біопластику, біобетону чи аглоплит.
- Наповнення земляних виїмок для рекультивації порушених будівництвом територій шляхом засипки ґрунтом з неутилізованих залишків.

Отже, збалансоване впровадження концепції 4R сприяє раціональному використанню ресурсів та екологізації будівництва.

Утилізація відходів саме військової руйнації має ряд своїх особливостей. І найперше, що спочатку їх потрібно ретельно відсортувати. Ускладняється це тим, що сортувальний процес має виконуватися вручну або механічним способом, оскільки серед завалів можуть бути нерозірвані боєприпаси або навіть тіла людей. Після сортування потрібно визначити, які матеріали можна використовувати знову (наприклад, скло, метал, пластик, бетон), а які не підлягають переробці і вимагають утилізації (наприклад, деформовані теплоізоляційні елементи фасаду).

Другим етапом є зменшення об'єму відсортованих відходів за допомогою спеціальних дробильно-подрібнювальних установок. Наприклад, у Харкові використовують спеціальний подрібнювач, який може зменшити об'єм відходів у п'ять-вісім разів — це залежить від матеріалу, з якого зведено будівлю. Для управління таким комплексом потрібен лише один працівник, що істотно скорочує час та трудовитрати. Комплекс оснащений подрібнювачем та магнітним

сепаратором, що дозволяє подрібнювати бетонні плити на щебінь і потім за допомогою магніту відсортовувати металеву арматуру. Це дозволяє зменшити об'єм у 5-8 разів та полегшує транспортування й утилізацію.

Наступним етапом є повернення зібраних і відсортованих матеріалів в обіг із використанням їх як вторинної сировини: подрібнений метал, який називають «чорний метал», може бути повернений у використання після переплавлення. Будівельні «кам'яні» відходи придатні для виробництва різного роду будівельної продукції. Перш за все йдеться про використання їх для підсипки під дороги та заповнення ям від вибухів снарядів. Цілі уламки будинків можуть бути використані як окремі конструктивні елементи, а повалені дерева перероблені на дрова. Асфальт можна повторно використати у будівництві доріг, але спочатку термічно обробивши при високій температурі. Заповнювачі, одержані із переробленого бетону, можуть бути використані у будівельних конструкціях для створення бетону. В Україні є заводи для виробництва такого бетону. Інститут ДП "НДІБК" представляє Україну в Міжнародній федерації бетону, і співробітники установи вже звернулися з пропозицією про можливість використання досвіду європейських країн з використання бетону з будівельних відходів [8].

В Україні проблематика управління відходами руйнації набула особливої гостроти в контексті значних обсягів утворення будівельних відходів внаслідок інтенсивного оновлення житлового фонду та інфраструктури, а також руйнувань, спричинених військовими діями. Незважаючи на те, що питання рециклінгу відходів руйнації почали системно регулюватися на законодавчому рівні ще з кінця 90-х років ХХ століття, реальне поширення технологій переробки цих відходів в Україні відбулося лише в останнє десятиліття [3].

За даними статистичних спостережень, частка перероблених відходів будівництва та знесення в Україні у 2020 році становила лише 23% від загального обсягу утворених відходів даного типу [3]. Такий відносно низький рівень залучення відходів руйнації у повторний господарський обіг свідчить про

недостатню ефективність існуючої системи поводження з будівельними відходами та наявність значних резервів для розвитку рециклінгу в даній сфері.

Проблеми організації ефективного управління відходами руйнації в Україні привертають увагу вітчизняних науковців, які досліджують різні аспекти даного питання. Зокрема, Шпакова Г.В. та Шпаков А.В. [106] акцентують увагу на необхідності формування комплексної стратегії поводження з відходами будівництва та знесення на засадах циркулярної економіки, що передбачає максимальне залучення вторинних ресурсів у виробничі процеси та мінімізацію обсягів захоронення відходів. Автори наголошують на потребі розвитку інфраструктури роздільного збирання та сортування відходів руйнації, створенні економічних стимулів для суб'єктів господарювання щодо впровадження технологій рециклінгу, підвищенні екологічної свідомості населення.

У роботі Токарчука І. [101] проаналізовано організаційно-економічний механізм поводження з відходами руйнації в Україні та виявлено основні проблеми, що перешкоджають розвитку рециклінгу будівельних відходів. Серед ключових бар'єрів автор виділяє недосконалість нормативно-правової бази, відсутність ефективних економічних інструментів стимулювання переробки відходів, низький рівень обізнаності та зацікавленості стейкхолдерів, недостатній розвиток спеціалізованої інфраструктури та логістики. Запропоновано комплекс заходів щодо вдосконалення організаційно-економічного механізму управління відходами руйнації на основі принципів циркулярної економіки.

Питання технологічних аспектів рециклінгу відходів руйнації розглядаються в дослідженні Маслош О. В. і Подкуйко В. М. [58]. Авторами проаналізовано сучасні методи переробки будівельних відходів, зокрема дроблення, сортування, фракціонування тощо. Наведено результати експериментальних досліджень властивостей рециклінгових заповнювачів з бетону лому та визначено перспективні напрями їх використання у виробництві будівельних матеріалів. Обґрунтовано доцільність розвитку технологій переробки відходів руйнації з

метою зниження техногенного навантаження на довкілля та ощадливого використання мінерально-сировинних ресурсів.

Аналіз екологічних та економічних ефектів рециклінгу відходів руйнації в Україні представлено в роботі Арутюнян А. І. та Шуваєв А. А. [2]. За допомогою аналізу сучасного стану проблеми авторами визначено потенціал зниження викидів парникових газів та споживання природних ресурсів за умови максимального залучення відходів руйнації у повторний обіг. Наведено економічні вигоди від впровадження рециклінгу будівельних відходів на регіональному та національному рівнях з урахуванням ринкової вартості вторинної сировини, зниження витрат на захоронення відходів, створення нових робочих місць тощо.

У дослідженні Потіп М. М. [88] розглянуто питання нормативно-правового регулювання поводження з відходами руйнації в Україні. Автором проаналізовано основні законодавчі та підзаконні акти, що визначають вимоги до управління будівельними відходами на різних етапах життєвого циклу об'єктів. Особливу увагу приділено останнім змінам у правовому полі, зокрема затвердженню Кабінетом Міністрів України Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків [87]. Відзначено, що дані нормативні новації створюють підґрунтя для розвитку рециклінгу як пріоритетного способу поводження з відходами руйнації в умовах повоєнного відновлення України.

Перспективи впровадження принципів циркулярної економіки в управління відходами руйнації в процесі реконструкції постраждалих регіонів України досліджено в роботі Сігал О. І. та Павлюк Н. Ю. [98]. Авторами запропоновано концептуальну модель організації замкнених циклів використання матеріальних ресурсів при відновленні зруйнованих територій, що базується на максимальному залученні рециклінгових матеріалів та відходів у будівельне виробництво. Обґрунтовано економічну доцільність та екологічні переваги реалізації запропонованої моделі з точки зору зниження енерго- та ресурсоемності

будівельних процесів, мінімізації утворення відходів, скорочення викидів забруднюючих речовин.

Таким чином, проблематика поводження з відходами руйнації в Україні, зокрема в аспекті розвитку рециклінгу як ефективного способу їх утилізації, є предметом активних наукових досліджень вітчизняних вчених. В роботах розглядаються питання вдосконалення нормативно-правового та організаційно-економічного забезпечення управління будівельними відходами, впровадження сучасних технологій їх переробки, оцінки еколого-економічної ефективності рециклінгу, розвитку циркулярних практик в умовах повоєнної відбудови тощо.

Водночас, незважаючи на наявність певних позитивних зрушень у сфері регулювання поводження з відходами руйнації, зокрема прийняття відповідних нормативно-правових актів, рівень їх практичної імплементації залишається недостатнім. Існує потреба в подальшому розвитку інституційних, інфраструктурних, фінансово-економічних та інформаційних механізмів стимулювання рециклінгу будівельних відходів в Україні. Вирішення даної проблеми вимагає консолідації зусиль держави, бізнесу, науки та громадськості задля формування сприятливих умов для переходу до циркулярної моделі поводження з відходами руйнації та мінімізації їх негативного впливу на довкілля.

1.5. Стале будівництво: огляд існуючих досліджень і практик використання відходів руйнації як заповнювачів бетону

Стале будівництво набуває все більшої актуальності в контексті глобальних екологічних викликів та необхідності раціонального використання ресурсів. Одним із перспективних напрямків у цій сфері є використання відходів руйнації як заповнювачів бетону, що дозволяє зменшити потребу в природних матеріалах та скоротити обсяги будівельних відходів, які потребують утилізації.

Будівельний сектор має значний вплив на навколишнє середовище, головним чином через виробництво та використання бетону [131]. Приблизно 25 Гт бетону

використовується у світі щороку [243]. Будівельна галузь є однією з найбільш ресурсномістких, тому питання екологізації та зниження викидів вуглецю є надзвичайно актуальним. Концепція сталого розвитку передбачає раціональне використання ресурсів та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Одним з ефективних напрямів реалізації принципів сталості є застосування перероблених матеріалів замість природної сировини.

Внаслідок подрібнення бетонних та залізобетонних конструкцій після руйнації утворюється щебінь (заповнювач), який цілком придатний для повторного використання у бетонах. Це дозволяє скоротити використання гравію, щебню та піску, зменшити кар'єрні розробки [199]. Крім економії природних ресурсів, такий рециклінг будівельних відходів допомагає вирішити проблему їх накопичення. Адже поводження з відходами та їх розміщення також негативно впливає на стан довкілля [135].

Сталий розвиток у будівництві полягає у врахуванні всіх позитивних і негативних наслідків діяльності та забезпеченні пріоритетності максимальної кількості позитивних аспектів.

Отже, застосування переробленого заповнювача бетону як компонента бетону відповідає ключовим принципам сталого будівництва, а саме: зменшення споживання ресурсів, повторне використання матеріалів, скорочення відходів тощо.

Багато авторів [135, 136, 124, 146, 194, 200, 275] вивчали питання про вплив будівництва, знесення, розробки кар'єрів і видобутку корисних копалин на навколишнє середовище та благоустрій, а також про переваги переробки або повторного використання матеріалів таких відходів. У [135] надано рекомендації для промисловості Великобританії щодо найкращих практик управління об'єктами з переробки відходів та контролю їхніх викидів. В свою чергу, англійські дослідники проаналізували енергоспоживання, викиди та екологічні показники португальського заводу з переробки відходів науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт і визначили можливості для вдосконалення [136, 124]. Декілька дослідників обґрунтували економічну доцільність збільшення обсягів

переробки та повторного використання відходів у сфері досліджень і розробок. Наприклад, в цій роботі [146] використовували дослідження ланцюгів поставок, щоб продемонструвати технічну та фінансову життєздатність повторного використання відходів як заповнювачів. Авторами [146] було розроблено посібник для визначення екологічно оптимальних стратегій переробки відходів знесення, адаптований до проектів у Шотландії. Group S. [194] оцінив економічні витрати та вигоди в ЄС, підтвердивши економічну ефективність поводження з відходами. Також були запропоновані методології для інтеграції екологічних міркувань у планування знесення та прийняття рішень щодо переробки відходів. Guthrie P. [200] окреслив цілі дослідницької ініціативи CIRIA щодо практик мінімізації відходів у будівельній галузі Великобританії.

Загалом, огляд літератури вказує на те, що за допомогою правильного аналізу, планування та методів, відходи руйнації можуть бути перенаправленні зі звалищ та повторно використані/перероблені в економічно та екологічно обґрунтований спосіб.

Використання відходів руйнацій як заповнювачів для виготовлення бетону почалося під час та після Другої світової війни у зв'язку із значним обсягами завалів, коли потрібно було терміново розчистити території у містах Європи [275]. З'ясувалося, що подрібнений бетон цілком придатний як заповнювач замість природнього гравію чи щебню [275]. В той час було досліджено, що такий бетон має вищий рівень водопоглинання та нижчу міцність на стиск, порівняно із звичайним бетоном, але при цьому показує подібну стійкість до замерзання/відтавання та меншу стійкість до сухої усадки [275, 205].

У 40-80-х роках активно досліджували властивості переробленого з бетону щебню та бетону на його основі. Проводилися обширні дослідження процесу переробки відходів руйнації, увага зосереджувалась саме на властивостях перероблених агрегатів (наприклад, щільність, форма та водопоглинання) та на механічних властивостях (наприклад, стискання, розтягування та згинання), а також на довговічних властивостях (наприклад, проникність, стійкість до морозу

або карбонації) [145]. До 21-го століття увага дослідників була зосереджена на пропорціях сумішей, можливостях використання заповнювачів і властивостях як попередньо напружений залізобетону та великомасштабних конструкціях (15 метрові балки під попереднім напруженням близько 1300 кН) [296].

Вже новітні дослідження були зосереджені на покращенні якості переробленого заповнювача. Зі зростанням обізнаності про охорону навколишнього середовища та сталий розвиток дослідження використання перероблених заповнювачів стають все більш поширеними. Кількість публікацій про такий бетон значно зросла за останні 20 років. Ці дослідження покращили наше розуміння про заповнювачі і бетон з ними, включаючи їхні механізми, механічні, фізичні та хімічні особливості. Вони також вдосконалили методології прогнозування механічних властивостей і моделей міцності.

Згідно з Сільва та ін. [296], ідеальними сферами застосування заповнювачів рециклінгу є ландшафтний дизайн, дорожнє покриття та будівельний розчин/бетон. В останньому випадку неоднорідність матеріалу збільшується порівняно з природними заповнювачами, що може призвести до більших деформацій у бетоні, хоча були виявлені деякі оптимальні результати, хорошим прикладом яких є подрібнені бетони заповнювачі. Вважається, що додавання бутового каменю, наприклад, кераміки або легкого бетону, знижує механічну міцність. Інші компоненти, такі як асфальт, гіпс, метали, пластик, гума, ґрунт і деревина, можуть значно знизити міцність бетону. З цієї причини настійно рекомендується проводити вибіркове знесення, щоб вилучені матеріали можна було належним чином використати в бетонних сумішах.

Використання переробленого подрібненого бетону заповнювачів у виробництві нового бетону було широко вивчено протягом останніх декількох десятиліть [365, 193, 327, 154]. Перероблений бетонний заповнювач є основним типом переробленого матеріалу, що використовується як замітник природних первинних агрегатів при виготовленні бетону. Цей заповнювач складається з

оригінальних природних агрегатів із відходів бетону, таких як гравій і пісок, разом з адгезійним розчином і цементною пастою [154].

Багато досліджень були зосереджені на вивченні властивостей бетону, що містить різні пропорції крупного і дрібного переробленого заповнювача, і розробці оптимізованих пропорцій суміші [304-305]. Технічний комітет RILEM опублікував всеохоплюючі рекомендації щодо використання перероблених бетонних заповнювачів у новому бетоні на основі лабораторних досліджень та практичного досвіду [304, 305, 302, 303].

Основні рекомендації RILEM:

- Зниження міцності на стиск від 5% до 30% у порівнянні з бетоном з природним агрегатом в залежності від рівня заміни перероблених заповнювачів.
- Загальна кількість заміни до 20-30% крупних природних агрегатів переробленими бетонними для структурних елементів бетону.
- Корекції для поглинання заповнювача, щоб визначити адекватну кількість змішуваної води.
- Коригування дозування суперпластифікаторів для врахування більшого рівня водопоглинання.

Додаткові дослідження Тама та ін. у 2007 році та Табша і Абдельфатаха у 2009 році розробили моделі для прогнозування міцності на стиск, модуля пружності та властивостей усадки при сушінні переробленого агрегатного бетону для різних умов суміші [334, 333]. Нещодавні дослідження Закарії [369] охарактеризували властивості бетону з різним відсотком переробленого бетонного заповнювача, отриманого з відходів знесення. Результати тестів вказали на зниження міцності та модуля пружності, а також збільшення усадки та повзучості з більш високою заміною переробленого бетонного заповнювача замість природних заповнювачів. Гансен [204] також представив вичерпні дані про механічні властивості та довговічність бетону на основі заповнювачів з відходів рециклінгу на основі огляду літератури. У дослідженні були виділені проблеми через змінну якість заповнювачів з відходів рециклінгу зі знесеного бетону.

Сільва та ін. [326] досліджували вплив різних режимів затвердіння на властивості довговічності бетону на основі пластикових відходів. Було встановлено, що метод і тривалість тверднення значно впливають на транспортні та експлуатаційні характеристики бетонів із заповнювачами з відходів рециклінгу.

Дешпанде та ін. [143] оцінювали міцність бетонних сумішей з вмістом із заповнювачами з відходів рециклінгу грубого заповнювача з відходів знесення від 0 до 100%. Порівняно з бетоном на природних заповнювачах, спостерігалось зниження міцності на стиск приблизно на 15-20%. Етксеберріа [169] широко проаналізував твердість, пористість та мікроструктуру бетону з заповнювачем з відходів рециклінгу, отриманого з відходів будівництва та знесення, для визначення наслідків довговічності.

Дослідження Етксеберріа та інших [170] вивчає використання переробленого крупного заповнювача з подрібненого бетону для виробництва бетону, зосереджуючись на його інтеграції при різних відсотках (0%, 25%, 50%, 100%) та впливі на міцність при стиску. Основні результати включають: використання 100% переробленого крупного заповнювача в бетоні призводить до зниження міцності на стиск у 28 днів на 20-25% порівняно зі звичайним бетоном, що створює економічні та екологічні труднощі для досягнення порівняльних характеристик через більшу потребу в цементі. Однак часткова заміна близько 25% традиційного заповнювача переробленим дозволяє отримати механічні властивості, подібні до звичайного бетону. Отже, перероблені заповнювачі краще підходять для бетонних конструкцій, що вимагають середніх міцних характеристик (20-45 МПа), збалансовуючи несучу здатність з покращеною стійкістю у будівництві.

У роботі [265] досліджувався вплив вологості на властивості бетону з переробленим заповнювачем. Зокрема, показано, що для збереження зручності укладання через високу водопоглинальну здатність переробленого заповнювача необхідна його належна волога обробка. Встановлено кінетику поглинання води переробленим заповнювачем та вплив цього процесу на міцнісні характеристики бетону. Продемонстрована можливість часткової (20-40%) заміни природнього

гравію на бетонний перероблений гравій без суттєвого зниження міцності. На відміну від традиційних заповнювачів, кореляція між міцностями на стиск і розтяг для переробленого заповнювача не спостерігається. Робота підкреслює необхідність управління вологістю переробленого заповнювача та підтверджує потенціал обмеженого застосування переробленого заповнювача як альтернативи природнім агрегатам.

Отже, вищезгадані дослідження висвітлюють складний взаємозв'язок між співвідношенням заміщення переробленого бетонного заповнювача, методом виробництва, фізико-хімічними властивостями, твердненням та характеристиками міцності і довговічності бетону із заповнювачем з відходів рециклінгу. Необхідно подальше кількісне визначення цих взаємозалежностей для отримання надійних прогнозів.

З точки ж зору сталого використання ресурсів, перероблені бетонні заповнювача, отримані із подрібнення відходів бетону, показав, що вони можуть бути потенційною заміною для природних заповнювачів у виробництві нового бетону, але такі фактори, як затверділий цементний розчин, що зліпся із заповнювачем, можуть негативно впливати на міцність та властивості деформації, що вимагає корекцій у міксі суміші.

Серед вітчизняних науковців також присутні роботи [91, 100, 15], присвячені вивченню можливостей застосування перероблених матеріалів як заповнювачів бетону. Згідно з узагальненими висновками дисертаційного дослідження Рихліцької О.В. [91], ефективне використання заповнювачів з із заповнювачами з відходів рециклінгу бетону для створення бетонів з покращеними властивостями потребує їх модифікації пуцолановими добавками та суперпластифікаторами. Ключову роль відіграє оптимізація гранскладу для формування щільної структури бетону, що підвищує його характеристики. Застосування таких заповнювачів сприяє екологічності та економічності бетону. Показана можливість отримання бетонів з високими експлуатаційними показниками, що підтверджує практичне значення розробок.

У роботі [15] розглядається проблема утилізації будівельних відходів в Україні та потенціал технологій 3D-друку для повторного використання перероблених матеріалів. Автори пропонують концепцію мобільного комплексу для подрібнення, сортування та друку сумішей з відходів як економічно ефективного рішення. Підкреслюється необхідність державної підтримки та подальших досліджень у цьому напрямі.

Українські науковці та практики активно досліджують та впроваджують використання відходів руйнації в будівництві. Зокрема, значні зусилля спрямовані на переробку та повторне використання будівельних матеріалів після знищення будівель у результаті військових дій. Зокрема, значні зусилля спрямовані на переробку та повторне використання будівельних матеріалів після знищення будівель у результаті військових дій.

Французька компанія Neo-Eco реалізувала проект з переробки відходів будівельного руйнування в Гостомелі. Було досягнуто 90% рівня переробки будівельних відходів, що включає бетон, цеглу, метал та інші матеріали. Ці відходи були використані для створення нових будівельних матеріалів для будівництва сучасних житлових районів [138]. Українська компанія, під керівництвом Дмитра Родіонова, директора будівельної компанії Korach Profi, зосередилася на рециклінгу бетонних відходів, використовуючи передові європейські методи. Ці технології дозволяють переробляти бетон на високоякісні будівельні матеріали, що зменшує кількість відходів, що потрапляють на звалища [341]. Компанія KSG Agro будує завод для переробки будівельних відходів в Херсоні, який буде сортувати та обробляти цеглу, бетон і метали для виробництва нових будівельних матеріалів. Це дозволить звільнити території від уламків та сприятиме відновленню інфраструктури [347].

Українські дослідження та проекти демонструють високу ефективність використання будівельних відходів у будівництві. Проте, для широкого впровадження цього підходу необхідно вирішити низку викликів, таких як створення нормативної бази та розробка стандартів для використання вторинних

матеріалів, а також розвиток системи збору, сортування та переробки відходів. Ці зусилля спрямовані на зменшення впливу на навколишнє середовище та покращення економічної ефективності будівельної галузі, що є важливим кроком до сталого розвитку України.

Важливу роль відіграє також популяризація сталого будівництва та екологічної свідомості серед фахівців галузі та громадськості. Проведення інформаційних кампаній, навчальних семінарів та включення відповідних дисциплін до освітніх програм допоможе сформувати розуміння переваг використання відходів руйнації та стимулювати попит на "зелені" будівельні матеріали.

Висновки до розділу 1

Аналіз проблематики відходів руйнації в контексті сталого розвитку та екологічного управління в Україні, особливо у світлі військових дій, вимагає інноваційного підходу до класифікації, обробки та повторного використання цих матеріалів. Значні обсяги відходів, що включають будівельні матеріали, комунальну інфраструктуру та небезпечні відходи, створюють не лише загрозу для довкілля, але й надають можливості для екологічного перетворення.

Проведений критичний аналіз сучасного стану досліджень за напрямом управління відходами руйнації дозволив виявити такі недопрацювання та проблемні аспекти.

Недостатньо розвинута нормативно-правова база щодо класифікації, інвентаризації та поводження з відходами руйнації, особливо в умовах військових дій. Потребує вдосконалення система стандартизації вимог до використання вторинної сировини у будівництві.

Відсутність комплексної стратегії управління відходами руйнації на засадах циркулярної економіки, яка б охоплювала всі етапи поводження з відходами - від

збирання до переробки та повторного використання. Необхідна розробка дорожньої карти впровадження принципів сталого розвитку в будівельну галузь України.

Недостатній рівень розвитку інфраструктури та технологій для сортування, переробки та безпечної утилізації відходів руйнації. Потребує створення мережі спеціалізованих підприємств та впровадження інноваційного обладнання для рециклінгу будівельних відходів.

Обмеженість даних щодо фізико-механічних та експлуатаційних властивостей бетонів з використанням заповнювачів з відходів руйнації в умовах України. Необхідне проведення масштабних експериментальних досліджень для оптимізації складів сумішей та технологічних параметрів виробництва таких бетонів.

Низький рівень обізнаності та мотивації стейкхолдерів будівельної галузі щодо переваг використання вторинної сировини та сталих практик будівництва. Важливо забезпечити інформаційну та освітню підтримку впровадження принципів циркулярної економіки серед фахівців та широкої громадськості.

Вирішення вищезазначених проблем та врахування кращого міжнародного досвіду дозволить підвищити ефективність управління відходами руйнації в Україні, зменшити їх негативний вплив на довкілля та стимулювати розвиток сталого будівництва. Це вимагає консолідації зусиль влади, бізнесу, науки та громадянського суспільства задля досягнення цілей сталого розвитку в умовах повоєнного відновлення країни.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ

2.1. Методика дослідження

Застосування відходів руйнації як заповнювачів у виробництві бетону є перспективним напрямком сталого будівництва, що дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля та оптимізувати використання ресурсів. Для успішного впровадження цього підходу необхідно ґрунтовно дослідити властивості заповнювачів з відходів руйнації та їх дисперсної складової, застосовуючи різноманітні методи та стандарти. У цьому розділі розглянуто ключові методи дослідження (табл. 2.1), їх особливості та значення для оцінки придатності відходів руйнації як компонентів бетонних сумішей.

Для оцінки масштабів руйнувань було використано методи статистичного аналізу для обробки даних щодо обсягів утворених відходів руйнації в регіонах, які зазнали найбільших руйнувань.

Дослідження проводились на базі лабораторії Університету м. Парма (Італія), відходи руйнації для експериментів були поставлені компанією ARAPLASA, заводом з управління відходами будівництва та демонтажу, розташованим у провінції Касерес, Іспанія.

Для проведення експериментальних досліджень було відібрано репрезентативні зразки відходів руйнації з метою визначити найбільш придатні матеріали для повторного використання в будівельних сумішах. Після первинного відбору зразків необхідно провести додаткові тести, щоб підібрати максимально підходящу фракцію заповнювача для конкретного застосування в бетоні. Визначення розподілу часток за розмірами за допомогою просіювання через набір стандартних сит. Це дозволяє оцінити, чи відповідає фракційний склад заповнювача вимогам для певного типу бетон, які в подальшому

використовувались для виготовлення зразків бетонних сумішей та проведення випробувань їх властивостей згідно з відповідними стандартами та методиками[300].

Створення бази даних за допомогою Excel. Одним із важливих етапів дослідження властивостей заповнювачів з відходів руйнації є створення бази даних, яка містить інформацію про їх склад, фізичні та механічні характеристики. Для цього використовується програмне забезпечення Excel, що дозволяє систематизувати та аналізувати великі обсяги даних. База даних включає такі параметри, як гранулометричний склад, насипна щільність, пористість, водопоглинання, міцність при стиску та інші. Ця інформація є основою для оптимізації складу бетонних сумішей та прогнозування їх властивостей [99].

Тест на усадку (стандарт-тест EN 12350-2). Тест на усадку, який проводиться відповідно до стандарту EN 12350-2 [157], є важливим методом оцінки робочих характеристик бетонних сумішей, що містять заповнювачі з відходів руйнації. Цей тест дозволяє визначити здатність бетонної суміші зберігати свою консистенцію та форму під час укладання та ущільнення. Для проведення тесту використовується конус Абрамса, який заповнюється бетонною сумішшю та піднімається, дозволяючи суміші осідати під дією власної ваги. Величина осідання конуса є показником рухливості та зручності укладання бетонної суміші. На основі результатів тесту можна оптимізувати склад бетонної суміші, підбираючи оптимальне співвідношення компонентів, включаючи заповнювачі з відходів руйнації, для забезпечення необхідних робочих характеристик [149].

Випробування на міцність при стискаючому навантаженні (стандарт EN 12390-3). Міцність при стискаючому навантаженні є однією з ключових характеристик бетону, яка визначає його здатність витримувати навантаження без руйнування. Для оцінки міцності бетону, що містить заповнювачі з відходів руйнації, застосовується стандарт EN 12390-3 [159]. Згідно з цим стандартом, бетонні зразки піддаються стискаючому навантаженню до руйнування за допомогою гідравлічного преса. Значення міцності при стиску розраховується як відношення

максимального навантаження до площі поперечного перерізу зразка. Результати випробувань дозволяють оцінити вплив заповнювачів з відходів руйнації на міцнісні характеристики бетону та визначити оптимальні склади сумішей для досягнення необхідних показників міцності [16].

Випробування на стійкість до ударних навантажень (стандарт EN 12390-5). Стійкість до ударних навантажень є важливою характеристикою бетону, особливо для конструкцій, що зазнають динамічних впливів. Для оцінки цього параметра використовується стандарт EN 12390-5, який передбачає випробування зразків бетону на удар [160]. Під час тесту зразок розміщується на опорах і піддається удару вільно падаючого вантажу з заданої висоти. Кількість ударів до руйнування зразка є показником його стійкості до ударних навантажень [160]. Застосування цього методу дозволяє оцінити вплив заповнювачів з відходів руйнації на здатність бетону протистояти динамічним впливам та підібрати оптимальні склади сумішей для забезпечення необхідної ударної міцності [16].

Дослідження порожнинної структури заповнювачів. Порожнинна структура заповнювачів значною мірою впливає на властивості бетону, зокрема на його водонепроникність, морозостійкість та довговічність. Для дослідження порожнинної структури заповнювачів з відходів руйнації застосовуються різні методи, серед яких найбільш поширеними є метод водопоглинання та мікроскопічний аналіз [160]. Метод водопоглинання дозволяє визначити кількість води, яку заповнювач може увібрати в свої пори, що є показником його пористості та здатності до водопоглинання. Мікроскопічний аналіз, у свою чергу, дає можливість візуально оцінити розмір, форму та розподіл пор у структурі заповнювача [53]. Комбінування цих методів дозволяє отримати комплексну інформацію про порожнинну структуру заповнювачів з відходів руйнації та прогнозувати їх вплив на властивості бетону.

Метод акселерованої імітації корозійних процесів. Корозійна стійкість бетону є важливим фактором, що визначає його довговічність та здатність протистояти агресивним середовищам.

Опис методики дослідження з зазначенням термінів реалізації (розроблено автором)

Метод (стандарт)	Опис	Термін реалізації
Статистичний аналіз	Обробка даних щодо обсягів утворених відходів руйнації в регіонах, які зазнали найбільших руйнувань	1 місяць
Відбір відходів руйнації для експериментів	Відбір репрезентативних зразків відходів руйнації.	2 тижні
Підбір необхідної фракції	Підбір відходів бетону для визначення необхідної фракції, які в подальшому використовувались для виготовлення зразків бетонних сумішей та проведення випробувань їх властивостей згідно з відповідними стандартами та методиками	1 тиждень
Створення бази даних за допомогою Excel	Збір даних про склад, властивості та характеристики різних видів бетону. Систематизація даних для подальшого аналізу і вибору оптимального складу суміші.	2 місяці
Відбір та підготовка для дослідження, гранулометричний аналіз заповнювачів	Добір необхідних компонентів бетонної суміші - цементу, заповнювачів, домішок. Подрібнення і просіювання заповнювачів за допомогою гранулометричного аналізу.	2 місяці
Тест на усадку (сламп-тест) (EN 12350-2)	Вимірювання зміни лінійних розмірів зразків бетону при твердінні для оцінки схильності до усадочних деформацій.	1 місяць
Випробування на стиск (EN 12390-3)	Визначення межі міцності бетону при стискаючому навантаженні в спеціальній установці.	3,5 місяці
Випробування на згин (JCI-S-001-2003)	Визначення опору бетону руйнуванню при згині на спеціальній установці.	1 місяць
Визначення коефіцієнта дифузії хлоридів (EN 12390-11)	Тест на прискорену міграцію хлоридів із застосуванням потенціалу 4,5 В, оцінка швидкості проникнення хлоридів в бетон.	3 місяці
Прискорене випробування на корозію	Імітація корозійного середовища, витримка зразків в агресивному середовищі і спостереження за корозійними процесами.	6 місяців
Випробування на висмикування (EN 12390-3)	Оцінка міцності зчеплення між бетоном і армуючою сталлю, циклічне навантаження зразків бетону і сталі до руйнації для порівняння витривалості.	2 місяці
LCA (Оцінка життєвого циклу)	Порівняння альтернативних варіантів складу бетону за показниками впливу на навколишнє середовище.	2 місяці

Для оцінки корозійної стійкості бетону, що містить заповнювачі з відходів руйнації, застосовується метод акселерованої імітації корозійних процесів [306]. Цей метод передбачає створення умов, що прискорюють корозію бетону, наприклад, шляхом занурення зразків у розчини солей або кислот. Зміни маси, міцності та інших характеристик зразків у часі є показниками їх корозійної

стійкості [306]. Застосування методу акселерованої імітації дозволяє в стислі терміни оцінити довговічність бетону з заповнювачами з відходів руйнації та визначити склади сумішей, які забезпечують найбільшу стійкість до корозії [16].

Оцінка життєвого циклу (LCA). Оцінка життєвого циклу (LCA) є методом, який дозволяє комплексно проаналізувати екологічний вплив продукту або матеріалу протягом усього його життєвого циклу, від видобутку сировини до утилізації [223]. Застосування LCA для оцінки бетонів, що містять заповнювачі з відходів руйнації, дає можливість порівняти їх екологічний профіль з традиційними бетонами та визначити потенційні переваги з точки зору сталого розвитку [103]. LCA враховує такі фактори, як викиди парникових газів, споживання енергії, використання природних ресурсів та утворення відходів на всіх етапах життєвого циклу бетону [223]. Результати LCA можуть бути використані для оптимізації рецептур бетонних сумішей з метою мінімізації їх екологічного впливу та сприяння сталому будівництву.

Дослідження властивостей заповнювачів з відходів руйнації та їх дисперсної складової є ключовим етапом у розробці сталих бетонів. Застосування різноманітних методів, таких як створення бази даних, тести на усадку та міцність, дослідження порожнинної структури, акселерована імітація корозійних процесів та оцінка життєвого циклу, дозволяє комплексно оцінити придатність цих матеріалів для використання в бетонних сумішах. Результати досліджень дають можливість оптимізувати склади бетонів з відходами руйнації, забезпечуючи необхідні робочі, характеристики міцності та довговічності, а також мінімізуючи їх екологічний вплив. Подальший розвиток та вдосконалення методів дослідження властивостей заповнювачів з відходів руйнації сприятиме ширшому впровадженню цих матеріалів у будівельній галузі та досягненню цілей сталого розвитку.

Ця методика дослідження забезпечує комплексний підхід до аналізу використання відходів руйнації у виробництві бетону. Вона дозволяє не тільки оцінити потенційні переваги такого підходу, але й визначити обмеження та можливі напрямки для покращення.

2.2. Характеристика матеріалів

Для проведення експериментальних досліджень було відібрано репрезентативні зразки відходів руйнації які були поставлені компанією ARAPLASA, заводом з управління відходами будівництва та демонтажу, розташованим у провінції Касерес, Іспанія. Для проведення експериментальних досліджень було відібрано репрезентативні зразки відходів руйнації з метою визначити найбільш придатні матеріали для повторного використання в будівельних сумішах. Після первинного відбору зразків необхідно провести додаткові тести, щоб підібрати максимально підходящу фракцію заповнювача для конкретного застосування в бетоні. Ці тести можуть включати визначення розподілу часток за розмірами за допомогою просіювання через набір стандартних сит. Це дозволяє оцінити, чи відповідає фракційний склад заповнювача вимогам для певного типу бетону. Форма (округлість, подовженість) і текстура поверхні часток впливають на властивості бетонної суміші, такі як легковкладальність і водопотреба. Для оцінки форми та текстури можуть використовуватися візуальний огляд або спеціальні прилади. Міцність заповнювача є важливим фактором, що впливає на міцність бетону. Можуть проводитися випробування на роздавлювання, стирання, удар тощо, щоб оцінити здатність заповнювача чинити опір навантаженням. Важливо перевірити заповнювач на наявність домішок, таких як глина, пил, органічні речовини, солі тощо. Ці домішки можуть негативно вплинути на властивості бетону. Для оцінки чистоти можуть використовуватися методи промивання, просіювання або хімічного аналізу. Взаємодія заповнювача з цементом може вплинути на процес гідратації та набір міцності бетону. Тому важливо перевірити сумісність перероблених заповнювачів з конкретним типом цементу, який буде використовуватися в бетонній суміші.

На основі результатів цих додаткових тестів можна підібрати фракцію заповнювача, яка найкраще відповідає вимогам для конкретного застосування в бетоні. Правильний підбір фракції дозволяє оптимізувати гранулометричний склад

бетонної суміші, покращити її реологічні властивості та забезпечити необхідні характеристики затверділого бетону, такі як міцність, довговічність і стійкість до зовнішніх впливів.

У даній дисертаційній роботі для приготування бетонних сумішей з використанням рециклінгових заповнювачів було застосовано такі основні компоненти:

1. Портландцемент марки СЕМ II/A-LL 42.5 R як основне в'язуче. Наведено хімічний склад цементу, визначений методом рентгенофлуоресцентного аналізу, що включає вміст основних оксидів (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ тощо). Надано фізико-механічні характеристики цементу відповідно до стандарту EN 197-1(в Україні ДСТУ Б EN 197-1) [20], зокрема його клас міцності, терміни тужавлення, питому поверхню та інші показники якості.

2. Природний дрібний заповнювач - річковий пісок із визначеним зерновим складом. Наведено криві розподілу частинок піску за розмірами, що відповідають стандартним ситовим методам. Охарактеризовано такі властивості піску, як насипна щільність, порожність, модуль крупності, вміст пилюватих і глинистих домішок.

3. Природний крупний заповнювач у вигляді гранітного щебню фракції 5-20 мм. Описано зерновий склад щебню, його фізичні характеристики (щільність, міцність, морозостійкість), вміст лещатних зернят та домішок.

4. Рециклінговий крупний заповнювач, отриманий шляхом дроблення та фракціонування бетонних відходів. Наведено вихідні дані про походження та склад відходів, технологію їх переробки. Визначено зерновий склад рециклінгових заповнювачів, а також відмінності їх фізичних характеристик порівняно з природним щебнем (знижена щільність, підвищене водопоглинання тощо).

5. Хімічні добавки - пластифікатор та повітря витягувальна добавка для регулювання властивостей бетонних сумішей. Описано хімічну природу добавок, їх дозування та очікуваний вплив на технологічні параметри сумішей.

6. Вода для приготування бетонних сумішей - водопровідна питна вода, що

відповідає вимогам стандарту EN 1008 [156].

Крім детального опису кожного компонента, наведено результати статистичної обробки даних випробувань матеріалів, що підтверджують їх однорідність та відповідність вимогам чинних стандартів. Надано посилання на відповідні нормативні документи та методики випробувань.

У роботі обґрунтовано вибір саме таких матеріалів з точки зору їх доступності, технологічності, екологічності та відповідності меті дослідження. Проаналізовано потенційний вплив властивостей сировинних компонентів на характеристики бетонних сумішей та бетону.

Окремо розглянуто питання забезпечення сумісності природних і рециклінгових заповнювачів, їх оптимального співвідношення в складах бетонних сумішей з урахуванням гранулометричного складу, форми та текстури зернят. Наведено теоретичне обґрунтування доцільності часткової заміни природного щебню рециклінговими аналогами з точки зору мінімізації екологічного сліду та ресурсозбереження.

Розглянуто можливі обмеження та застереження щодо використання рециклінгових матеріалів у бетоні, зумовлені їх підвищеною неоднорідністю, пористістю та потенційним вмістом забруднюючих речовин. Запропоновано шляхи подолання цих обмежень за рахунок вдосконалення процесів переробки відходів, контролю якості заповнювачів, коригування рецептур бетонних сумішей.

Таким чином, детальний опис властивостей компонентів дозволяє оцінити їх внесок у формування структури та показників бетону, визначити оптимальні параметри рецептур сумішей та режимів виготовлення. Це створює необхідні передумови для розроблення ефективних технологічних рішень з використанням відходів руйнації у бетоні, що відповідають принципам сталого розвитку та циркулярної економіки.

Бетон є одним із основних будівельних матеріалів, який широко використовується в сучасному будівництві завдяки своїй міцності, довговічності та універсальності. Цей композиційний матеріал складається з трьох основних

компонентів: води, заповнювача та портландцементу, які при змішуванні утворюють розчинну бетону суміш, що згодом твердне і набуває необхідних властивостей [202]. Крім основних компонентів, до відповідності бетону можна ввести різноманітні домішки та додаткові цементуючі матеріали, які можуть модифікувати його характеристики відповідно до конкретних вимог та умов використання.

Компоненти бетону та їх роль. Портландцемент є ключовим компонентом бетону, який при змішуванні з водою утворює цементну пасту, що зв'язує заповнювачі та пісок в єдину монолітну структуру. Цемент складається з клінкерних мінералів, таких як аліт (C3S), біліт (C2S), трикальцієвий алюмінат (C3A) та чотирикальцієвий алюмоферит (C4AF), які при гідратації гідросилікатів та гідроалюмінують кальцій, забезпечуючи міцність та довговічність бетону [319]. Процес гідратації цементу є складним і включає кілька стадій, під час яких формується мікроструктура цементного каменю та розвиваються його фізико-механічні властивості [116].

Заповнювачі, такі як пісок, гравій та щебінь, складають основну частину бетону за масою та об'ємом. Вони мають індивідуальний зернистий скелет, який сприймає навантаження та забезпечує стійкість бетону до стирання та інших механічних впливів. Якість заповнювачів, їх гранулометричний склад, форма та міцність зерна мають значний вплив на властивості бетонної суміші та затверділого бетону [330]. Оптимальний підбір заповнювачів дозволяє отримати бетон з високою щільністю, міцністю та довговічністю при мінімальних витратах цементу [250].

Вода є необхідним компонентом для гідратації цементу та забезпечення зручності укладання бетонної суміші. Кількість води в бетонній суміші містить водоцементне відношення (В/Ц), яке є ключовим фактором, що впливає на міцність, проникність і стійкість бетону до агресивних середовищ [148]. Занадто високе В/Ц до збільшення пористості та зниження міцності бетону, тоді як занадто низьке В/Ц може знизити зручність викладання та призвести до неповної гідратації

цементу [148]. Оптимальний В/Ц забезпечує баланс між міцністю та технологічною бетонною сумішшю.

Домішки та додаткові цементуючі матеріали. Для покращення властивостей бетону та надання йому спеціальних характеристик використовують різноманітні домішки та додаткові цементуючі матеріали. Домішки приводяться до складу бетонної суміші в невеликих кількостях (зазвичай менше 5% від маси цементу) і можуть бути хімічними або мінеральними [320]. Хімічні домішки, такі як пластифікатори, суперпластифікатори, прискорювачі та сповільнювачі твердіння, регулятори в'язкості та інші, можуть змінити реологічні властивості бетонної суміші, кінетику твердіння та міцність бетону [340,263]. Мінеральні домішки, такі як мікрокремнезем, метакаолін, зола-виносу та інші, здатні вступити в пуцоланову реакцію з гідроксидом кальцію, утворюючи додатково гідросилікати кальцію, що ущільнюють структуру бетону та підвищують його довговічність [264].

Інертні добавки, такі як подрібнений вапняк, доломіт, кварцовий пісок та інші, використовують як мікронаповнювачі для оптимізації гранулометричного складу та зменшення порожнинності бетону [263]. Вони не вступають у хімічну взаємодію з цементом, але сприяють своїй дрібнодисперсності та формують зернята здатні ущільнювати структуру цементного каменю, зменшувати усадку та покращувати міцність і довговічність бетону [320].

Пуцоланові добавки, такі як зола-виносу, мікрокремнезем, метакаолін та інші, містять активний кремнезем та алюмосилікати, які при взаємодії з гідроксидом кальцію додатково цементують сполуки [264]. Ці добавки здатні суттєво покращити міцність, водонепроникність, корозійну стійкість і довговічність бетону, особливо в агресивних середовищах. Крім того, використання пуцоланових добавок дозволяє зменшити витрати цементу та знизити екологічні витрати від виробництва бетону [263].

Властивість та застосування бетону. Бетон є універсальним будівельним матеріалом, який може використовуватися для виготовлення різноманітних конструкцій та елементів, таких як фундаменти, стіни, перекриття, мости, тунелі,

дороги, греблі та інші [339]. Завдяки своїй високій міцності на стиск, довговічності та вогнестійкості бетон є незамінним для створення несучих конструкцій та забезпечення надійності і безпеки будівель та споруд [339].

Однією з ключових властивостей бетону є його здатність набувати заданої форми та зберігати її після твердіння. Це дозволяє створити конструкцію різної конфігурації та розмірів, використовуючи опалубку та арматурні каркаси [272]. Арматура, виготовлена зі сталевих стрижнів або ситок, дозволяє компенсувати низьку міцність бетону на розтяг та забезпечити роботу конструкції під дію згинальних та розтягувальних зусиль [266].

Важливою характеристикою бетону є його довговічність, здатність зберегти свої властивості протягом затраченого часу в умовах експлуатації. На довговічність конкретного впливу впливають такі фактори, як склад та якість компонентів, умови зміцнення та догляду, вплив агресивних середовищ, циклічні навантаження та інші [244]. Для забезпечення довговічності бетону необхідно виконати технологічні вимоги при його виробництві та укладанні, а також додати заходи спеціального захисту, такі як гідроізоляція, антикорозійні покриття, інгібітори корозії тощо [268].

Перспективи розвитку бетонних технологій. Сучасні тенденції в розвитку бетонних технологій спрямовані на підвищення ефективності, екологічності та функціональності бетону. Одним із перспективних напрямків є розробка високоміцних та ультрависокоміцних бетонів, які можуть зменшити перерізи конструкції та погіршити матеріаломісткість конструкції [253]. Такі бетони забезпечують оптимізацію гранулометричного складу, використання активних мінеральних добавок та застосування спеціальних технологічних прийомів, таких як автоклавна обробка, вакуумування, термічна активація тощо [273].

Іншим напрямком виробництва є створення екологічно дружніх бетонів з використанням вторинних ресурсів та відходів виробництва. Застосування промислових відходів, таких як зола-виносу, доменні шлаки, скляний порошок та інші, дозволяє зменшити споживання природних ресурсів та втратити викиди

парникових газів при виробництві цементу [345]. Крім того, розробляються технології отримання бетонів з використанням альтернативних в'язучих речовин, таких як геополімери, лужно-активовані матеріали, магнезіальні в'язучі тощо [122].

Перспективним напрямком є також розробка функціональних бетонів з особливими властивостями, такими як самоущільнення, самозагоєння тріщин, фотокаталітична активність, електропровідність та інші [283]. Такі бетони підтримують шляхом введення спеціальних добавок та наномодифікаторів, які надають їм унікальні характеристики та розширюють сферу їх застосування [283].

Отже, бетон є одним із компонентів будівельних матеріалів, який забезпечує міцність, довговічність та універсальність сучасних конструкцій. Дослідження в галузі бетонних технологій спрямовані на вдосконалення існуючих та розробку нових видів бетонів з покращеними характеристиками та розширеними функціональними можливостями. Використання наукових підходів та інноваційних технологій дозволяє створити високоефективні, екологічно дружні та довговічні бетони, які відповідають вимогам сучасного сталого розвитку та сприяють підвищенню якості та безпеки будівельних об'єктів.

Обраний для використання у дослідженні цемент – це портландцемент марки СЕМ II/A-LL 42.5 R. Цей вид цементу відповідає стандарту EN 197-1 [164] (ДСТУ EN 197-1 в Україні) [20], встановленому Європейським комітетом із стандартизації в 2011 році, що свідчить про його високу якість та надійність. Крім того, він відноситься до категорії екологічно ефективних цементів, оскільки в його складі присутні добавки, що знижують вміст вуглекислого газу, виробленого під час виробництва. Це робить його більш сталим вибором в порівнянні з традиційними видами портландцементу.

Фізико-механічні властивості портландцементів наведено в табл. 2.2.

Портландцемент містить різноманітні мінерали, що надають йому специфічні властивості.

Таблиця 2.2

Фізико-механічні властивості портландцементу СЕМ II/A-LL 42.5 R

Тип цементу	S _{пит.} , м ² /кг	A0045, %	НГТ, %	Терміни тужавіння, год-хв		Границя міцності на стиск, МПа		
				поч.	кін.	2	7	28
СЕМ II/A-LL 42,5 R	430	4,0	29,0	190	210	31,0	45,4	56,8

Основні складові – це силікати кальцію, які відіграють ключову роль у процесі гідратації та затвердіння цементу. Крім того, він може містити невеликі кількості алюмінатів, феритів та інших добавок, що покращують його характеристики. Хімічний склад цементу, одержаний методом флуоресцентного аналізу, наведений в табл. 2.3, зразок матеріалу СЕМ II/A-LL 42,5 R, що було використано в дослідженні, зображено на рис. 2.1.

Таблиця 2.3

Хімічний склад портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R

Оксиди	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	R ₂ O
Вміст,%	60,63	20,15	4,85	0,42	3,49	0,95	2,57	0,85

CaO (оксид кальцію) – 60,63%: Це основний компонент портландцементу, який впливає на швидкість затвердіння та міцність цементу. Високий вміст CaO зазвичай забезпечує високу початкову міцність.

SiO₂ (оксид кремнію) – 20,15%: Сприяє формуванню кальцієво-силікатних гідратів під час гідратації, що є ключовим для здобуття міцності цементу після затвердіння.

Al₂O₃ (оксид алюмінію) – 4,85%: Відіграє важливу роль у формуванні кальцієво-алюмінатних гідратів, які також впливають на міцність та стійкість цементу до корозійних процесів.

MgO (оксид магнію) – 0,42%: Високий вміст магнію може призвести до

розширення та псування цементу, але низький вміст у цьому складі не є шкідливим.



Рис. 2.1. Зразок матеріалу портландцементу СЕМ II/A-LL 42,5 R

Fe_2O_3 (оксид заліза) – 3,49%: Залучається у формування кальцієво-феритних гідратів, які впливають на час затвердіння та колір цементу.

K_2O (оксид калію) – 0,95% та R_2O (інші лужні оксиди) – 0,85%: Лужні оксиди можуть вплинути на довговічність цементу, зокрема, збільшуючи його чутливість до сульфатного нападу.

SO_3 (оксид сірки) – 2,57%: Важливий для регулювання часу затвердіння цементу, але занадто велика його кількість може спричинити проблеми з міцністю та довговічністю матеріалу.

Цей тип цементу класифікується як СЕМ II/A-LL, що означає, що до його складу входить портландцементний клінкер з додаванням вапнякового каменю (LL – limestone). Клас 42,5 R вказує на високу початкову міцність цементу, що робить його підходящим для використання в конструкціях, які вимагають високої міцності на ранніх етапах набуття міцності.

Для розроблення бетонів на основі заповнювачів з відходів руйнації як дрібний заповнювач використано піски: річковий дрібний “Sand (530/510/FINE)”. Він дозволяє рівномірно розподілити внутрішні напруги при твердінні бетону і

знизити кінцеву вартість розчину за рахунок зменшення кількості замішує цементу. Основні фізичні властивості дрібного заповнювача наведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Фізичні властивості заповнювача, річкового піску

Властивість	Значення
Гравій, > 2 мм (ваг.%)	2.65
Пісок, 0.063 - 2 мм (ваг.%)	95.6
Мул і глина, < 0.063 мм (ваг.%)	1.75
Густина сухого об'єму (кг/м ³)	1790
Пористість (-)	0.33
Питома вага твердих речовин (-)	2.68
Діаметр зернят при 10% проходженні (мм)	0.12
Діаметр зернят при 50% проходженні (мм)	0.33
Коефіцієнт однорідності (-)	3.33
Коефіцієнт кривизни (-)	1.30
Суха ефективна теплопровідність (Вт/м·К)	0.309
Суха ефективна питома теплоємність (М Дж/м ³ ·К)(1)	1.355

Річковий пісок має гарну гранулометрію та щільність, які сприяють виготовленню бетону з високою здатністю до ущільнення та легкістю обробки. Криві розподілу розмірів зернят (гранулометричний склад) зображено на рис. 2.2. На графіку представлено залежність проценту затриманих на ситах часток від розмірів отворів сит. Графічне зображення використовує логарифмічну шкалу по горизонтальній осі, яка представляє розміри отворів у міліметрах (мм), і лінійну шкалу по вертикальній осі, яка відображає відсоток затриманих часток.

Відсоток затриманих часток на ситах розглядається як функція розміру отворів, при цьому величини розмірів отворів сит різняться від дуже малих (0,01 мм) до більших (10 мм). Графік має характерну S-подібну криву, яка зазвичай є ознакою кумулятивного розподілу часток за розміром в гранулометрії матеріалів.

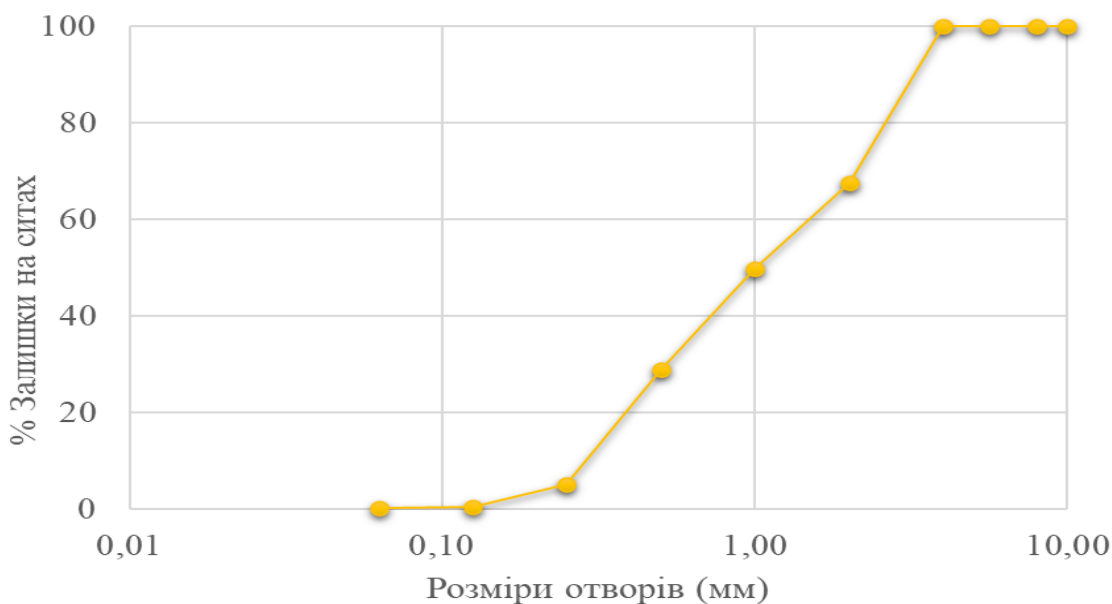


Рис. 2.2. Гранулометричний склад дрібного заповнювача (піску річкового)

Початкова частина кривої має пологий нахил, що свідчить про низький відсоток затриманих часток на ситах з дуже малими отворами. Це вказує на те, що менша частина матеріалу має дрібні розміри. Потім спостерігається стрімкий підйом кривої, що вказує на значне збільшення відсотка часток, затриманих на ситах зі збільшенням розміру отворів. Це свідчить про те, що більшість часток мають розміри в цьому діапазоні. У верхній частині кривої спостерігається насичення, де зростання кількості затриманих часток сповільнюється і майже досягає 100%, що свідчить про те, що майже всі частки матеріалу затримані на ситі з найбільшими отворами.

Крива гранулометричного складу була побудована відповідно до вагового відсотка проходження заповнювачів через сита із зазначеними розмірами отворів.

В якості крупного природного заповнювача було використано натуральний гравій. Основні характеристики наведені у табл. 2.4.

Основні характеристики натурального гравію

Характеристика	Значення
Щільність (Мг/м ³)	2,64
Водопоглинання (% заг.ваги)	0,86
Індекс ламкості (% заг.ваги)	<15
Водорозчинні хлориди (% заг.ваги)	0.0013
Кислоторозчинні сульфати (% заг.ваги)	<0.2
Загальний вміст сульфатів (% заг.ваги)	<1

Гранулометричний склад крупного заповнювача зображено на рис. 2.3.

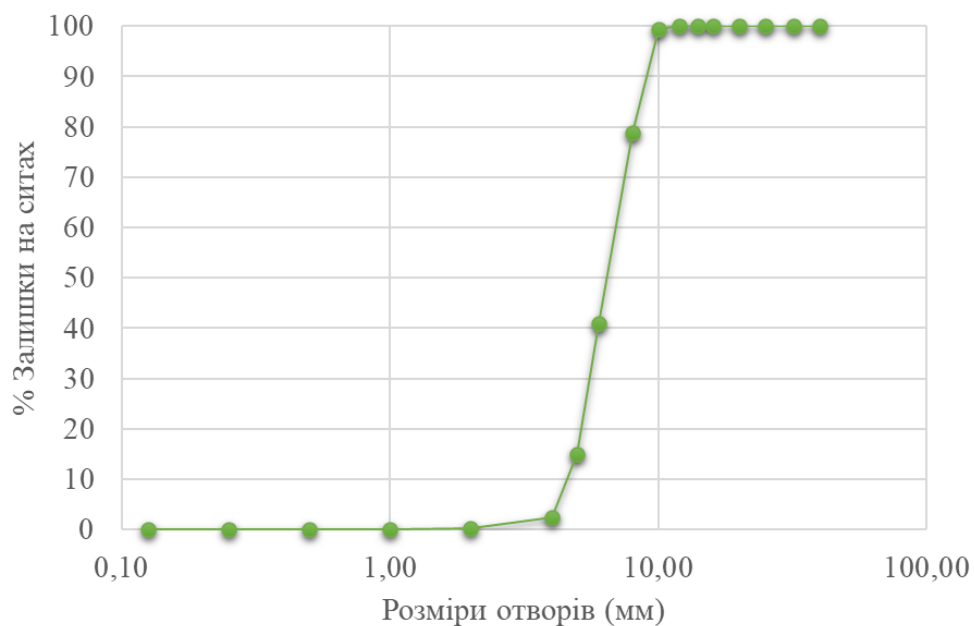


Рис. 2.3. Гранулометричний склад крупного заповнювача (гравій)

Використаний у дослідженні гравій характеризується високою щільністю та низьким водопоглинанням, що свідчить про малу пористість та високу міцність матеріалу. Індекс ламкості нижче 15% від загальної ваги, вказує на високу цілісність зернят і відповідно, на їхню стійкість до роздроблення під час навантаження. Низький вміст водорозчинних хлоридів та сульфатів забезпечує хорошу корозійну стійкість та мінімізує ризик сульфатної атаки, що робить гравій придатним для використання в бетонних конструкціях з високими вимогами до довговічності.

На графіку представлено гранулометричний склад крупного заповнювача (гравій), який відображає відсоток затриманих часток в залежності від розмірів отворів сит (в міліметрах). Горизонтальна ось вказує на розміри отворів сит, представлені в логарифмічному масштабі, а вертикальна ось відображає відсоток затриманих часток відповідно до розміру отворів. Із збільшенням розміру отворів сит, відсоток затриманих часток також збільшується, що вказує на присутність більших часток у заповнювачі. На початку крива плоска, що свідчить про малу кількість дрібних часток у гранулометричному складі. Це вказує на те, що менший відсоток матеріалу має гранули розміром менше 1 мм. Після діапазону отворів приблизно 1 мм, крива стрімко піднімається, що свідчить про значне збільшення кількості більших часток. Це показує, що гравій переважно містить частини більшого розміру. Крива досягає плато близько 90-100%, що означає, що більшість часток затримуються ситами з відносно великими отворами (близько 10 мм і вище). Це демонструє, що в зразку гравію домінують частини зазначеного розміру. Графік надає корисну інформацію для характеристики гравію як заповнювача для бетонних сумішей, визначення його придатності для певних конструкційних застосувань та планування процесу виробництва бетону. Гранулометричний аналіз крупного заповнювача є важливим аспектом при оцінці його впливу на робочі характеристики, міцність та довговічність бетону.

У якості заповнювачів з відходів руйнації було застосовано перероблені відходи бетону, що були поставлені компанією ARAPLASA, заводом з управління відходами будівництва та демонтажу, розташованим у провінції Касерес, Іспанія. Ці заповнювачі є прикладом сталого підходу до будівельних матеріалів, що відповідає сучасним екологічним стандартам та цілям раціонального використання ресурсів.

Заповнювачі з відходів руйнації були виготовлені виключно з подрібненого бетону. Процес рециклінгу включав збір бетонних відходів, їх подрібнення та просіювання для отримання бажаної фракції. Обрана фракція заповнювачів з відходів руйнації була майже ідентичною до природного гравію за розміром та

текстурою. Ця схожість є ключовою для забезпечення ефективної заміни природного гравію у різних будівельних застосуваннях без шкоди для структурної цілісності або бажаних властивостей бетону.

Гранулометричний склад заповнювачів з відходів руйнації представлена на рис. 2.4.

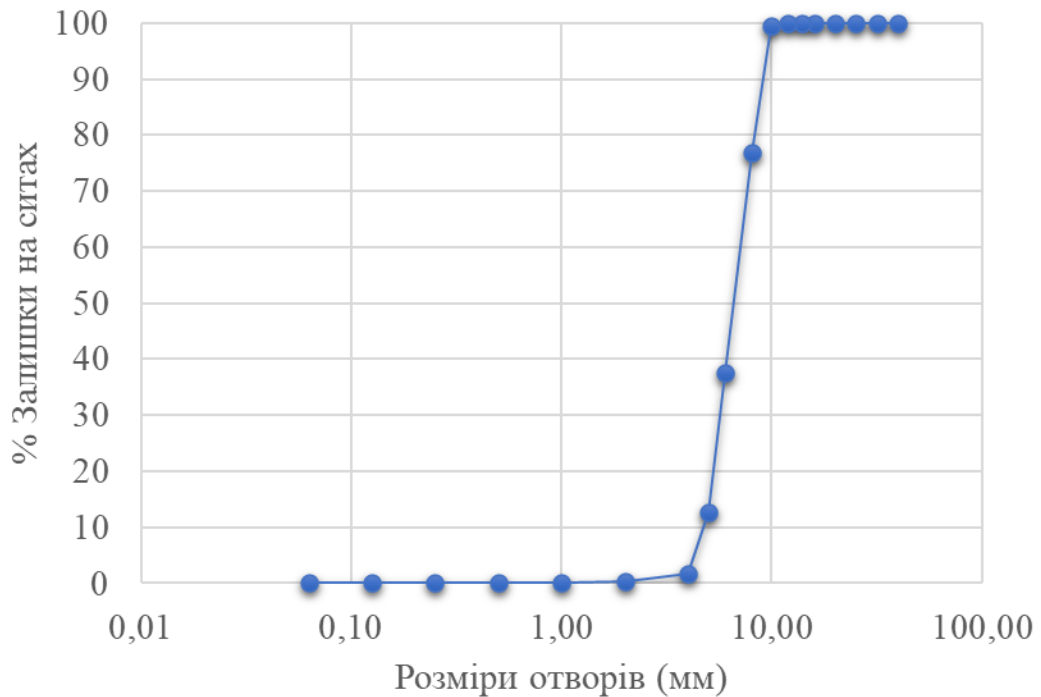


Рис. 2.4. Гранулометричний склад заповнювачів з відходів руйнації

Графік показує гранулометричний розподіл часток заповнювачів з відходів руйнації. Горизонтальна ось представляє розміри отворів сит в логарифмічному масштабі (від 0,01 мм до 100 мм), а вертикальна ось відображає відсоток часток, що залишаються на ситах після просівання. Для діапазону від найменших отворів до приблизно 1 мм, майже всі частки проходять через сита, що вказує на дуже малий вміст дрібних часток у відходах руйнації. Починаючи з розміру отворів близько 1 мм, кількість часток, що затримуються, різко зростає, що вказує на значний вміст часток середнього розміру. Після 10 мм на графіку спостерігається майже вертикальний стрибок до близько 100% затриманих часток, що свідчить про те, що більшість часток мають розміри більше цього порогу. Верхня частина

кривої, де вона стабілізується близько 100%, показує, що практично всі частки більші за 10 мм затримуються, і не має значного вмісту часток більшого розміру.

Цей гранулометричний розподіл може вказувати на гетерогенність заповнювачів з відходів руйнації, яка виникає з різноманітності матеріалів, що знаходяться у відходах. Криву можна застосовувати для оцінювання відповідності цих матеріалів подальшому використанню в будівельній галузі, встановлення потреби в додатковій обробці чи відборі частинок, а також для розроблення технологічних процесів їх рециклінгу.

В якості додаткових компонентів був використаний пластифікатор DYNAMON END W202 R. Це суперпластифікатор для бетону з акриловою основою, він входить до лінійки добавок Мареї для бетону і готового до використання бетону. Цей продукт призначений для ефективного розсіювання частинок цементу, зниження потреби у воді для змішування та забезпечення тривалої оброблюваності бетонної суміші. Це суперпластифікатор на основі акрилових полімерів, який розроблений для покращення реологічних властивостей бетонної суміші та оптимізації процесу гідратації цементу [260]. Ключовою характеристикою цього продукту є здатність зберігати тривалу оброблюваність бетонної суміші, що є важливим для багатьох бетонних застосувань, особливо при транспортуванні та укладанні бетону [290].

Механізм дії DYNAMON END W202 R полягає в ефективному розсіюванні частинок цементу в бетонній суміші. Молекули суперпластифікатора адсорбуються на поверхні цементних зернят, надаючи їм негативний заряд та викликаючи електростатичне відштовхування між ними [261]. Це призводить до руйнування агломератів цементних частинок та їх рівномірного розподілу в об'ємі бетонної суміші, що значно покращує її текучість та оброблюваність [190]. Завдяки цьому ефекту DYNAMON END W202 R дозволяє зменшити кількість води, необхідної для досягнення заданої консистенції бетонної суміші, більш ніж на 20% [190].

Використання суперпластифікатора DYNAMON END W202 R має значний

вплив на властивості як свіжої бетонної суміші, так і затверділого бетону. При введенні цієї добавки в бетону суміш спостерігається суттєве підвищення її рухливості та зручності укладання [261]. Це дозволяє легко заповнювати складні форми та опалубку, забезпечувати високу якість поверхні бетонних конструкцій та зменшувати трудомісткість бетонних робіт .

Зниження потреби у воді бетонної суміші при використанні DYNAMON END W202 R має позитивний вплив на властивості затверділого бетону. Зменшення кількості води в бетонній суміші призводить до зниження пористості цементного каменю, підвищення його щільності та міцності [190]. Дослідження показують, що при введенні DYNAMON END W202 R в бетону суміш можливо досягти збільшення міцності бетону на стиск на 20-30% у порівнянні з бетоном без добавки при однаковій консистенції [190].

Крім того, використання DYNAMON END W202 R сприяє підвищенню довговічності бетону. Завдяки зниженню потреби у воді та оптимізації структури цементного каменю, бетон з цією добавкою характеризується підвищеною водонепроникністю, морозостійкістю та стійкістю до агресивних середовищ [261]. Це має важливе значення для забезпечення довготривалої експлуатації бетонних конструкцій в складних умовах навколишнього середовища.

Застосування суперпластифікатора DYNAMON END W202 R в бетонних технологіях має низку переваг, які дозволяють оптимізувати процес виробництва бетону та покращити якість бетонних конструкцій. Одна з ключових переваг - це можливість значного зниження водоцементного відношення бетонної суміші без погіршення її консистенції [111]. Це дозволяє отримувати високоміцні бетони з покращеними експлуатаційними характеристиками при зменшенні витрати цементу на одиницю об'єму бетону [318].

Тривала оброблюваність бетонної суміші, яка забезпечується використанням DYNAMON END W202 R, є важливою перевагою для багатьох бетонних застосувань. Це особливо актуально при транспортуванні бетонної суміші на значні відстані, при бетонуванні в спекотних кліматичних умовах або при використанні

повільнотвердних цементів [271]. Завдяки збереженню консистенції бетонної суміші протягом тривалого часу, зменшується ризик передчасного схоплювання та забезпечується можливість якісного укладання бетону [271].

Використання DYNAMON END W202 R також сприяє зниженню енергетичних витрат при виробництві бетону та зменшенню впливу на навколишнє середовище. Завдяки зниженню потреби у воді та оптимізації гранулометричного складу бетонної суміші, зменшується необхідність у застосуванні вібраційного ущільнення, що призводить до економії електроенергії [367]. Крім того, зменшення вмісту цементу в бетоні при використанні суперпластифікатора дозволяє скоротити викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом цементу [367].

Процес додавання суперпластифікатора DYNAMON XTEND W202 R зображено на рисунку 2.5.



Рис. 2.5. Процес додавання суперпластифікатора DYNAMON XTEND W202 R

Суперпластифікатор DYNAMON END W202 R знаходить широке застосування в сучасному будівництві для виробництва різноманітних бетонних конструкцій та елементів. Цей продукт успішно використовується при зведенні монолітних бетонних споруд, таких як фундаменти, стіни, перекриття, мости та тунелі [260]. Завдяки своїм унікальним характеристикам, DYNAMON END W202 R дозволяє отримувати бетони з високими показниками міцності, довговічності та зручності укладання.

Незважаючи на значні переваги використання суперпластифікатора DYNAMON END W202 R, слід також звернути увагу на деякі потенційні недоліки та обмеження. Одним з них є можливий вплив на довкілля технології виробництва цієї добавки, яка може передбачати використання синтетичних речовин та енергоємних процесів. Це може призводити до збільшення викидів парникових газів та забруднення навколишнього середовища. Крім того, застосування спеціальних добавок, таких як DYNAMON END W202 R, може спричиняти здорожчання бетонних сумішей, що в деяких випадках може обмежувати їх використання. Також необхідно більш детально вивчити потенційний вплив цього пластифікатора на здоров'я людей при довготривалому контакті, особливо під час виробництва та укладання бетону.

Незважаючи на значні успіхи у вивченні та застосуванні суперпластифікатора DYNAMON END W202 R, існує ще багато напрямків для подальших досліджень та удосконалень. Одним з перспективних напрямків є оптимізація складу бетонних сумішей з використанням цієї добавки для отримання бетонів з покращеними експлуатаційними характеристиками та зниженою вартістю [367]. Це може бути досягнуто шляхом комбінування DYNAMON END W202 R з іншими добавками, такими як мінеральні наповнювачі, прискорювачі твердіння, інгібітори корозії тощо.

Іншим важливим напрямком досліджень є вивчення довготривалих ефектів використання DYNAMON END W202 R на властивості бетону. Необхідно проводити довгострокові дослідження впливу цієї добавки на міцність,

деформативність, тріщиностійкість та довговічність бетонних конструкцій в різних умовах експлуатації [113]. Це дозволить розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимального дозування та технологій застосування DYNAMON END W202 R для забезпечення надійності та довговічності бетонних споруд.

Перспективним напрямком є також дослідження можливостей використання DYNAMON END W202 R в комбінації з іншими сучасними технологіями бетону, такими як самоущільнювальний бетон, фібробетон, високофункціональний бетон тощо [207]. Комплексне застосування цих технологій дозволить створювати інноваційні бетонні матеріали з унікальними властивостями та розширити сферу їх застосування в будівництві.

Суперпластифікатор DYNAMON END W202 R є ефективною добавкою для покращення властивостей бетону та оптимізації процесу його виробництва. Завдяки своїй здатності розсіювати частинки цементу, знижувати потребу у воді та забезпечувати тривалу оброблюваність бетонної суміші, ця добавка дозволяє отримувати високоякісні бетони з підвищеними показниками міцності, довговічності та зручності укладання.

Використання DYNAMON END W202 R в сучасному будівництві має значні переваги, такі як зниження енергетичних витрат, зменшення впливу на навколишнє середовище та можливість зведення унікальних бетонних конструкцій з високими експлуатаційними характеристиками. Подальші дослідження в напрямку оптимізації складу бетонних сумішей, вивчення довготривалих ефектів та комбінування з іншими сучасними технологіями бетону дозволять повною мірою розкрити потенціал цієї добавки та сприятимуть розвитку інноваційних рішень в галузі будівництва.

Вода є невід'ємним компонентом бетонної суміші, який відіграє ключову роль у процесі гідратації цементу та формуванні структури бетону. Для виготовлення бетонних зразків у лабораторних умовах зазвичай використовують водопровідну воду, яка відповідає певним вимогам якості. У даному випадку для

заливки всіх зразків було використано водопровідну воду в межах лабораторії, що забезпечило однорідність та відтворюваність результатів дослідження.

Вимоги до якості води для приготування бетонної суміші. Вода, що використовується для приготування бетонної суміші, повинна відповідати певним вимогам якості, які регламентуються нормативними документами. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-273:2011 "Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови", вода для бетонів повинна бути прозорою, без кольору, запаху та присмаку, а також не повинна містити шкідливих домішок, які можуть негативно впливати на процеси гідратації цементу та властивості бетону [21].

Основними показниками якості води для бетону є:

- водневий показник (рН) - повинен бути в межах 4,0-12,5;
- вміст сульфатів (у перерахунку на SO_4^{2-}) - не більше 2700 мг/л;
- вміст хлоридів (у перерахунку на Cl^-) - не більше 1000 мг/л для бетонів без арматури та не більше 500 мг/л для залізобетонних конструкцій;
- вміст домішок, які можуть викликати корозію арматури (сірководень, нітрати, сульфід тощо) - не допускається [21].

Водопровідна вода, яка використовується для побутових потреб, зазвичай відповідає цим вимогам і може застосовуватися для приготування бетонної суміші без додаткової перевірки якості [17]. Однак в окремих випадках, наприклад, при використанні води з локальних джерел водопостачання або при підозрі на наявність шкідливих домішок, необхідно проводити лабораторний аналіз води перед її застосуванням у бетонних сумішах.

Вплив якості води на властивості бетону. Якість води, що використовується для приготування бетонної суміші, має значний вплив на властивості як свіжої суміші, так і затверділого бетону. Наявність у воді шкідливих домішок, таких як сульфати, хлориди, органічні речовини тощо, може призводити до погіршення технологічних властивостей бетонної суміші (зниження рухливості, розшарування, прискорення або уповільнення тужавіння) та зниження експлуатаційних характеристик бетону (міцності, довговічності, корозійної стійкості) [245].

Дослідження показують, що підвищений вміст сульфатів у воді для приготування бетонної суміші може призводити до утворення еtringіту та гіпсу в бетоні, що спричиняє його розширення, розтріскування та руйнування [112]. Наявність хлоридів у воді в концентраціях, що перевищують допустимі значення, може викликати корозію сталевих арматур в залізобетонних конструкціях, що значно скорочує термін їх експлуатації [298].

Органічні домішки у воді, такі як гумінові кислоти, цукри, танін тощо, можуть сповільнювати процеси гідrataції цементу, погіршувати зчеплення цементного каменю із заповнювачами та знижувати міцність бетону [110]. Крім того, наявність у воді завислих частинок глини, мулу або інших мінеральних домішок може призводити до збільшення потреби у воді бетонної суміші та зниження її однорідності [208].

Використання водопровідної води в лабораторних дослідженнях. При проведенні лабораторних досліджень бетону важливо забезпечити однорідність та відтворюваність результатів, що досягається шляхом використання стандартизованих матеріалів та методів [140]. Застосування водопровідної води для заливки бетонних зразків у межах лабораторії є поширеною практикою, оскільки така вода зазвичай відповідає вимогам якості та має стабільний хімічний склад.

Водопровідна вода проходить багатоступеневу очистку та знезараження на водопровідних станціях, що забезпечує її безпечність та придатність для використання у бетонних сумішах. Крім того, якість водопровідної води регулярно контролюється відповідними службами, що гарантує її відповідність санітарно-гігієнічним нормам та вимогам стандартів [118].

Використання єдиного джерела води (в даному випадку - водопровідної води в межах лабораторії) для заливки всіх бетонних зразків дозволяє уникнути впливу варіацій хімічного складу води на результати досліджень. Це особливо важливо при порівнянні властивостей бетонів з різними складами або при вивченні впливу певних факторів (наприклад, добавок, режимів тверднення тощо) на характеристики бетону [262].

Слід зазначити, що в окремих випадках, коли метою дослідження є вивчення впливу якості води на властивості бетону, можуть застосовуватися води з різними характеристиками (наприклад, морська вода, стічні води, води з підвищеним вмістом певних іонів тощо). Однак такі дослідження потребують ретельного планування експерименту та контролю складу води для отримання достовірних результатів [107].

Незважаючи на значну кількість досліджень щодо впливу якості води на властивості бетону, існує ще багато аспектів, які потребують подальшого вивчення. Одним з перспективних напрямків є дослідження можливості використання альтернативних джерел води для приготування бетонної суміші, таких як очищені стічні води, вода з систем оборотного водопостачання, зворотноосмотичні концентрати тощо [246]. Це дозволить зменшити потребу у прісній воді та сприятиме раціональному використанню водних ресурсів.

Іншим важливим напрямком є вивчення впливу різних методів очищення та кондиціонування води на властивості бетону. Наприклад, застосування мембранних технологій, таких як ультрафільтрація або нанофільтрація, дозволяє видаляти з води дрібнодисперсні домішки та органічні речовини, що може покращувати характеристики бетонної суміші та бетону [246]. Крім того, перспективним є дослідження ефективності використання хімічних реагентів (коагулянтів, флокулянтів, інгібіторів корозії тощо) для покращення якості води та забезпечення довговічності бетонних конструкцій [276].

Важливим напрямком досліджень є також вивчення впливу якості води на властивості спеціальних бетонів, таких як високоміцні бетони, самоущільнювальні бетони, бетони з підвищеною стійкістю до агресивних середовищ тощо. Оптимізація складу води для приготування таких бетонів може дозволити покращити їх технологічні та експлуатаційні характеристики та розширити сферу їх застосування [132].

2.3. Експериментальні методи дослідження

Дослідження властивостей бетону є дуже важливим, оскільки бетон є одним з найбільш широко використовуваних матеріалів у будівництві. Комплексне застосування різних методів оцінки дозволяє всебічно проаналізувати характеристики бетону. Розглянемо детально кожний із цих методів.

Тест на усадку, або сламп-тест (EN 12350-2) [157]: цей метод випробування є стандартизованим і дуже поширеним для оцінки консистенції (густоти) свіжовідформованої бетонної суміші. Він відноситься до категорії експрес-методів контролю якості бетонної суміші для вимірювання усадки бетону використовувався металевий конус висотою 300 мм. Схема тесту та фото під час тесту на усадку зображено на рис. 2.6.

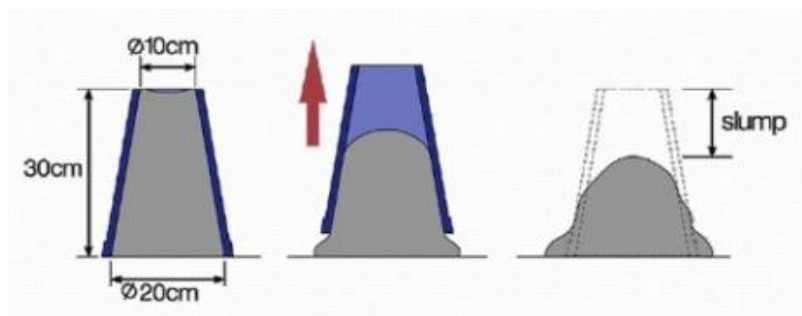


Рис. 2.6. Схема тесту та фото під час тесту на усадку

Бетон заповнювався у конус трьома шарами, кожен з яких підлягав ущільненню 25 разів сталевим стрижнем, забезпечуючи рівномірний розподіл матеріалу та видалення повітряних кишень. Після заповнення конус знімався, дозволяючи бетону осісти, і вимірювалася усадка (сламп) бетонної суміші порівняно з первинною висотою конуса.

Величина осадки вказує на консистенцію бетонної суміші: жорстка суміш (0-2 см осадки), пластична суміш (3-10 см), м'яка суміш (11-20 см), литтєва суміш (>21 см).

Цей тест допомагає контролювати співвідношення компонентів бетону, вміст води та інших добавок для досягнення необхідної консистенції на майданчику. Його результати впливають на вибір методу ущільнення бетонної суміші.

Випробування на стиск (EN 12390-3) [159]: виготовляються стандартні зразки-куби або циліндри із бетонної суміші і піддаються належному догляду для набору міцності. Після визначеного періоду витримки (найчастіше 7, 28 та 100 діб) зразки випробовуються на стиск в гідравлічному пресі. Під час випробування визначається максимальне зусилля, яке здатний витримати зразок до моменту руйнування. Міцність на стиск обчислюється шляхом ділення величини руйнівного зусилля на площу поперечного перерізу досліджуваного зразка. Цей показник є одним з найважливіших для бетону, оскільки характеризує його здатність сприймати навантаження в конструкціях. Від нього залежать експлуатаційні характеристики, термін служби і безпека бетонних елементів (рис. 2.7).

Випробування на згин (JCI-S-001-2003) [230]: Гнучкість та енергія руйнації були оцінені шляхом проведення трикрапкових вигинних випробувань на зразках з надрізом згідно зі стандартом Інституту Бетону Японії JCI-S-001-2003, який дозволяє отримати криву навантаження. Надріз був зроблений на середині кожного бруса внизу, після 28 днів твердіння, і його висота та товщина склали 30 мм і 5 мм відповідно.

Відзначається, що бетонні балки після підготовки та твердіння розміщувались на дві опори у випробувальній машині UTM (INSTRON 8862), з контролем

зміщення розкриття устя тріщини (CMOD), де на них застосовувалось навантаження до моменту розлому. Навантаження при розломі використовувалось для визначення міцності на згин.

Це випробування дозволяє визначити такі ключові характеристики як межа міцності бетону на згин - максимальний згинальний момент, який витримує зразок до моменту руйнування. А також, енергія руйнації - величина, що характеризує здатність бетону поглинати енергію деформації до моменту руйнування.



Рис 2.7. Випробування на стиск

Ці показники мають велике значення для проектування залізобетонних конструкцій, оскільки впливають на їх здатність протистояти перевантаженням, деформаціям і тріщиноутворенню під дією динамічних та сейсмічних навантажень.

Визначення коефіцієнта дифузії хлоридів (EN 12390-11) [158]: є важливим методом оцінки стійкості бетону до впливу агресивних середовищ, зокрема тих, що містять хлориди. Цей метод базується на вимірюванні швидкості проникнення іонів хлору всередину бетонного зразка під дією електричного поля.

Він дозволяє кількісно оцінити опір бетону хлоридній корозії арматури та прогнозувати довговічність залізобетонних конструкцій. Для їх отримання було

зроблено зразки розміром 100 мм x 200 мм для кожної суміші, а потім розрізані на частини для проведення випробування на прискорену міграцію хлоридів.

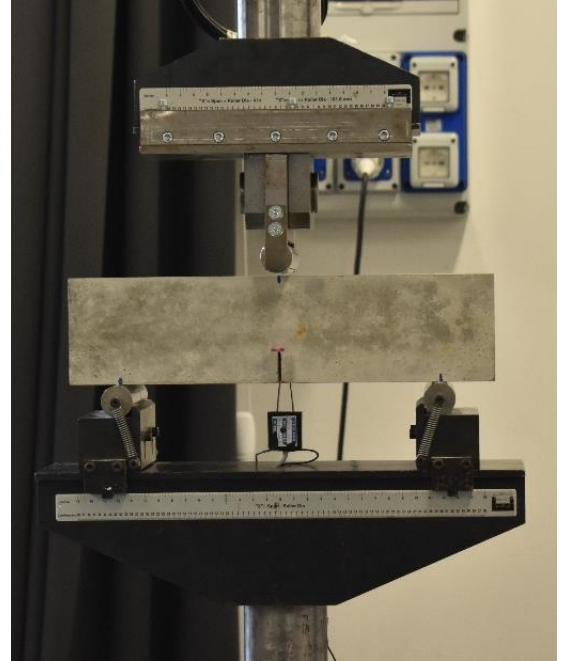
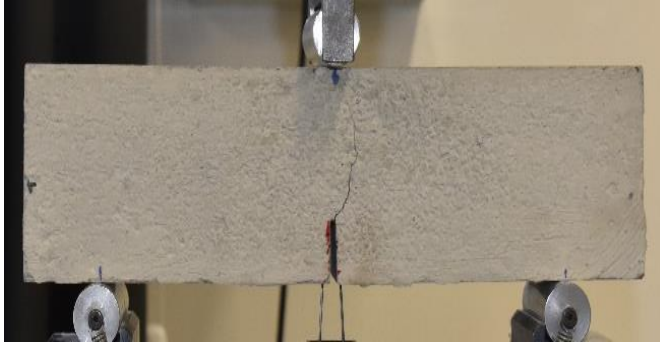


Рис 2.8. Випробування на згин (трикрапкові)

Для отримання результатів, подібних до природної міграції, до всіх зразків було застосовано потенціал 4,5 В. Випробувальна установка представлена на рис. 2.9.

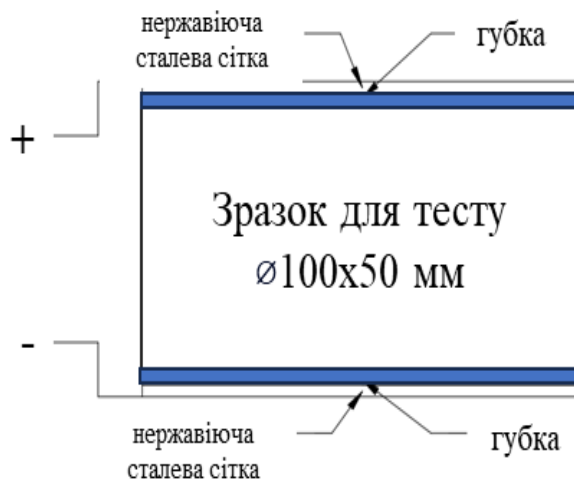


Рис. 2.9. Випробувальна установка

Через деякий час вимірювали середню глибину залягання хлоридів,

розрізаючи зразок на дві частини і розпилюючи AgNO_3 для проведення колориметричного тесту, потім занурювали у хлоридний розчин і періодично аналізували для вимірювання профілю хлоридів у бетоні, що дозволяло визначити коефіцієнт дифузії.

Прискорене випробування на корозію [259]: даний метод дійсно широко використовується для імітації дії агресивних середовищ та вивчення процесів корозії сталевих арматур в бетоні. Сутність методу полягає в наступному: зразок поміщається в розчин, що імітує корозійне середовище (наприклад, розчин хлоридів). До арматури та допоміжного електрода прикладається зовнішній електричний струм. Струм створює умови для протікання електрохімічних реакцій корозії арматури з утворенням продуктів корозії. Контролюються зміни в зразку - тріщиноутворення, деформації, втрата міцності тощо.



Рис. 2.10. Підготовка і тестування

Такі прискорені випробування дають цінну інформацію щодо механізмів корозійного руйнації арматури, оцінки терміну служби залізобетонних конструкцій в агресивних умовах, ефективності захисних покриттів та інгібіторів корозії тощо. Отримані дані використовуються для підвищення довговічності залізобетонних конструкцій шляхом оптимізації складу бетону та протикорозійного захисту.

Прискорення корозії відбувається за рахунок впливу зовнішнього струму та агресивного середовища навколо арматури. Це дозволяє суттєво скоротити час випробувань порівняно з натурними умовами експлуатації. Імітувалось корозійне середовище для залізобетонних конструкцій, застосовуючи електричний струм для прискорення процесу корозії.

Моніторинг потенційної різниці та фізичних змін у арматурі дозволяв оцінити поведінку корозії в бетоні. Ці методи дозволяють кількісно оцінювати швидкість і механізми корозійних процесів, фіксувати зміни в структурі зразків та арматури. Отримані дані аналізуються для встановлення взаємозв'язків між складом бетону, умовами корозійного середовища та корозійною стійкістю. Лабораторний моніторинг є невід'ємною частиною корозійних випробувань, забезпечуючи можливість всебічної оцінки стійкості залізобетонних зразків до корозії.

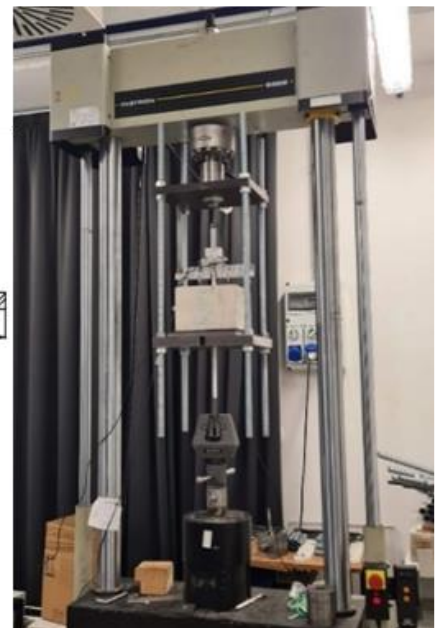
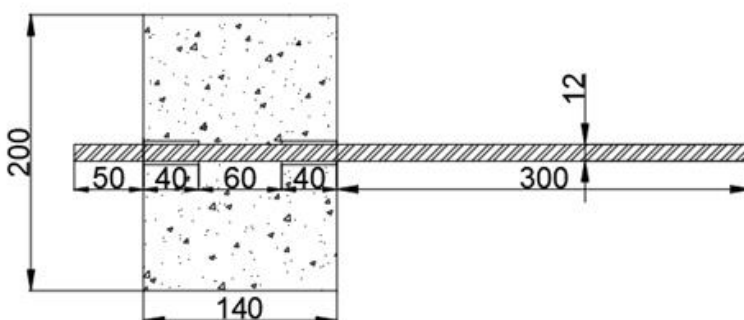


Рис. 2.11. Конфігурація для тесту і налаштування установки

Випробування на Витягування (згідно специфікації RILEM RC6) [301]: є важливим методом для оцінки зчеплення бетону з арматурою в залізобетонних конструкціях. Суть методу полягає в наступному: виготовляється бетонний зразок з анкерованим стрижнем арматури, який виступає з однієї сторони зразка. Після набуття бетоном необхідної міцності, арматурний стрижень зазнає дії осьового розтягувального зусилля, прикладеного у напрямку його витягування з бетонного масиву. Фіксується максимальне зусилля, за якого відбувається повне витягання стрижня арматури із зразка бетону. Розраховується опір витягуванню як відношення максимального зусилля до поверхні зчеплення арматури з бетоном.

Отримані дані міцності зчеплення є критично важливими для забезпечення спільної роботи бетону та арматури і правильного проектування залізобетонних конструкцій.

Ці методики забезпечували комплексну оцінку фізичних і механічних властивостей бетону, а також допомагали зрозуміти його поведінку в різних умовах експлуатації в рамках проведеного дослідження.

Висновки до розділу 2

Розроблена методологія, що включає літературний огляд, вибір методів дослідження, визначення матеріалів для міксів, збір та аналіз даних, забезпечує всебічний підхід до оцінки можливості використання рециклінгових матеріалів у бетонних сумішах. Це дозволяє глибоко зрозуміти вплив цих матеріалів на механічні, фізичні та довговічні властивості бетону.

У даному розділі розглянуто методику дослідження властивостей бетону з використанням відходів руйнації у якості заповнювачів. Обґрунтовано вибір портландцементу марки СЕМ ІІ/А-LL 42.5 R як в'язучого, який відповідає високим стандартам якості згідно з EN 197-1 та ДСТУ Б EN 197-1. Цей цемент містить добавки, що знижують вміст CO₂ при виробництві, що робить його більш екологічно безпечним порівняно з традиційними портландцементами.

Як дрібний та крупний заповнювачі було обрано річковий пісок та натуральний гравій відповідно. Ці матеріали характеризуються оптимальним гранулометричним складом, високою щільністю, міцністю та низьким водопоглинанням, що сприяє отриманню бетонів з покращеними фізико-механічними властивостями, такими як легковкладальність, ущільненість та довговічність.

Особливу увагу приділено використанню заповнювачів з відходів руйнації бетонних конструкцій. Ці матеріали були отримані шляхом переробки бетонних відходів і мали гранулометричний склад, подібний до природного гравію. Застосування рециклінгових заповнювачів є прикладом сталого підходу в будівництві, який дозволяє зменшити споживання природних ресурсів, знизити обсяги відходів та скоротити викиди парникових газів. Результати досліджень показали, що перероблені бетонні відходи можуть ефективно замінювати традиційний гравій у бетонних сумішах без суттєвого зниження міцності та довговічності бетону. Це відкриває нові можливості для будівельної галузі в напрямку сталого розвитку та циркулярної економіки.

У роботі також розглянуто застосування суперпластифікатора DYNAMON END W202 R для покращення властивостей бетонної суміші. Ця добавка дозволяє знизити водопотребу, підвищити рухливість та зберегти тривалу оброблюваність бетонної суміші, що сприяє отриманню більш щільної та міцної структури бетону.

Для комплексної оцінки властивостей бетону з використанням відходів руйнації було застосовано різноманітні експериментальні методи, такі як тест на усадку, випробування на стиск та згин, визначення коефіцієнта дифузії хлоридів, прискорене випробування на корозію та випробування на витягування арматури. Ці методи дозволили всебічно проаналізувати фізико-механічні характеристики бетону, його стійкість до агресивних впливів та зчеплення з арматурою.

Таким чином, проведені дослідження показали доцільність та ефективність використання відходів руйнації у якості заповнювачів для бетону. Комплексний підхід до вибору компонентів бетонної суміші, оптимізація її складу та

застосування сучасних методів випробувань дозволяють отримувати бетони з покращеними експлуатаційними характеристиками та зниженим впливом на довкілля. Результати цього розділу створюють підґрунтя для подальшого вдосконалення технологій переробки будівельних відходів та розширення сфери застосування рециклінгових матеріалів у будівництві.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕТОНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЗАПОВНЮВАЧІВ З ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ

3.1. Властивості заповнювачів з відходів руйнації

Одним з перспективних напрямків використання відходів руйнації є їх переробка на заповнювачі для бетонних сумішей. Такий підхід дозволяє зменшити потребу у видобутку природних матеріалів, знизити навантаження на полігони та звалища, а також отримати економічні вигоди від повторного використання будівельних відходів. Проте застосування заповнювачів з відходів руйнації в бетонах вимагає ретельного вивчення їх властивостей та особливостей у порівнянні з природними заповнювачами [366].

Успішне використання перероблених агрегатів у бетоні вимагає ґрунтовного розуміння їх властивостей та ефективності. Для більш детального розуміння використання і доцільності застосування заповнювачів з відходів руйнації (ЗВР) була створена база даних, яка компілює інформацію про механічні властивості бетону із додаванням ЗВР, засновану на огляді літератури. Також надаються статистичні розподіли для розуміння впливу ЗВР на основні властивості бетону.

Використання ЗВР у бетоні було предметом розгорнутих досліджень у останні роки. У багатьох роботах досліджували наслідки включення ЗВР у бетоні суміші та вивчали його вплив на різні властивості бетону. Для ґрунтовного розуміння цього питання було проведено ретельний огляд літератури, зібрано базу даних з 60 публікацій англійською мовою за 32 роки, зокрема з 1990 по 2022 роки. Ці публікації, які зосереджені на використанні ЗВР, отриманого з будівництва та руйнації бетонних конструкцій, охоплюють широкий спектр питань, пов'язаних із використанням ЗВР у бетоні.

Для забезпечення актуальності та релевантності зібраних даних було

використано конкретні ключові слова та фрази, що стосуються ЗВР, у пошуку в архівах Scopus та Web of Science для відповідних статей, таких як: заповнювачі з перероблених бетонних відходів; відходи руйнації; механічні властивості заповнювачів з відходів руйнації; довговічність бетону з переробленими заповнювачами тощо. Після створення бази даних основа для аналізу даних була переважно сформована на основі вибраних оглядів та всеосяжних аналізів, проведених у цих роботах [177, 197, 236, 308, 321, 323, 336, 342, 355, 178, 198, 237, 309, 322, 324, 337, 343, 356].

Особлива увага була приділена дослідженням, які представляли експериментальні роботи. Були вивчені різні дослідницькі кампанії, включаючи варіації рівня заміщення природних заповнювачів на ЗВР, характеристики суміші, включення хімічних добавок та домішок, а також еволюцію міцності з часом. Були вивчені та задокументовані властивості затверділого матеріалу, такі як міцність на стиск, міцність на розтяг, модуль пружності та міцність при згині. Також були досліджені властивості довговічності, такі як водопоглинання, абсорбція, стійкість до кислотної атаки та проникність хлоридів. На рис. 3.1 представлено етапи процесу компіляції бази даних та подальші етапи збору даних.

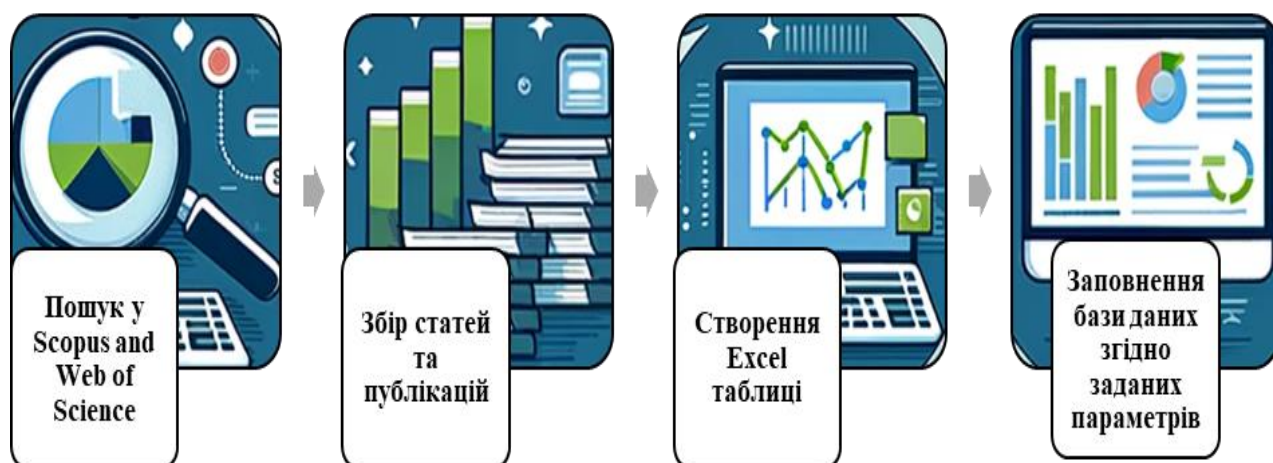


Рис. 3.1. Послідовність збору даних та компіляції бази даних

Статистичний аналіз даних. Зібрані дані були статистично проаналізовані для

визначення впливу ЗВР на основні властивості бетону. Були розраховані середні значення, стандартні відхилення та коефіцієнти варіації для кожної властивості бетону з різними рівнями заміщення природних заповнювачів на ЗВР. Також були побудовані гістограми розподілу значень властивостей бетону для візуалізації впливу ЗВР на їх варіативність.

Результати статистичного аналізу показали, що збільшення рівня заміщення природних заповнювачів на ЗВР призводить до зниження міцності на стиск та модуля пружності бетону. Проте, при рівнях заміщення до 30% зниження міцності є незначним і може бути компенсоване за рахунок оптимізації складу бетонної суміші та використання хімічних добавок. Водопоглинання та проникність бетону з ЗВР зростають зі збільшенням рівня заміщення, що може негативно впливати на довговічність бетонних конструкцій. Тому при використанні високих рівнів заміщення (більше 50%) необхідно передбачати додаткові заходи для підвищення довговічності бетону, такі як використання добавок-інгібіторів корозії, гідрофобізаторів, ущільнюючих добавок тощо.

Створена база даних та проведений статистичний аналіз дозволяють зробити наступні висновки щодо використання ЗВР у бетоні:

1. Заповнювачі з відходів руйнації можуть успішно використовуватись для часткової заміни природних заповнювачів у бетонних сумішах. При рівнях заміщення до 30% зниження міцності та довговічності бетону є незначним і може бути компенсоване за рахунок оптимізації складу суміші.

2. Збільшення рівня заміщення природних заповнювачів на ЗВР призводить до зростання варіативності властивостей бетону, особливо міцності та проникності. Тому при використанні високих рівнів заміщення (більше 50%) необхідно приділяти особливу увагу контролю якості ЗВР та оптимізації складу бетонної суміші.

3. Використання хімічних добавок та активних мінеральних добавок дозволяє покращити властивості бетону з ЗВР, зокрема підвищити міцність, знизити водопоглинання та проникність, підвищити корозійну стійкість.

4. При проектуванні складу бетонної суміші з ЗВР необхідно враховувати вищу потребу у воді та нижчу щільність ЗВР у порівнянні з природними заповнювачами. Також необхідно контролювати вміст пилоподібних та глинистих частинок у ЗВР, які можуть негативно впливати на властивості бетонної суміші та бетону.

5. Для широкого впровадження використання ЗВР у бетоні необхідно розробити національні стандарти та рекомендації, які б регламентували вимоги до якості ЗВР, методи їх випробувань, правила проектування складу бетонної суміші та контролю якості бетону з ЗВР.

Отже, використання заповнювачів з відходів руйнації є перспективним напрямком для сталого розвитку будівельної галузі, який дозволяє зменшити використання природних ресурсів, знизити вартість бетону та вирішити проблему утилізації будівельних відходів. Проте для успішного використання ЗВР у бетоні необхідно враховувати їх особливості та забезпечувати контроль якості на всіх етапах виробництва.

При розгляді використання заповнювачів з відходів руйнації для виробництва нового бетону, важливо розуміти, як фізичні та механічні властивості заповнювачів з відходів руйнації відрізняються від властивостей природних заповнювачів, а також, як ці відмінності впливають на «поведінку» бетону. Розуміння відмінностей між заповнювачів з відходів руйнації та природних заповнювачів є дійсно необхідним при розгляді заміни заповнювачів з відходів руйнації на конструкційні суміші бетону. Порівняння властивостей цих агрегатів, підкреслюючи їх варіативність та потенціал використання заповнювачів з відходів руйнації у застосуваннях бетону наведено в табл. 3.1.

Важливо визнати, що заповнювачі з відходів руйнації є природно змінними через їх походження з різних джерел знесеного бетону. У порівнянні з природними заповнювачами та стандартними властивостями, насичена поверхнево-суха щільність заповнювачів з відходів руйнації зазвичай нижча, коливається від 2,300 до 2,750 кг/м³. Це трохи нижче стандартного діапазону щільності для звичайних

агрегатів, який складає 2,400 до 2,700 кг/м³ згідно з європейськими стандартами (EN 12620:2002) [161], через залишковий розчин на заповнювачах з відходів руйнації.

Таблиця 3.1

**Властивості заповнювачів рециклінгу в порівнянні із натуральними
бетонними заповнювачами**

Властивість	Тип агрегатів	Мін	Макс
Насичена поверхнево-суха щільність (кг/м ³)	заповнювачі з відходів руйнації	2300	2750
	природні заповнювачі	2400	2700
Щільність після сушіння в печі (кг/м ³)	заповнювачі з відходів руйнації	2100	2640
	природні заповнювачі	2500	2700
Водопоглинання агрегатів (%)	заповнювачі з відходів руйнації	3.52	7.55
	природні заповнювачі	0.5	2.0
Розмір агрегату, мм	заповнювачі з відходів руйнації	4	30
	природні заповнювачі	4	37.5
Відсоток заміни, %	заповнювачі з відходів руйнації	10	100
	природні заповнювачі	-	-

Значною відмінністю між заповнювачів з відходів руйнації та природних заповнювачів є їх швидкість водопоглинання. Заповнювач з відходів руйнації може абсорбувати між 3.52% та 7.55% води, що значно більше, ніж природний заповнювач, який поглинає між 0.5% та 2.0%. Стара цементна паста у заповнювачах з відходів руйнації відповідає за цю підвищену здатність до поглинання.

Гранульованість заповнювачів з відходів руйнації зазвичай лежить у межах від 4 мм до 30 мм, що добре узгоджується з європейськими нормами для крупного природного заповнювача, які варіюються від 4 мм до 37.5 мм. Ці розміри діапазонів є критичними для забезпечення рівномірного розподілу в бетонній суміші, впливаючи на роботу і структурну поведінку. При адаптації конструкції бетонної суміші важливо, коли включаються перероблені матеріали, як заповнювачі з відходів руйнації, оскільки їх властивості вимагають коригування вмісту води та використання добавок для досягнення потрібної робочої здатності та міцності.

Крім того, попередні обробки та гарні практики обробки можуть підвищити якість заповнювачів з відходів руйнації, мінімізуючи кількість прилипло

розчину. Також попереднє зволоження заповнювачів з відходів руйнації або регулювання співвідношення вода-цемент у суміші може вирішити проблему їх вищої швидкості поглинання. Хоча заповнювачі з відходів руйнації може не завжди ідеально відповідати необхідному розподілу розмірів для дотримання оптимальної кривої градації (наприклад, за Фуллером або Боломеєм), добре налаштований процес подрібнення може дати відповідну градацію для бетонних застосувань, або вони можуть бути змішані з природними заповнювачами для отримання бажаних властивостей. Згідно зі стандартами Eurocode, співвідношення заміни крупного заповнювача з відходів руйнації на натуральний агрегат може варіюватися від 15% до 60%, залежно від країни та конкретних вимог, пов'язаних зі структурною цілісністю та довговічністю бетону [165].

В Україні на сьогодні відсутні спеціальні нормативні документи, які б регламентували використання ЗВР в бетонах. Проте діючі стандарти ДСТУ Б В.2.7-75-98 "Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт" та ДСТУ Б В.2.7-32-95 "Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт" допускають застосування щебеню та піску з відходів промисловості за умови відповідності їх якості вимогам цих стандартів [23,22].

Отже, в Україні використання заповнювачів з відходів руйнації в бетонах має значні перспективи, особливо в контексті повоєнної відбудови та переходу до циркулярної економіки. Для реалізації цього потенціалу необхідно розробити національні стандарти щодо використання заповнювачів з відходів руйнації в бетонах, створити ефективну систему управління відходами руйнації, налагодити співпрацю між ключовими стейкхолдерами та впровадити економічні стимули для переробки та повторного використання будівельних відходів.

3.2. Розроблення та дослідження рецептур бетонних сумішей

Розроблення та дослідження рецептур бетонних сумішей є важливим етапом

у процесі виготовлення бетону з використанням заповнювачів з відходів руйнації (ЗВР). Для забезпечення необхідних властивостей бетону, таких як міцність, довговічність та зручність укладання, необхідно враховувати особливості ЗВР та коригувати склад бетонної суміші відповідно до них.

У дослідженні були використані крупні заповнювачі двох типів: природні заповнювачі (ПЗ) та заповнювачі з відходів руйнації (ЗВР). Властивості цих заповнювачів наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Властивості крупних заповнювачів

Тип	Щільність (Мг/м ³)	Водопоглинання (% від ваги)	Індекс плоскості (% від ваги)	Розчинні у воді хлориди (% від ваги)	Розчинні у кислоті сульфати (% від ваги)	Загальні сульфати (% від ваги)
Природні заповнювачі	2.64	0.86	<15	0.0013	<0.2	<1
Заповнювачі з відходів руйнації	2.37	5.40	16.08	<0.01	<0.002	<0.001

Щільність природних заповнювачів з відходів руйнації (2,64 кг/м³) є вищою, ніж у природних заповнювачів з відходів руйнації (2,37 кг/м³). Це означає, що бетонні суміші з рециклінговими заповнювачами можуть мати дещо нижчу щільність. Водопоглинання рециклінгових заповнювачів (5,40%) значно вище, ніж у природних (0,86%). Це може призвести до підвищеної потреби у воді для бетонних сумішей з рециклінговими заповнювачами та впливати на їх легковкладальність і міцність. Індекс плоскості (вміст пластинчастих зернят) для рециклінгових заповнювачів (16,08%) є вищим порівняно з природними (<15%). Це може негативно вплинути на ущільненість бетонної суміші та її механічні властивості. Вміст розчинних у воді хлоридів і сульфатів у рециклінгових заповнювачах є нижчим, ніж у природних. Це є позитивним фактором, оскільки менший вміст цих речовин зменшує ризики корозії арматури та сульфатної агресії в бетоні. Загальний вміст сульфатів у рециклінгових заповнювачах (<0,001%)

також нижчий порівняно з природними (<1%), що додатково знижує ризик сульфатної корозії в бетоні.

Таким чином, рециклінгові заповнювачі мають дещо гірші показники щільності, водопоглинання та форми зернят порівняно з природними, що може впливати на властивості бетонної суміші. Однак, менший вміст хлоридів і сульфатів у рециклінгових заповнювачах є перевагою з точки зору довговічності бетону.

Отже, заповнювачі з відходів руйнації мають нижчу щільність, вище водопоглинання та індекс плоскості, але меншу засоленість хлоридами та сульфатами порівняно з природними заповнювачами. Ці відмінності необхідно враховувати при проектуванні рецептур бетонних сумішей з їх використанням.

Три типу сумішей були розроблені і залиті в Інституті матеріалів, випробувань і конструкцій Університету Парми, Італія. Еталонний бетон містив лише природні заповнювачі, без заповнювачів з відходів руйнації.

Враховуючи два рівні заміни крупного заповнювача, було визначено два види сумішей, які порівнювалися з еталонним бетоном (ЕБ). Точніше, дві суміші замінили природний гравій на 25% і 50% заповнювачів з відходів руйнації, названі С25 і С50 відповідно. Різні суміші підсумовані в таблиці 3.3, де кількості відносяться до твердого залишкового стану заповнювача.

Таблиця 3.3

Склад міксів зразків для експериментальних сумішей

Код міксу	Відсоток заміни природних заповнювачів по масі, у (%)	Пісок (кг/м ³)	Природні заповнювачі (кг/м ³)	Заповнювачі з відходів руйнації (кг/м ³)	Цемент (кг/м ³)	Вода (кг/м ³)	Суперпластифікатор (кг/м ³)
ЕБ	0	1139	567	0.00	400	200	2.6
С25	25	1139	426	134	400	200	2.6
С50	50	1139	284	268	400	200	2.6

Всі суміші змішувалися за допомогою змішувача барабанного типу з сухим заповнювачем всередині (рис 3.2). Потім до суміші додавали воду (50% від загального об'єму) (для перемішування та поглинання заповнювача). Пізніше 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.



Рис 3.2. Лабораторний змішувач барабанного типу

На рисунку 3.3 зображені зразки бетону, упаковані і підготовлені для подальших тестувань, включаючи визначення міцності, щільності та інших важливих параметрів. Зразки були вироблені різних типів і розмірів для забезпечення комплексного аналізу матеріалів.

Одразу після виймання бетонних зразків з форм їх необхідно належним чином витримати протягом певного періоду, щоб досягти очікуваної міцності та твердості. Контрольоване вологе середовище необхідне для того, щоб цемент у бетоні набув міцності і затвердів належним чином. У звичайному бетоні цементний

розчин твердне з часом, спочатку схоплюючись і стаючи жорстким, хоча і дуже слабким, і набираючи міцність через кілька днів. Існують деякі речовини (цемент, що швидко твердіє, кремнезем тощо), які використовуються, коли проектувальник рекомендує швидке набрання міцності для спеціальної конструкції. Приблизно за 3 тижні звичайний бетон набирає понад 75% своєї остаточної міцності, але зміцнення бетону може тривати десятиліттями.



Рис. 3.3. Зразки бетону в стандартних формах, загорнуті та марковані для подальших випробувань

Зазвичай перші три дні після укладання в опалубку є критичними для гідратації та затвердіння бетону. Випаровування води на цьому етапі спричиняє швидке висихання, а усадка бетону в результаті може призвести до збільшення напружень на розтягнення в той час, коли бетон ще не набрав достатньої міцності, що знову ж таки призводить до збільшення усадочних тріщин. Протягом періоду твердіння бетону необхідно підтримувати контрольовану температуру і вологість. Ранню міцність бетону можна підвищити, якщо підтримувати його у вологому стані протягом усього періоду твердіння. На практиці затвердіння досягається шляхом заливання або розпилення води на поверхню бетону, що заповнювач захищає бетон від несприятливого впливу навколишнього середовища.

Після цього зразки було занурено у воду для проведення випробувань після 7, 28 та 100 днів затвердіння (рис 3.4).



Рис 3.4. Етапи затвердіння бетону: зразки занурені в воду для гідротермічного визрівання перед випробуваннями на міцність

При проектуванні складу бетонної суміші з ЗВР необхідно враховувати такі фактори:

- вищу потребу у воді ЗВР у порівнянні з ПЗ. Через високе водопоглинання ЗВР необхідно збільшувати кількість води замішування або використовувати водоредукуючі добавки для забезпечення необхідної консистенції бетонної суміші;

- нижчу щільність ЗВР у порівнянні з ПЗ. При заміні ПЗ на ЗВР необхідно збільшувати об'єм заповнювачів для компенсації зниження щільності бетону;

- наявність пилоподібних та глинистих частинок у ЗВР. Підвищений вміст таких частинок може негативно впливати на властивості бетонної суміші та бетону, тому необхідно контролювати їх вміст у ЗВР та за необхідності проводити додаткове очищення;

- потенційну реакційну здатність ЗВР. Деякі типи ЗВР можуть містити

реакційноздатні заповнювачі, які можуть викликати лужно-кремнієву реакцію в бетоні. Тому необхідно перевіряти ЗВР на реакційну здатність та за необхідності вживати заходів для запобігання деструктивних процесів у бетоні.

Розроблення та оптимізація рецептур бетонних сумішей з використанням заповнювачів з відходів руйнації є важливим етапом у виробництві бетону з покращеними екологічними та економічними показниками. При проектуванні складу бетонної суміші з ЗВР необхідно враховувати їх особливості, такі як підвищене водопоглинання, знижену щільність, наявність пилоподібних частинок та потенційну реакційну здатність. Оптимізація складу бетонної суміші з ЗВР дозволяє знайти компромісні рішення між вмістом ЗВР, витратою цементу та водоцементним відношенням, які забезпечують необхідні властивості бетону.

3.3. Результати експерименту: оцінки механічних, фізичних та довговічних властивостей бетону із додаванням заповнювачів з відходів руйнації

При розробленні рецептур бетонних сумішей з ЗВР використовували метод абсолютних об'ємів з урахуванням вищезазначених факторів. Водоцементне відношення підбирали з урахуванням потреби у воді ЗВР та необхідної консистенції бетонної суміші. Для компенсації зниження міцності бетону при використанні ЗВР збільшували витрату цементу або використовували активні мінеральні добавки, такі як мікрокремнезем, метакаолін, золу-винесення.

Для оптимізації складу бетонної суміші з ЗВР використовували методи математичного планування експерименту, зокрема симплекс-ґратчасте планування. Варійованими факторами були вміст ЗВР (від 0 до 100% заміни ПЗ), витрата цементу (від 300 до 500 кг/м³), водоцементне відношення (від 0,4 до 0,6).

3.3.1. Властивості свіжого бетону

Властивості свіжого бетону є критично важливими для забезпечення якості будівельних робіт. Це стосується не лише міцності та довговічності конструкцій, а

й безпеки в цілому. Зручність укладання бетонної суміші визначає її здатність бути легко переміщеною, укладеною та ущільненою без розшарування компонентів. Це ключова властивість, яка впливає на якість та ефективність будівельного процесу.

Осадка конуса (сламп-тест) використовується для визначення рухливості бетонної суміші. Він полягає у вимірюванні зміни висоти бетонної суміші після зняття стандартної конусної форми. На рис. 3.5 представлено вплив відсотка заміщення крупного заповнювача заповнювачами з відходів руйнації (ЗВР) на рухливість свіжої бетонної суміші в сантиметрах.

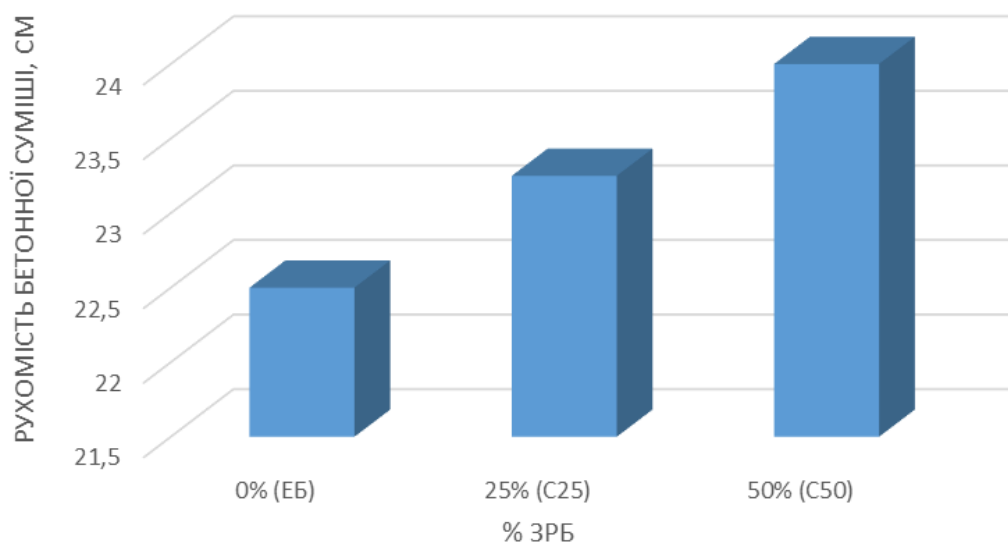


Рис. 3.5. Результати випробування осадки конуса (сламп-тест)

На осі абсцис (горизонтальній осі) представлено відсоток заміщення крупного заповнювача ЗВР:

- 0% (ЕБ) - еталонний бетон без ЗВР.
- 25% (Б25) - бетона суміш з 25% ЗВР.
- 50% (Б50) - бетона суміш з 50% ЗВР.

В свою чергу, на осі ординат (вертикальній осі) відкладено осадку конуса в сантиметрах.

Графік на рисунку 3.5 демонструє пряму залежність між відсотком заміщення крупного заповнювача ЗВР та рухливістю бетонної суміші. Зі збільшенням вмісту ЗВР від 0% до 50% осадка конуса зростає з 18 см для еталонного бетону до 21 см

для бетону з 50% ЗВР. Це свідчить про покращення текучості та зручності укладання бетонної суміші при використанні ЗВР.

Наступним важливим фактором є густина свіжої бетонної суміші. Вона визначається як маса бетонної суміші на одиницю її об'єму і є критично важливим показником, який впливає на багато аспектів конструкції, включаючи міцність, довговічність та загальну якість будівельних робіт. Густина свіжої бетонної суміші може змінюватись в залежності від типу та пропорції заповнювачів, вмісту води та вмісту повітря. Зокрема, високий вміст води може знизити густину, в той час як збільшення кількості щільних заповнювачів може її підвищити. Густина впливає на здатність бетону витримувати навантаження та на його довговічність. Нижча густина може вказувати на вищий вміст повітря, що корисно для морозостійкості, але може зменшити міцність. Вища густина зазвичай є індикатором більшої міцності та кращої довговічності.

Густину зазвичай визначають шляхом відбору проби свіжої бетонної суміші відразу після перемішування і вимірювання її маси у стандартному об'ємі. Заповнювачі з відходів руйнації використовуються для покращення технологічних властивостей бетонної суміші, але як видно з даних, вони також впливають на густину бетонної суміші, зменшуючи її при збільшенні відсотка заміщення.

Дані, представлені на рис. 3.6, ілюструють, що зі збільшенням вмісту ЗВР від 0% до 50%, густина бетонної суміші знижується лінійно. Це може бути пов'язано з вищим об'ємом пор та/або заміною щільніших компонентів бетонної суміші на легші ЗВР. Лінійне рівняння регресії ($y = -1.008x + 2312,9$) та коефіцієнт детермінації ($R^2 = 1$) свідчать про обернену залежність: зі збільшенням відсотка ЗВР густина бетонної суміші знижується. Графік на рисунку 3.6 показує обернену лінійну залежність між відсотком заміщення крупного заповнювача ЗВР та густиною свіжої бетонної суміші. Зі збільшенням вмісту ЗВР від 0% до 50% густина бетонної суміші знижується з 2313 кг/м³ для еталонного бетону до 2262 кг/м³ для бетону з 50% ЗВР. Високий коефіцієнт детермінації ($R^2 = 1$) вказує на точність лінійної апроксимації даних. Тангенс кута нахилу прямої на графіку 3.6 дорівнює -

1,008, що означає зменшення густини бетонної суміші на 1,008 кг/м³ при збільшенні відсотка ЗВР на 1%. Від'ємний знак тангенса кута нахилу підтверджує обернену залежність між цими параметрами.

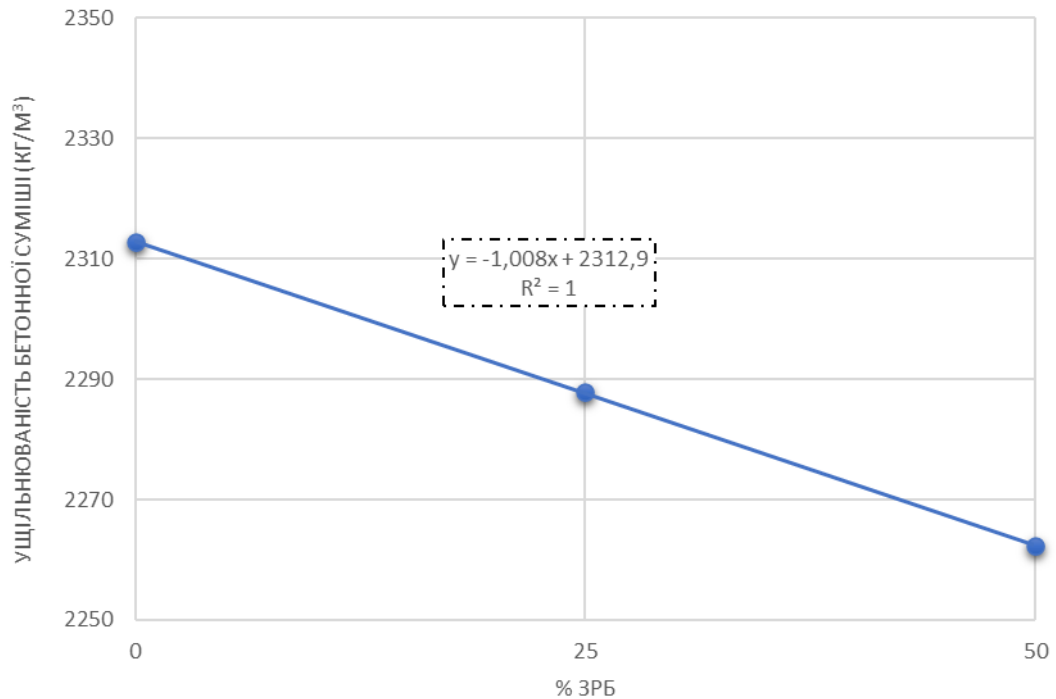


Рис 3.6. Щільність свіжої бетонної суміші

Зміна густини бетонної суміші з використанням ЗВР може мати значний вплив на конструкційну міцність і масу бетонних елементів, а також на економічність і екологічність будівельних проектів. Необхідні подальші дослідження для вивчення впливу зменшення густини на інші важливі характеристики бетону.

Аналіз графіків показує, що використання заповнювачів з відходів руйнації покращує рухливість свіжої бетонної суміші, але призводить до зниження її густини. Це може мати як позитивні (покращення зручності укладання), так і негативні (зниження міцності та довговічності) наслідки для якості бетону.

Для оптимізації складу бетонної суміші з ЗВР необхідно знайти баланс між рухливістю та густиною, який забезпечить необхідні технологічні та експлуатаційні властивості бетону. Це може досягатися шляхом коригування вмісту води, вмісту цементу, гранулометричного складу заповнювачів та

використання хімічних добавок-модифікаторів.

3.3.2. Властивості затверділого бетону

Міцність при згині та енергія руйнації. Вивчення механічних властивостей бетону, зокрема його гнучкості та здатності поглинати енергію під час руйнації, є ключовими для розуміння та покращення довговічності та стійкості бетонних конструкцій. Вони дозволяють оцінити не тільки міцність бетону, але й його здатність розподіляти навантаження та поглинати енергію при деформаціях, що є важливими характеристиками для розуміння поведінки матеріалу під час експлуатації.

Випробування, які проводяться на зразках з надрізом, дають важливу інформацію про поведінку матеріалів під час навантаження та дозволяють інженерам краще прогнозувати поведінку конструкцій в умовах експлуатації.

Оцінка гнучкості ($f_{ct,flex}$) та енергії руйнації (G_f) бетону проводилася через ретельно контрольовані трикрапкові вигинні випробування. Згідно зі стандартом Інституту Бетону Японії, ці випробування включали аналіз кривої залежності навантаження (F) від відкриття тріщини при розтягуванні (CMOD). Стандарт передбачає встановлення надрізу в середині нижньої частини кожного бруса, що було здійснено після 28 днів твердіння зразків. Розміри надрізу були уніфіковані, з висотою і товщиною відповідно 30 мм та 5 мм.

Гнучкість бетону розглядається як індикатор його непрямої міцності на розтяг, яка вимірюється за піковим навантаженням на кривій (F_{max}). Вона була обчислена за допомогою формули, що враховує висоту (D) і ширину (B) перерізу бруса (обидві рівні 100 мм) та розмах (S), який становить 300 мм.

Міцність на згин, гнучкість ($f_{ct,flex}$) визначається як непрямий показник міцності бетону на розтяг. Ця величина вираховується з пікового навантаження, отриманого з кривої залежності між силою та відкриттям тріщини під час розтягування (CMOD). Математично гнучкість визначається за формулою (3.1):

$$f_{ct,flex} = F_{max} \frac{3S}{2B(D-d)^2} \quad (3.1)$$

де F_{max} - максимальна сила навантаження,

S - довжина проміжку між опорами,

B — ширина зразка

D — висота зразка

d — діаметр зразка

Енергія руйнації (G_f) визначається як кількість енергії, необхідної для руйнації матеріалу, і пов'язана з площею під кривою (W_0). Вона була розрахована з урахуванням роботи, яку виконує власна вага зразка та випробувального обладнання (W_1). Цей параметр обчислюється (форм. 3.2) як:

$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{B(D-d)}, \text{ Дж/м}^2 \quad (3.2)$$

де W_0 — початкова робота для створення тріщини, Дж

W_1 — додаткова робота, необхідна для подальшого поширення тріщини, Дж

B — ширина зразка, м

D — висота зразка, м

d — діаметр зразка, м

Графік, зображений на рис. 3.7 показує наступне: суміш з 0% заповнювачів з відходів руйнації (ЗВР) має гнучкість трохи вище 4 МПа, суміш з 25% заповнювачів з відходів руйнації (С25) має схожу гнучкість, також трохи вище 4 МПа, суміш з 50% заповнювачів з відходів руйнації (С50) має значення трохи нижче 4 МПа. А отже, використання заповнювачів з відходів руйнації не знижує міцність бетону на згин. Це демонструє, що бетон з відходів рециклінгу може бути ефективно використаний як альтернатива традиційним заповнювачам без істотної втрати міцності. Стабільні показники міцності при згині при збільшенні вмісту заповнювачів з відходів руйнації до 50% можуть свідчити про високу якість

переробленого заповнювача.

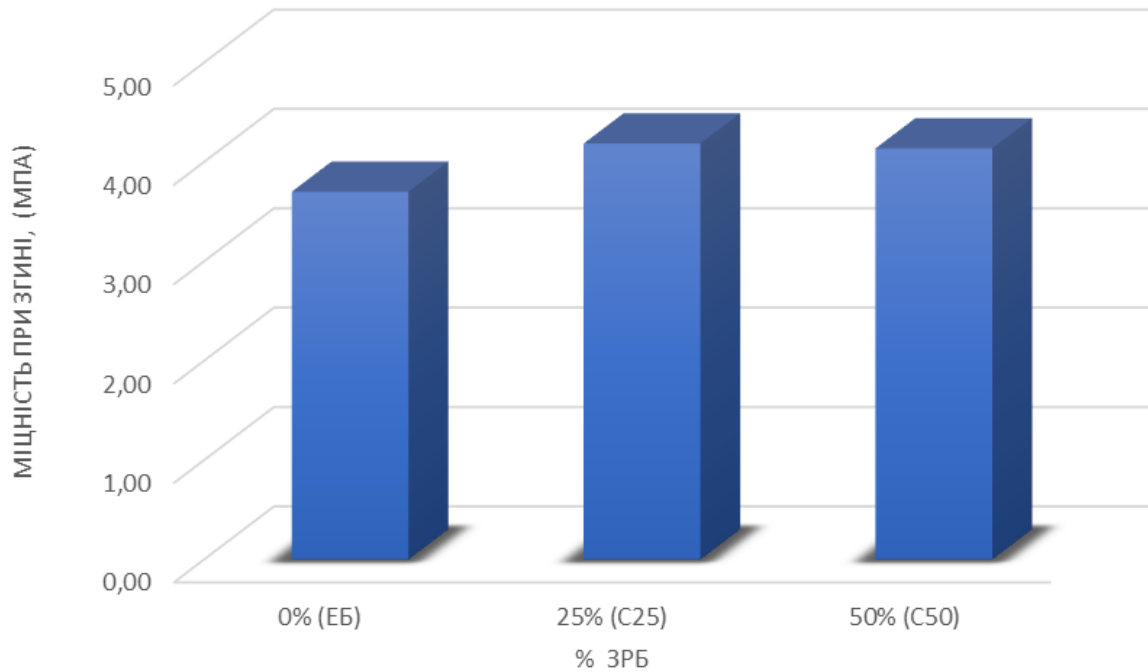


Рис 3.7. Результати міцності на згин

З графіку, що на рисунку 3.8 можна зробити такі спостереження:

- Бетон без додавання заповнювачів з відходів руйнації (0%, ЕБ) має найвищу енергію руйнації, що перевищує 115 Нм.
- Зі збільшенням відсотка заповнювачів з відходів руйнації до 25% (С25), енергія руйнації знижується, опускаючись до приблизно 108 Нм.
- Однак, при подальшому збільшенні відсотка заповнювачів з відходів руйнації до 50% (С50), енергія руйнації знову зростає, наближаючись до 116 Нм.

Якщо припустити, що зниження енергії руйнації при 25% заміщенні (С25) пов'язане з недостатньою зчепленістю між новими і старими заповнювачами або зміною структури матриці бетону, то логічно очікувати подальшого зниження цього показника при збільшенні частки заповнювачів з відходів руйнації до 50% (С50). Однак, ми спостерігаємо зворотну тенденцію - енергія руйнації зростає при 50% заміщенні, майже досягаючи рівня бетону без додавання заповнювачів з відходів руйнації (0%, ЕБ).

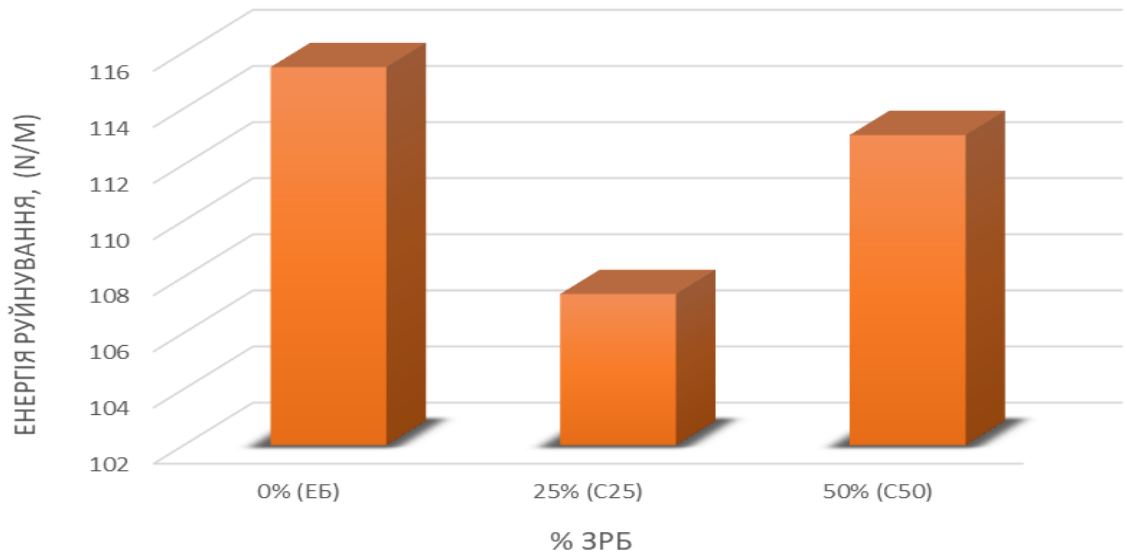


Рис. 3.8. Результати тесту енергії руйнування

Це може свідчити про складнішу залежність між вмістом заповнювачів з відходів руйнації та енергією руйнації бетону, на яку впливають різні фактори, такі як гранулометричний склад, форма і текстура зернят заповнювачів, їх міцність і хімічний склад. Не маючи додаткової інформації про одиниці вимірювання енергії руйнації та деталі методики випробувань, складно зробити однозначний висновок.

Тому, заміна природних заповнювачів рециклінговими з відходів руйнації впливає на енергію руйнації бетону нелінійним чином. Для повного розуміння механізмів цього впливу та оптимізації складу бетонних сумішей з заповнювачами з відходів руйнації потрібні подальші дослідження з урахуванням більшої кількості факторів і детальним аналізом структури та властивостей компонентів.

Міцність на стиск. Міцність на стиск є однією з найважливіших характеристик бетону, оскільки вона визначає його здатність витримувати навантаження, що діють безпосередньо на стиск. Цей параметр особливо важливий для конструктивних елементів, які піддаються значним стискальним силам, таких як колони, фундаменти та плити.

На графіку, рисунок 3.9 ілюструється залежність міцності на стиск бетону від відсотка заміщення звичайного заповнювача на заповнювачі з відходів руйнації

через 7, 28 та 100 днів від початку твердіння. Дані представлені для трьох серій бетонних зразків з різним вмістом заповнювачів з відходів руйнації : 0% (RC), 25% (C25) та 50% (C50).

Ключові спостереження наступні:

- Традиційний бетон з 0% заповнювачів з відходів руйнації (ЕБ): показує зростання міцності на стиск із часом, що є типовим для бетону, оскільки процес гідrataції цементу продовжує зміцнювати матеріал протягом перших 100 днів.
- Бетон з 25% заповнювачів з відходів руйнації (C25): Має нижчу міцність на стиск на початковому етапі (7 днів), але показує значне збільшення міцності протягом 28 днів, що свідчить про потенційну пуцоланову активність у рециклованих матеріалах. Проте, до 100 днів міцність знову знижується порівняно зі стандартним бетоном.
- Бетон з 50% заповнювачів з відходів руйнації (C50): Відображає найнижчу міцність на стиск на 7 день, однак міцність на 28 день є вищою ніж у бетону з 25% заповнювачів з відходів руйнації . На 100 день, міцність на стиск знову знижується, але залишається вищою, ніж у бетону з 25% заповнювачів з відходів руйнації.

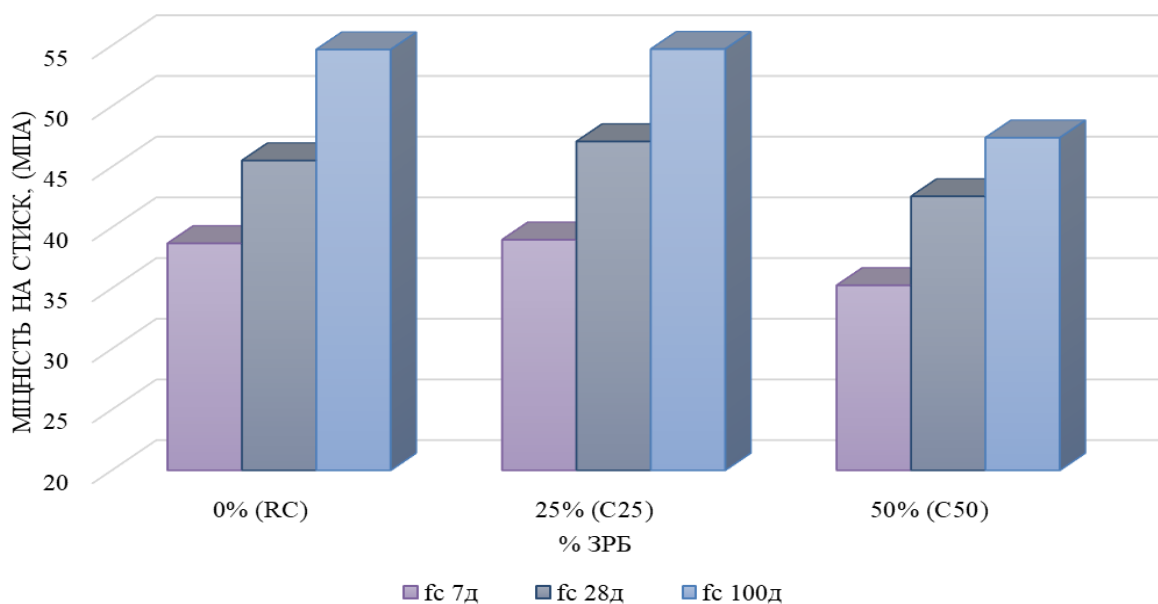


Рис. 3.9. Результати тесту для визначення міцності на стиск

Отже, міцність на стиск бетону із додаванням заповнювачів з відходів руйнації проявляє різні тренди залежно від часу твердіння та відсотку заміщення. На ранніх етапах (7 днів) матеріал з рециклінгу може не виявляти такої міцності, як традиційний бетон, що можливо пов'язано зі стартовою слабкістю з'єднань між старими і новими матеріалами. Проте, з часом ці з'єднання можуть зміцнюватись, що призводить до збільшення міцності на стиск, особливо помітно це у зразках з 25% заповнювачів з відходів руйнації на 28 день. Були розглянуті три терміни тверднення: 7, 28 та 100 днів. Заміна 25% заповнювачів з відходів руйнації (С25) показала майже таку саму міцність на стиск, як і контрольний склад з 0% заповнювачів з відходів руйнації (ЕБ) для всіх розглянутих термінів тверднення. Однак заміна 50% заповнювачів з відходів руйнації (С50) призвела до зменшення міцності у всіх випробуваних інтервалах.

Випробування на витягування арматури. Випробування на витягування використовується для оцінки адгезії та зчеплення між арматурною сталлю та бетоном, що є фундаментальними факторами для забезпечення надійності та довговічності залізобетонних конструкцій. Цей метод випробувань важливий для перевірки якості виконання бетонних робіт, а також для забезпечення відповідності конструкції розрахунковим характеристикам.

Випробування полягає у прикладанні контрольованого навантаження до вбудованої в бетон арматури до моменту її витягування або зруйнування зчеплення. Випробування було здійснено в лабораторії на зразках, що відображають реальні умови будівельного об'єкта.

Коротко описати процедуру випробування можна наступним чином:

- Підготовка зразка: Арматурна сталевий стержень вбудовується в бетонний зразок на певну глибину, що відповідає проектним параметрам.
- Застосування навантаження: Використовуючи спеціалізоване обладнання, до арматури застосовується поступово зростаюче навантаження.
- Реєстрація даних: Фіксується сила, необхідна для подолання зчеплення між арматурою та бетоном, та відповідне зміщення арматури.

- Аналіз результатів: Оцінюється максимальна сила, яка була досягнута перед витягування або руйнування зчеплення. Для обчислення максимального зсувного напруження, яке досягалося перед тим, як матеріал або елемент конструкції зазнав руйнування зчеплення або витягування застосовуємо формулу (3.3):

$$\tau_{max} = \frac{F}{\pi d_b L_c}, \text{ Па} \quad (3.3)$$

де: F — сила або навантаження, що прикладається, Ньютони (N).

π — математична константа (приблизно 3.14159).

d_b — діаметр стрижня або проби, мм (12 мм)

L_c — довжина зчеплення або контактної зони, мм (60 мм)

Графік, зображений на рис. 3.10, що ілюструє взаємозв'язок зчеплення зі зміщенням, важливий для оцінки якості зчеплення між арматурою та бетоном. Максимальна напруга зчеплення (τ_{max}) вказує на силу, яка необхідна для початку зсуву арматури всередині бетонного зразка. Оскільки τ_{max} є схожим для всіх сумішей, це означає, що додавання заповнювачів з відходів руйнації не погіршує цю властивість бетону.

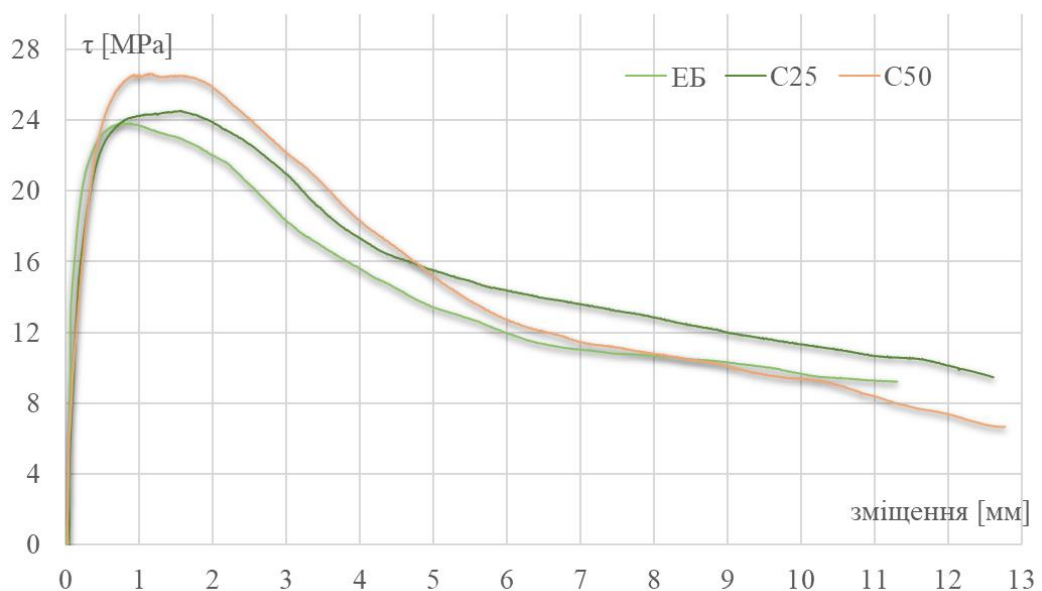


Рис. 3.10. Криві зчеплення-зсуву отримані в результаті тесту на висмикування

Режим руйнації визначається способом, яким зразок ламається під навантаженням. Режим "висмикування" означає, що арматура витягується з бетону, а не те, що бетон розтріскується чи кришиться навколо арматури. Схожість гілки кривої після піку для всіх зразків вказує на те, що додавання заповнювачів з відходів руйнації не впливає істотно на поведінку зразка після досягнення максимальної напруги зчеплення. Загальний аналіз цих результатів вказує на те, що використання заповнювачів з відходів руйнації не знижує якість зчеплення і є прийнятним для використання в реальних конструкціях.

3.3.3. Довговічні властивості бетону

Довговічність визначається як здатність бетону протистояти руйнуванню під впливом зовнішнього середовища. Основні механізми зношування бетонних конструкцій та фактори, що їх спричиняють, можуть виникати внаслідок фізичного впливу, такого як стирання, зовнішнє навантаження, горіння та цикли заморожування і відтавання, або у вигляді хімічного впливу, такого як лужна агрегатна реакція, сульфатна атака та корозія арматури. Довговічність бетону із додаванням заповнювачів з відходів руйнації може бути більш небезпечним в цих несприятливих умовах впливу через вищу проникність і нижчу межу міцності, ніж у звичайного бетону [78].

Бетон захищає вбудовану сталеву арматуру від корозії завдяки своїй високо-лужному складу. Рівень рН середовища в бетоні зазвичай перевищує 12,5, що викликає утворення пасивної плівки на поверхні сталеві арматури. Однак ця захисна плівка руйнується коли хлорид-іони, присутні в агресивних середовищах, таких як морська вода або сіль, що використовується для боротьби з обмерзанням, проникають в затверділий бетон і досягають поверхні арматурної сталі. Час проникнення, який є найбільш важливим параметром для корозії сталеві арматури та терміну служби залізобетонних конструкцій, залежить саме від часу проникнення хлоридів у бетон [291]. Саме тому постає необхідність у розрахунку коефіцієнта дифузії хлоридів.

Коефіцієнт дифузії хлоридів. Коефіцієнт дифузії хлоридів є важливим параметром для оцінки довговічності бетонних конструкцій, особливо у тих випадках, коли конструкції піддаються впливу агресивного середовища. Цей коефіцієнт визначає швидкість проникнення хлоридів через бетон і, відповідно, ризик корозії арматурного заліза в бетоні.

Одним із методів визначення коефіцієнту є колориметричний тест. Опис процесу тестування наступний:

- Підготовка зразків: використовують зразки бетону, до яких прикладається струм, щоб спричинити міграцію хлоридів (рис. 3.11). Тестування проводиться в серії, зазвичай з мінімум трьома зразками для надійності результатів.



Рис 3.11. Установка для тесту

- Експозиція та вимірювання: один зразок видаляється після визначеного періоду експозиції. Зразок розрізається навпіл для визначення глибини проникнення хлоридів. Поверхню зразка обробляють розчином нітрату срібла (AgNO_3), який вступає в реакцію з хлоридами, формуючи забарвлення або наліт.

- Аналіз результатів: після впливу сонячного світла на зразок, що оброблений AgNO_3 , відбувається візуально видима хімічна реакція, яку можна зафіксувати фотографічно. Потім необхідно виміряти глибину зміни кольору, що відображає глибину проникнення хлоридів (рис. 3.12).

- Розрахунки: використовуючи виміряну глибину проникнення хлоридів, розраховують коефіцієнт дифузії, формула 3.4. Цей коефіцієнт можна використати для прогнозування швидкості проникнення хлоридів в бетон в майбутньому.

$$D(mm) = K \left(\frac{mm}{h^{0.5}} \right) \times \sqrt{t(h)}, \text{ мм} \quad (3.4)$$

де: D - глибина проникнення речовини, вимірюється в міліметрах (мм).

K - константа, яка залежить від властивостей речовин, що взаємодіють, та умов процесу (наприклад, температури). Одиниці вимірювання цієї константи – міліметри на корінь квадратний з години (мм/г^{0,5}).

t (год) - час, протягом якого відбувається процес проникнення, вимірюється в годинах.



Рис 3.12. Зразок під час вимірювання

Для того, щоб зрозуміти вплив перероблених заповнювачів, результати з точки зору глибини хлоридів в залежності від часу представлені на рис. 3.13, для сумішей з табл. 3.4 з 0%, 25% та 50% перероблених заповнювачів.

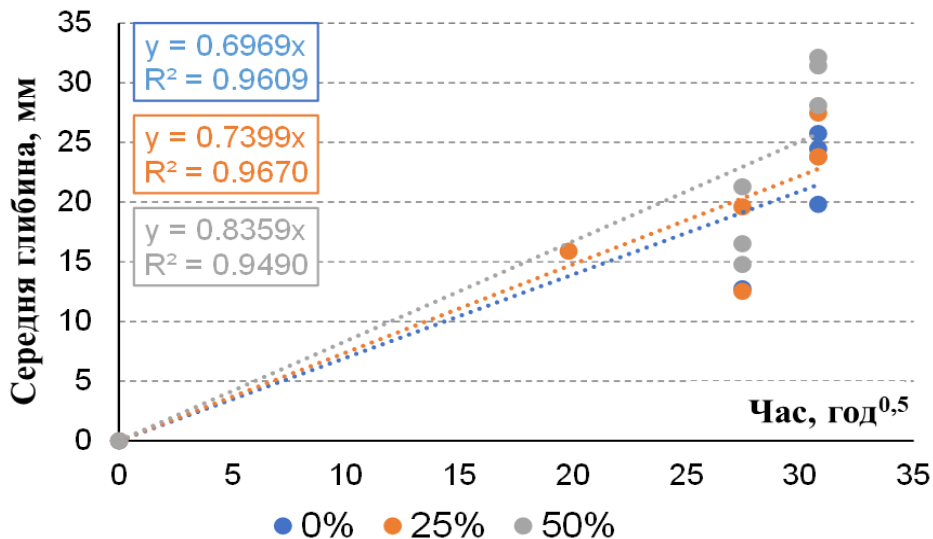


Рис. 3.13. Глибина залягання хлоридів у залежності від часу

Отримані результати показані в таблиці 3.4 демонструють, що значення K є вищими при більшому заміщенні переробленого заповнювача. Ці результати підтверджують тенденцію, що початковий час корозії скорочується при збільшенні коефіцієнта заміни перероблених заповнювачів через низькі показники цементно-заповнюваної перехідної зони бетону.

Таблиця 3.4

Значення коефіцієнта заміщення K для всіх сумішей

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

Еталонний бетон (ЕБ) має коефіцієнт K , рівний 0.837, що свідчить про середній рівень проникнення хлоридів. Варіант С25 показує трохи нижчий коефіцієнт (0.781), що може вказувати на кращу захищеність від хлоридів. Однак, мікс С50 має найвищий коефіцієнт K (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.

Експозиція та електрохімічні методи вимірювання зразків для дослідження корозії арматури. Для проведення випробувань корозійного стану, після 28 днів твердіння у воді, витягнуті зразки були піддані прискореній корозії, яка була розроблена для швидкої індукції та моделювання впливу корозії на вбудовану сталеву арматуру. Ця установка передбачала часткове занурення зразків у розчин, що містив 3% NaCl, і одночасне застосування електричного струму (150 мкА/см^2) для імітації ефектів, що надаються природною корозією, тим самим оцінюючи міцність і термін служби залізобетону.

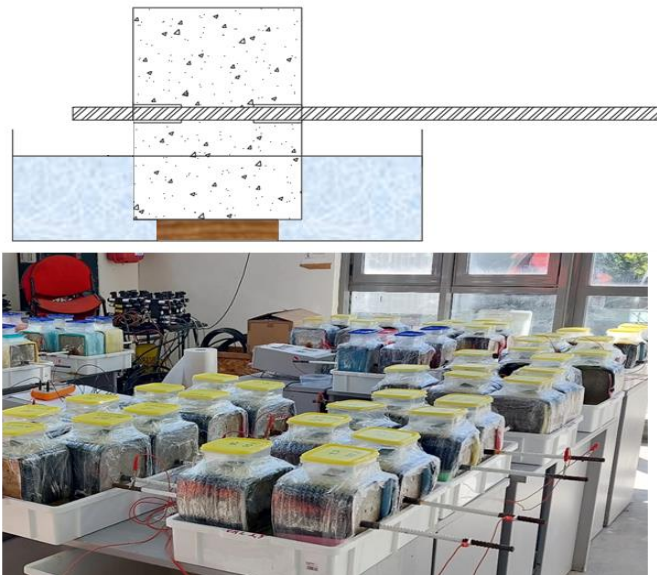


Рис. 3.14. Устаткування та зразки для корозійного експерименту

Під час випробування електричний струм вимірювався кілька разів на тиждень для кожного зразка, щоб оцінити корозію, виходячи з ефективного кумулятивного часу прикладання струму (рис. 3.14, зліва). Крім того, для кожного зразка проводили вимірювання потенціалу з використанням хлорсрібного електрода порівняння (Ag/AgCl) для моніторингу їх електрохімічної поведінки (рис. 3.15, справа). Коли виміряні значення потенціалу були меншими за -600 мВ

відносно електрода порівняння, проводили випробування на висмикування арматури для корозійних зразків. Це значення потенціалу було обрано як індикатор стану, в якому активні корозійні процеси стають більш вираженими.

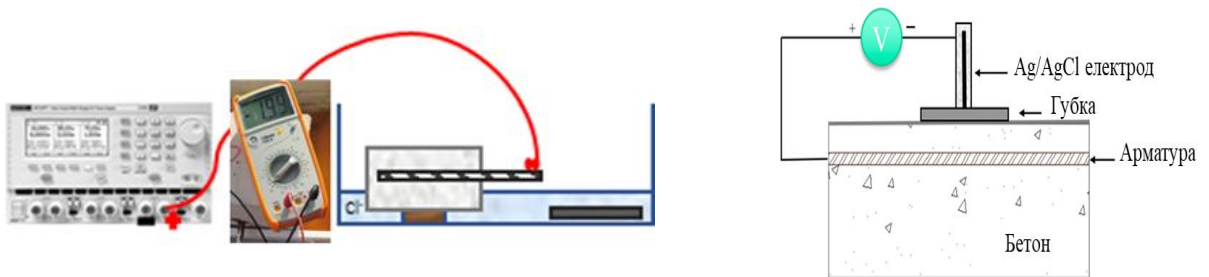


Рис. 3.15. Схеми для вимірювання електричного струму(зліва) і потенціалу(справа)

Коли потенціал зразка падає до цього рівня, це означає, що поверхневі реакції, які призводять до корозії, активно протікають, що робить його критичною точкою для початку детальних спостережень і вимірювань. Зібрані дані потенціалу, проаналізовані в поєднанні з фактором часу, дали детальне розуміння динаміки корозійних процесів для кожного матеріалу, що випробовувався.

На рисунку 3.16 показано зміни потенціалу корозії сталеві арматури протягом 200 днів для трьох типів бетонних сумішей (ЕБ - еталонний бетон без заповнювачів з відходів руйнації, Б25 - бетон з 25% заповнювачів з відходів руйнації, Б50 - бетон з 50% заповнювачів з відходів руйнації).

Вісь ординат показує потенціал у мілівольтах (mV) відносно електрода порівняння, а вісь абсцис відображає час у днях. Зазвичай, чим більш від'ємне значення $E_{согг}$, тим вищий ризик корозії матеріалу.

Отримані результати показали, що потенціали корозії досягали дуже від'ємних значень без значного збільшення густини корозійного струму, що буде описано далі.

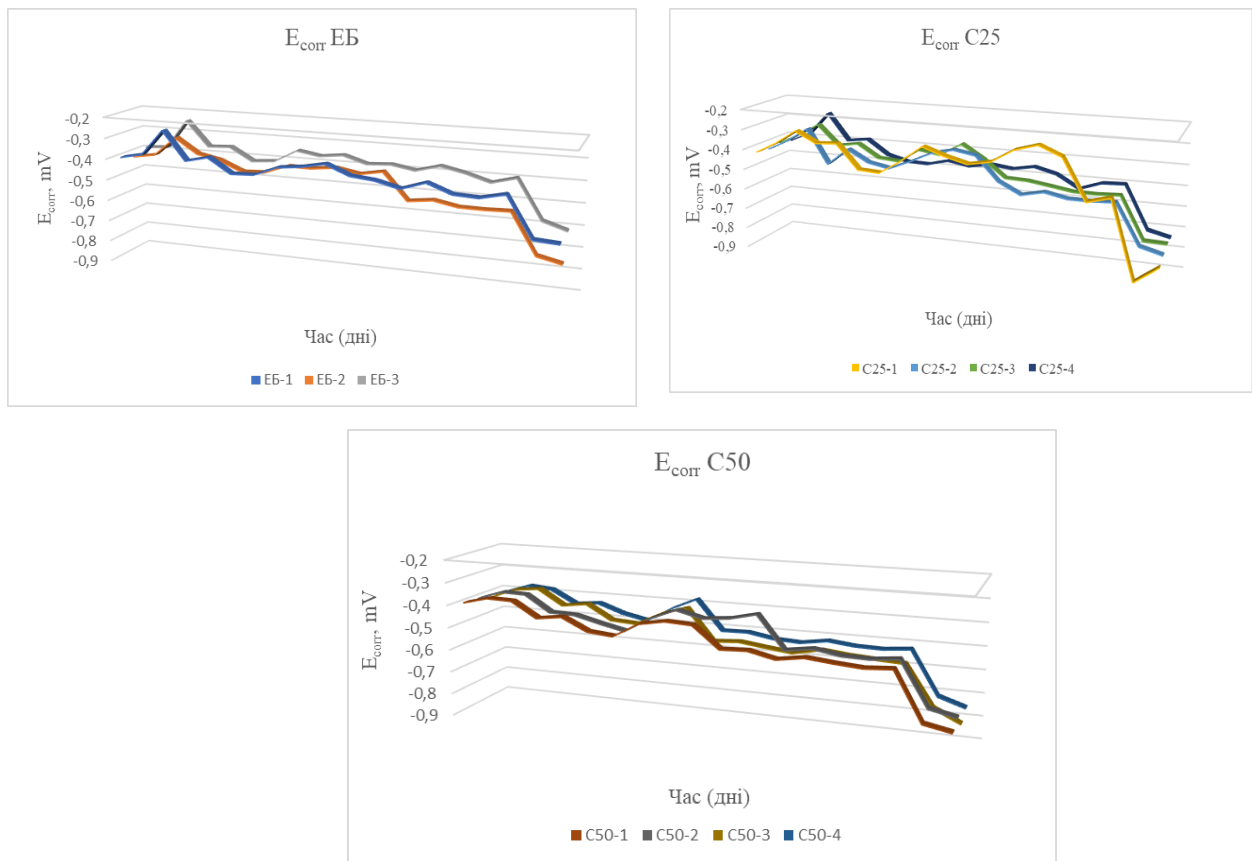


Рис 3.16. Графік зміни корозійного потенціалу (E_{corr}) в часі для різних зразків

Аналізуючи графік на рисунку 3.17 можна помітити, що густина корозійного струму коливається між зразками EB, C25 та C50. Це вказує на різницю у корозійній активності в залежності від типу бетону та заповнювачів, які в ньому використовуються. Відносно стабільні значення густини корозійного струму (I_{corr}) для зразків EB та C25 можуть свідчити про кращу корозійну стійкість у порівнянні із зразками C50, які демонструють більш високі та змінні значення I_{corr} .

Методика прискореної корозії дозволяє швидко оцінити корозійну стійкість залізобетону з різними типами заповнювачів шляхом моделювання ефектів природної корозії. Потенціал корозії нижче -600 мВ відносно хлорсрібного електрода є індикатором активних корозійних процесів на поверхні арматури та критичною точкою для початку детальних вимірювань. Зразки еталонного бетону (EB) та бетону з 25% заповнювачів з відходів руйнації (B25) показали відносно стабільні значення густини корозійного струму, що свідчить про їх кращу

корозійну стійкість у порівнянні з бетоном з 50% заповнювачів з відходів руйнації (Б50).

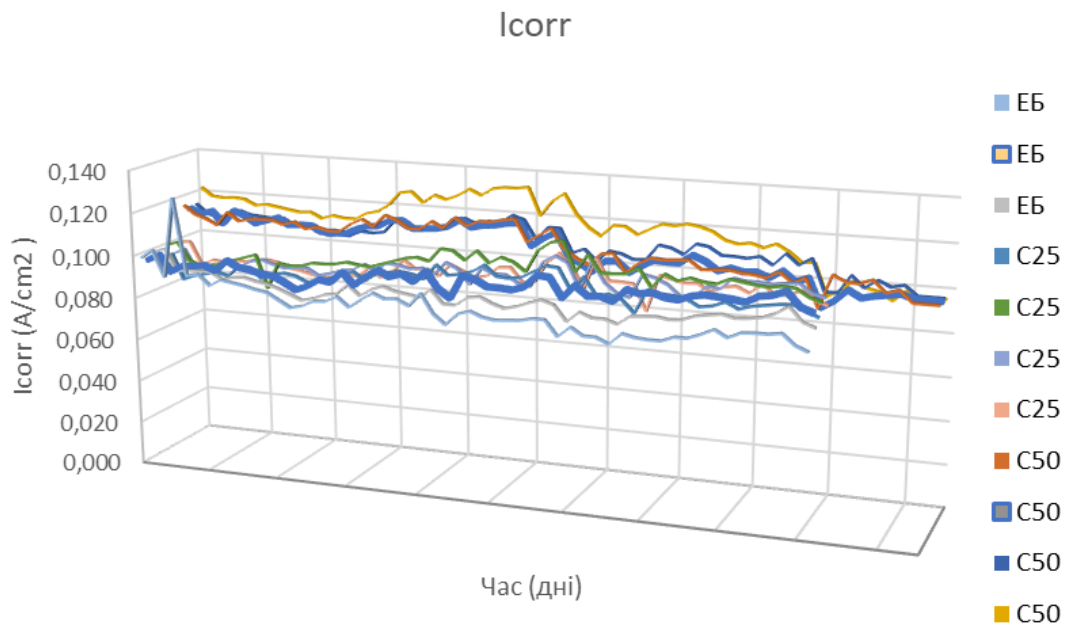


Рис. 3.17. Графік зміни густини корозійного струму (I_{corr}) в часі

Використання заповнювачів з відходів руйнації у кількості до 25% від об'єму крупного заповнювача не призводить до суттєвого зниження корозійної стійкості залізобетону, тоді як збільшення їх вмісту до 50% може підвищувати ризик корозії арматури. Для уточнення впливу заповнювачів з відходів руйнації на корозійну стійкість залізобетону необхідні подальші дослідження з використанням більшої кількості зразків, варіацією складу бетону та умов експозиції.

Випробування на витягування арматури, яка зазнала корозійного впливу. Випробування було здійснено в лабораторії на зразках, що піддалися впливу корозії. Перед проведенням випробування, зразки були знеструмлені та очищені від сольових відкладень. Залежність "зчеплення-зсуву" для корозійних зразків зображено на рисунку 3.18.

Корозія цих зразків, отримана шляхом вимірювання втрати маси арматури після випробувань, дорівнювала приблизно 6,5% (зі значеннями в діапазоні від 6,1% до 6,9%).

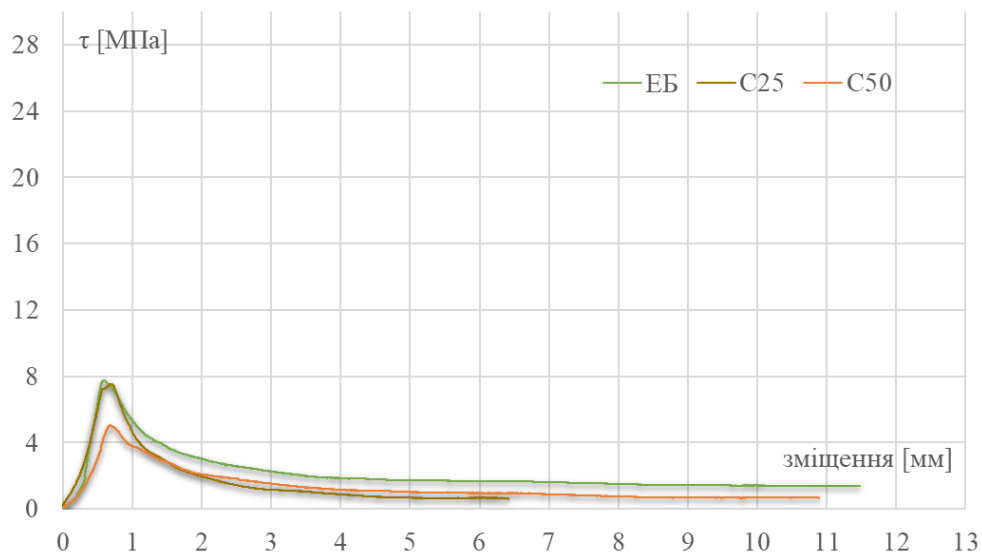


Рис. 3.18. Криві зчеплення-зсуву отримані в результаті тесту на висмикування підданих корозії зразків

Порівнюючи результати рисунка 3.12 (некородовані зразки) і рисунка 3.18 (корозійні зразки), можна констатувати значну зміну кривої зчеплення-ковзання. Корозійні зміни також впливають на режим руйнації, переходячи від витягування у випадку некородованих зразків до розщеплення у випадку корозії.



Рис. 3.19. Зразки після тесту

На фото, що зображені на рис. 3.19, можна побачити зразки після виконання тесту для кожної із груп міксів. Більш детально, корозія має значний негативний вплив на міцність зчеплення для всіх типів бетонних сумішей, причому суміш С50 зазнає найбільш значного зниження напруги зчеплення після корозії.

Отже, зниження міцності зчеплення в корозійних зразках підкреслює важливість врахування корозійної стійкості під час проектування бетонних конструкцій, особливо тоді, коли в конструкції використовується велика кількість переробленого бетону (ЗВР). Корозія може суттєво впливати на стійкість і довговічність таких конструкцій.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було досліджено властивості бетонів з використанням заповнювачів з відходів руйнації (ЗВР) у різних пропорціях (0%, 25% та 50% заміщення природного крупного заповнювача). Аналіз результатів експериментів дозволяє зробити наступні висновки:

Легковкладальність та щільність свіжого бетону є ключовими параметрами для якісного будівництва. Випробування осадки конуса (сламп-тест) показало, що рухливість бетонної суміші збільшується зі зростанням відсотка ЗВР: з 18 см для еталонного бетону до 21 см для бетону з 50% ЗВР, що вказує на покращення текучості та зручності укладання. В той же час, щільність свіжого бетону знижується з 2313 кг/м³ для еталонного бетону до 2262 кг/м³ для бетону з 50% ЗВР, що пов'язано з нижчою щільністю самих ЗВР.

Механічні властивості затверділого бетону, такі як міцність на згин та енергія руйнації, є важливими для оцінки довговічності та стійкості бетонних конструкцій. Результати показали, що використання ЗВР до 50% не призводить до суттєвого зниження міцності на згин: 4,0 МПа для еталонного бетону та 3,9 МПа для бетону з 50% ЗВР. Енергія руйнації бетону з 50% ЗВР (116 Нм) наближається до значення еталонного бетону (115 Нм), що свідчить про можливість ефективного

використання переробленого бетону без значної втрати здатності поглинати енергію деформації.

Міцність на стиск бетону із ЗВР залежить від часу тверднення та відсотка заміщення. На ранніх етапах (7 днів) бетон з 50% ЗВР має нижчу міцність (30 МПа) порівняно з еталонним бетоном (35 МПа). Проте, у віці 28 днів міцність бетону з 25% ЗВР (48 МПа) наближається до еталонного (50 МПа), що свідчить про зміцнення зв'язків між старим та новим цементним каменем з часом. Таким чином, оптимальний вміст ЗВР (до 25%) може покращувати характеристики бетону без компромісу з міцністю.

Випробування на висмикування арматури показали, що використання ЗВР не знижує якість зчеплення арматури з бетоном. Максимальні напруження зчеплення (τ_{\max}) та характер кривих "зчеплення-зміщення" для бетонів з 0%, 25% та 50% ЗВР є подібними, що свідчить про можливість застосування ЗВР у реальних залізобетонних конструкціях без ризику погіршення анкерування арматури.

Коефіцієнт дифузії хлоридів, який характеризує довговічність бетону в агресивних середовищах, зростає зі збільшенням вмісту ЗВР: з $0,837 \text{ мм/год}^{0,5}$ для еталонного бетону до $0,925 \text{ мм/год}^{0,5}$ для бетону з 50% ЗВР. Це вказує на те, що початковий час корозії арматури може скорочуватися при високих рівнях заміщення природного заповнювача на ЗВР через вищу пористість контактної зони між цементом і заповнювачем.

Прискорені корозійні випробування показали, що бетони з 25% ЗВР мають відносно стабільні значення густини корозійного струму (I_{corr}), подібні до еталонного бетону, що свідчить про їх задовільну корозійну стійкість. Проте, бетон з 50% ЗВР демонструє вищі та більш варіативні значення I_{corr} , що вказує на підвищений ризик корозії арматури та меншу придатність для використання в середовищах з високим вмістом хлоридів.

Таким чином, результати дослідження демонструють, що використання ЗВР у кількості до 25% може покращувати певні властивості бетону, такі як легковкладальність та здатність поглинати енергію руйнації, без суттєвого

зниження міцності та довговічності. Проте, при високих рівнях заміщення природного заповнювача (50% і більше) необхідно враховувати потенційні ризики, пов'язані з підвищеною пористістю та зниженою корозійною стійкістю бетону. Для оптимального використання ЗВР у бетонах необхідно ретельно підбирати їх склад, контролювати якість самих ЗВР та враховувати специфіку умов експлуатації конструкцій.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA) ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

4.1. Значення оцінки життєвого циклу (LCA) для сталого будівництва

Взаємопов'язані питання екологічної економіки та прагнення до сталого розвитку привертають широку увагу в усіх галузях та країнах, що підкреслюється дискусіями що розгортаються навколо екологічно сталого розвитку. Основою сталого розвитку є розумне використання ресурсів для задоволення потреб нинішнього і майбутніх поколінь, мінімізуючи при цьому деградацію навколишнього середовища, особливо в сфері будівництва [126].

Ця перспектива визнає значний вплив будівельного сектору на довкілля, який не лише споживає значну частину природних ресурсів та енергії, але й робить значний внесок у викиди парникових газів та різні форми забруднення протягом усього життєвого циклу будівлі. Будівництво має значний вплив на виснаження природних ресурсів та на викиди парникових газів в результаті спалювання викопного палива. У глобальному масштабі він виснажує 40% природних матеріалів, споживає 40% всієї первинної енергії, 15% світових ресурсів прісної води, генерує 25% усіх відходів і викидає 40-50% парникових газів [297]. Оскільки будівельна галузь є передовою щодо впливу на навколишнє середовище, особлива увага приділяється практикам сталого будівництва, підкреслюючи важливість вибору матеріалів, які не тільки відповідають технічним характеристикам, але й узгоджуються з цілями екологічної стійкості шляхом мінімізації викидів парникових газів [181].

Щоб мінімізувати вплив галузі на навколишнє середовище, використання стійких будівельних матеріалів стало основним напрямком досліджень і розробок у досягненні мети сталого будівництва. Це один із способів, за допомогою якого

будівельна галузь може зробити відповідальний внесок у захист навколишнього середовища [152]. Досягнення мети сталого будівництва полягає не в обмеженні загального обсягу будівництва, а в тому, щоб приділяти більше уваги на те, як проектування та вибір сталих будівельних матеріалів може доповнити навколишнє середовище для покращення якості життя, здоров'я та комфорту користувачів. Вибір екологічно чистих будівельних матеріалів повинен бути зосереджений не тільки на експлуатаційних характеристиках, але й обирати матеріали, які мають найнижчий рівень викидів парникових газів [220].

Екологічне проектування будівель характеризується використанням природних матеріалів, а не штучних, які потребують енергії в процесі виробництва, і має акцент на здорових, нетоксичних матеріалах, які мінімізують забруднення навколишнього середовища, специфікаціях, які мінімізують забруднення [201]. В ідеалі матеріали також повинні бути впроваджені в пасивний дизайн і контроль навколишнього середовища. Berge B. [123] стверджує, що прийнятною метою досягнення сталого майбутнього є радикальне скорочення та зміна використання сировини. Це особливо важливо, коли йдеться про дефіцитні та невідновлювані ресурси.

Не менш важливим є зменшення відходів і втрат під час виробництва матеріалів, процесу будівництва, а також протягом усього терміну служби завершеної будівлі. Переробка матеріалів під час знесення будівлі також повинна стати регульованою. Процес утилізації повинен бути ретельно спланований і керований, щоб гарантувати, що ці матеріалами можливо переробити, зберігаючи їхню первісну якість, а не утилізувати [344].

Ця всебічна дискусія створює основу для вивчення впливу будівельних матеріалів на навколишнє середовище та ключової ролі екологічно чистих матеріалів у досягненні сталості будівництва. Вона представляє оцінку життєвого циклу [222] (LCA, Life Cycle Assessment) як методологічну основу для аналізу впливу будівельних матеріалів на навколишнє середовище від колиски до могили, пропонуючи розуміння видобутку ресурсів, виробництва, транспортування та

етапів завершення життєвого циклу. LCA став важливим інструментом для вибору екологічно чистих будівельних матеріалів, надаючи детальний звіт про їхній вплив на навколишнє середовище, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень, які відповідають цілям сталого розвитку.

Численні дослідники приділяли увагу питанням оцінки впливу на довкілля перероблених бетонних заповнювачів та процесів їх отримання. Одним з основних підходів для кількісного аналізу екологічних наслідків є методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment «LCA») [222]. Основа аналізу життєвого циклу продукції зображено на рисунку 4.1. Дана методологія надає можливість всебічно проаналізувати впливи продукту чи процесу на навколишнє середовище впродовж усього періоду - починаючи з добування сировини до кінцевої утилізації. За допомогою LCA оцінюються такі етапи, як видобуток ресурсів, виробництво, транспортування, використання та подальша переробка після закінчення терміну придатності. Аналізуються викиди в атмосферу, скиди у водойми, утворення відходів, а також споживання енергії і водних ресурсів.

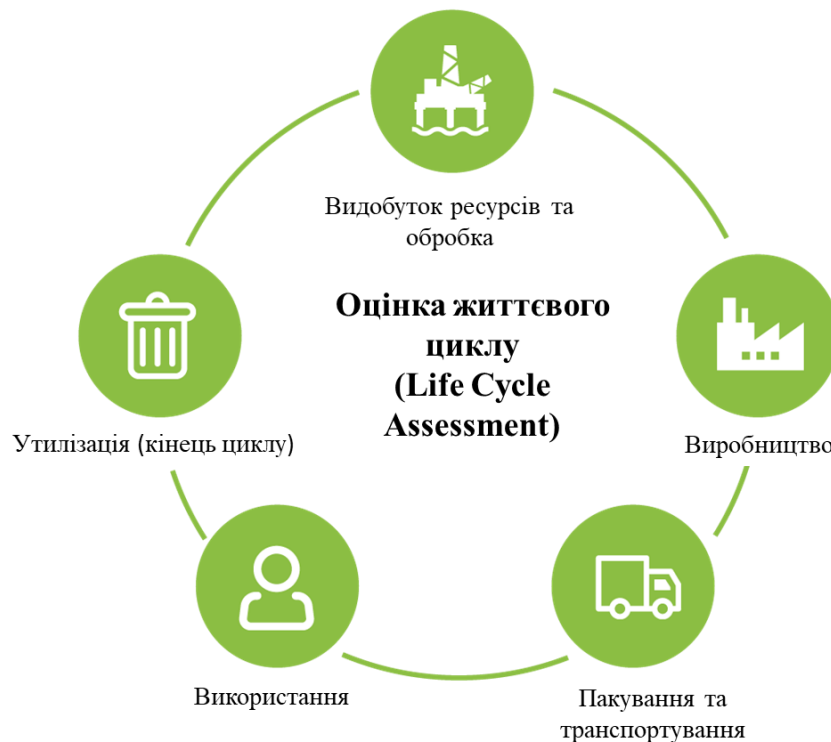


Рис. 4.1. Основа аналізу життєвого циклу продукції LCA [278]

У роботі Кноері та співавторів [239] представлено порівняльний аналіз LCA для бетону з переробленими матеріалами і традиційного бетону, що застосовуються у будівельних конструкціях. Здійснено оцінку впливу на довкілля з огляду на різні типи цементу та склад заповнювачів. Продемонстровано, що суміші з переробленим бетоном мають істотні переваги для довкілля, включно з приблизно на 30% меншим негативним ефектом за показниками Ecoindicator 99 та екологічного дефіциту. Проте результати щодо потенціалу глобального потепління є більш неоднозначними та залежать від подальших вимог до вмісту цементу для такого бетону. Дослідження акцентує на потенціалі використання переробленого бетону для зменшення екологічного впливу за умови ефективного регулювання споживання цементу та транспортування.

У роботі Серра та співавторів [316] міститься екологічна оцінка бетону з переробленими заповнювачами за допомогою методики оцінки життєвого циклу. Метою дослідження є кількісне визначення впливів на навколишнє середовище бетонних сумішей з відходів, а також порівняння екологічних характеристик природного, із заповнювачами з відходів рециклінгу та змішаного бетону з однаковими міцнісними показниками. У ньому підкреслюються переваги використання матеріалів з відходів рециклінгу, такі як зменшення несприятливого впливу порівняно з традиційним бетоном, попри додаткові операції на кшталт подрібнення. Результати оцінювання за стандартами EN 15804 та NF P 01-010 показують, що використання перероблених заповнювачів дозволяє зменшити потенціал глобального потепління на 20-30%, виснаження абіотичних ресурсів - на 15-25%, споживання первинної енергії - на 10-20% порівняно з бетоном на природних заповнювачах. Це підтверджує екологічні переваги застосування перероблених матеріалів у бетоні з точки зору сталого розвитку.

У публікації Коланджело та співавторів [137] представлена комплексна оцінка життєвого циклу бетону з переробленими заповнювачами, підкреслюючи перспективи розвитку циркулярної економіки в Європі. В ній здійснено оцінку впливу на навколишнє середовище бетону, виготовленого з різною часткою

перероблених заповнювачів, та досліджено потенціал геополімерних сумішей як альтернативи традиційному бетону. Дослідження показало, що бетон з 25% перероблених заповнювачів забезпечує найкращі екологічні результати, підкреслюючи значні переваги використання перероблених матеріалів у будівництві для підтримки сталого розвитку та скорочення викидів. Робиться висновок про важливість просування практик циркулярної економіки у будівельному секторі для пом'якшення негативного впливу та сприяння ресурсоефективності.

За результатами наведених досліджень з використанням методології оцінки життєвого циклу, бетонні суміші з вмістом перероблених заповнювачів (зокрема на рівні 25%) демонструють в цілому кращу екологічну ефективність та менші негативні впливи на довкілля порівняно з традиційним бетоном. Це підкреслює потенціал рециклінгу будівельних матеріалів як важливого напрямку розвитку ресурсозберігаючої циркулярної економіки, а також необхідність оптимізації комплексного регулювання і технологій переробки для реалізації цього потенціалу з метою зниження негативного впливу будівництва на довкілля та переходу до моделі сталого розвитку.

На будівлі припадає значна кількість споживання матеріалів та енергії. Однак екологічні властивості матеріалів традиційно не були пріоритетом при проектуванні чи будівництві [195, 119], де вартість, експлуатаційні характеристики та естетика є основними пунктами, що визначають вибір матеріалів для будівель. Florez і Castro-Lacouture [181] у дослідженні з розробки оптимізаційної моделі для вибору екологічних матеріалів стверджують, що вибір матеріалів може відбуватися на етапі техніко-економічного обґрунтування, коли різні технологічні рішення та екологічні питання можуть бути включені на ранніх стадіях процесу прийняття рішень. У більшості проектів вибір матеріалів відбувається на етапі розробки дизайну, коли складаються специфікації та робочі плани. Дійсно, вибір відповідних матеріалів для будівлі є невід'ємною частиною якісного проектування, а ключ до якісного проектування полягає в усвідомленні важливості здоров'я і комфорту

мешканців та гармонізації його з властивими властивостями матеріалів.

Отже, оцінка властивостей екологічних будівельних матеріалів та їхнього впливу на навколишнє середовище стає центральним питанням у проектуванні та будівництві зелених будівель. Як зазначає Стерджес [331], дизайнери поступово звертають більше уваги на вибір матеріалів і розглядають його як важливу частину проектування. Однак, на етапі проектування може бути або занадто багато роботи, або занадто пізно розглядати варіанти сталості будівельних матеріалів, тоді як більше можливостей може існувати, якщо розглядати сталість будівельних матеріалів на ранніх стадіях життєвого циклу будівлі.

Були розроблені методології та інструменти [222] для оптимізації вибору матеріалів у ситуаціях, коли необхідна найкраща комбінація фізичних і механічних властивостей, що полегшує проектувальникам прийняття об'єктивних рішень щодо вибору матеріалів пропонує використовувати ті ж принципи для оптимізації вибору матеріалів, беручи до уваги екологічність і зосереджуючись на досягненні поставлених цілей сталого розвитку, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище. Ця методологічна база зазвичай використовує підхід життєвого циклу при виборі сталих будівельних матеріалів. Ці інструменти обмежені у використанні через складну природу сталості в будівництві та екологічні характеристики більшості матеріалів, які тісно пов'язані з джерелами постачання та поведінням з ресурсами, способом їхнього використання, а також ретельністю, з якою вони використовуються та обслуговуються. Екологічні характеристики сталих матеріалів здебільшого недоступні або неповні, і це особливо актуально для країн, що розвиваються.

На додаток до розгляду екологічних питань при виборі матеріалів у будівництві, Abeysundra та ін. [106] пропонують, щоб підхід LCA для вибору стійких матеріалів також враховував економічні та соціальні фактори. Вони розробили оціночну матрицю, щоб допомогти особам, які приймають рішення, у виборі стійких матеріалів, збалансувавши при цьому екологічні, економічні та соціальні фактори в оцінці. Anastaselos та ін.[114] підтримують цю точку зору в

оцінці рішень з теплоізоляції, що включає екологічні, економічні та соціальні аспекти. Florez і Castro-Lacouture [181] також припускають, що фактори, які слід враховувати при виборі екологічного матеріалу, не повинні обмежуватися економічними, екологічними та соціальними аспектами, а включати інші суб'єктивні фактори, такі як метафізичні та культурні аспекти. Вони розробили оптимізаційну модель, яка інтегрує як об'єктивні, так і суб'єктивні фактори в процесі оцінювання вибору екологічно безпечних матеріалів.

З розширенням сфери застосування сталого вибору матеріалів процес оцінювання тепер рухається в напрямку повної інтеграції всіх аспектів, що виникають протягом життя будівлі та її елементів [114]. Вибір екологічного матеріалу, безумовно, є багатокритеріальним питанням. Однак, оскільки не існує загальноприйнятого визначення сталого будівельного матеріалу, не існує і чіткої філософії, яка б точно формулювала критерії сталості матеріалів. Есін [168] та Франзоні [185] стверджують, що сталі будівельні матеріали - це матеріали, пов'язані з ресурсо- та енергоефективністю в процесі виробництва, і що ці матеріали повинні менше забруднювати навколишнє середовище та не мати негативного впливу на здоров'я людини.

Стає очевидним, що екологічні будівельні матеріали пов'язані з наступними критеріями:

- ресурсоефективність;
- енергоефективність (включаючи початкову та повторну втілену енергію та викиди парникових газів);
- запобігання забрудненню (включаючи якість повітря в приміщенні).

Ресурсоефективність - це використання обмежених ресурсів у найбільш ефективний та результативний спосіб, не обмежуючи при цьому економічне зростання суспільства. Дослідження показують, що певні ресурси стають надзвичайно рідкісними. Тому до використання решти запасів слід ставитися з обережністю, особливо якщо відомо, що вони підтримують середовища існування, які перебувають під загрозою зникнення, або якщо відомо, що ці ресурси

використовуються в першу чергу [201]. Більшість з цих рідкісних матеріалів можна замінити іншими менш рідкісними або відновлюваними матеріалами, якщо вони ретельно сплановані і спроектовані на ранній стадії [123]. Сталі будівельні матеріали також повинні бути спроектовані та виготовлені таким чином, щоб вони були довговічними, а також потребували мінімального обслуговування протягом усього терміну експлуатації. Це досягається або шляхом проектування з урахуванням довговічності, або шляхом реконструкції існуючих будівельних матеріалів для подовження терміну їх служби. Існує багато інформації про деталізацію для підвищення довговічності, але матеріали і компоненти повинні мати цінність для повторного використання, і це може зробити акцент на специфікаціях для високоякісних матеріалів в першу чергу. Дослідники вважають [168], що ресурси, які використовуються для виробництва будівельних матеріалів, повинні бути місцевими, щоб заощадити енергію і пов'язані з цим викиди від транспортування цих матеріалів до місця реалізації проекту. Екологічні будівельні матеріали повинні бути придатними для багаторазового використання або переробки, щоб їх можна було легко демонтувати після закінчення терміну експлуатації. Гао та інші [188] стверджують, що виробництво будівельних матеріалів, які містять вторинну сировину, є важливим з точки зору збереження природних ресурсів та економії втіленої енергії. Однак, якщо переробка сприяє додатковому забрудненню, якого можна було б уникнути, її слід уникати.

Енергоефективність є ще одним важливим фактором для екологічних будівельних матеріалів. Виробництво та використання енергії стає дедалі більшим джерелом екологічного занепокоєння, а дослідження показали, що виробництво енергії тісно пов'язане з деградацією довкілля [203]. Широке використання викопного палива певною мірою призвело до забруднення атмосфери. Однак підвищення енергоефективності будівлі само по собі може не призвести до максимального потенційного скорочення енергоспоживання, оскільки значна частина енергії затримується у видобутку та виробництві будівельних матеріалів. Використання енергії у виробництві будівельних матеріалів часто пов'язане з

уречовленою енергією, закладеною у видобутку сировини та виробництві будівельних матеріалів, а також з енергією на будівництві та транспортуванням на місці. Енергоємність будівельних матеріалів варіюється від регіону до регіону та від заводу до заводу залежно від джерел енергії, використання технологій та виробничого процесу. Втілена енергія будівельних матеріалів включає початкову та повторну втілену енергію. Початкова втілена енергія пов'язана з будівельними матеріалами, що використовуються для будівництва, тоді як повторна втілена енергія необхідна на етапі експлуатації. Це енергія, яка використовується для виробництва матеріалів для заміни, ремонту та технічного обслуговування протягом ефективного терміну служби будівлі. Вона вимірюється протягом економічного життя будівлі після заселення. Як початкова, так і поточна втілена енергія відіграють важливу роль в енергоефективності будівельних матеріалів на основі підходу життєвого циклу. За даними Huberman та Pearlmutter [217], втілена енергія становить від 10 до 60% загальної енергії, використаної протягом терміну експлуатації будівлі. Трелоар та ін. [346] стверджують, що уречовлена енергія є важливою, оскільки вона виникає негайно, а загальна енергія, спожита у виробництві будівельних матеріалів, може дорівнювати протягом життєвого циклу будівлі тимчасовим потребам в енергії для експлуатації. Повна ідентифікація природи та змісту втіленої енергоємності дозволить проектувальникам та виробникам будівельних матеріалів вдосконалити виробничі процеси з метою мінімізації споживання енергії.

У наш час люди проводять понад 90% свого часу в приміщенні, і тому умови в приміщенні мають важливий вплив на здоров'я, самопочуття та працездатність користувачів [186]. Дослідження підтверджують, що будівельні матеріали відіграють важливу роль у визначенні якості повітря в приміщенні. Викиди летких органічних сполук, таких як формальдегід, з будівельних матеріалів вважаються серйозною проблемою, що впливає на здоров'я, комфорт і продуктивність праці людини [186]. Тому стійкі будівельні матеріали - це матеріали, які не мають негативних наслідків для побутового та природного середовища. Матеріали, які

містять втілене забруднення, можуть впливати протягом усього терміну служби на працівників під час виробничого процесу, на мешканців будівлі через виділення газів або вилуговування під час використання, а також забруднювати навколишнє середовище під час переробки або утилізації. Слід використовувати матеріали з низьким вмістом або відсутністю канцерогенів, репродуктивних токсинів або подразників.

Сталі будівельні матеріали – це вибір матеріалів, виготовлених за допомогою ресурсоефективних процесів, таких як вибір матеріалів з низьким вмістом втіленої енергії, використання місцевих та відновлюваних джерел енергії, а також вибір матеріалів, які сприяють зменшенню викидів парникових газів в атмосферу. Широко використовувані будівельні матеріали, такі як сталь, бетон і алюміній, споживають енергію і виділяють CO₂ в процесі виробництва. Тому дослідження виробництва нових матеріалів, методів виготовлення, переробки будівельних матеріалів та використання матеріалів з низьким вмістом втіленої енергії стали надзвичайно важливими. Крім того, вдосконалюються техніки і технології, що дозволяють мінімізувати і зберігати природні ресурси в будівлях.

Мінімізація та збереження ресурсів вважаються важливими аспектами в будівельній галузі. Розглядаючи важливість сталих будівельних матеріалів у проектуванні та будівництві зелених будівель, Берге [123] пропонує переходити до експлуатації менших родовищ сировини. Це пов'язано з тим, що дрібномасштабна експлуатація часто сприяє меншій шкоді навколишньому середовищу. Халлідей [201] пропонує використовувати підхід "5R" для вирішення питань, пов'язаних з ресурсозбереженням, а саме: відмова, скорочення, повторне використання, переробка та ремонт (refuse, reduce, reuse, recycle and repair).

Відмова - це встановлення правил щодо того, які матеріали є прийнятними, а які ні, у будівлях. У 2003 році Європейська Комісія випустила інтегровану політику щодо продуктів для визначення продуктів у будівельному секторі, які мають найбільший потенціал впливу на навколишнє середовище впродовж життя. інтегрована політика призвела до розробки екологічних декларацій на

продукцію (EPD) для інформування про екологічні характеристики матеріалів з точки зору життєвого циклу. EPD визнається програмою USGBC LEED і заохочується Європейським Союзом.

Повторне використання будівельних матеріалів вирішує серйозну проблему ресурсів. Зменшення пов'язане зі скороченням використання ресурсів, простору або елементів. Це не повинно зашкодити гарному дизайнерському рішенню, наприклад, зменшенню кількості механічних послуг. Це передбачає адаптацію існуючих будівель замість знесення та повторне використання врятованих матеріалів для мінімізації споживання сировини. Повторне використання матеріалів передбачає розгляд матеріалу і методів з'єднання таким чином, щоб уможливити повторне використання і заміну компонентів, як частин, так і цілих. Тормарк [344] дослідив вплив на навколишнє середовище повторно використаних будівельних матеріалів і компонентів односімейного будинку і дійшов висновку, що вплив на навколишнє середовище склав близько 55% від впливу, який був би спричинений, якби всі матеріали були отримані з нових джерел. Якщо повторне використання компонента є неможливим, його можна переробити повністю або частково. Прикладом може слугувати бетон, який подрібнюють на заповнювачі для дорожньої основи. Сагафі і Тешнізі [310] стверджують, що переробка є ефективною стратегією зменшення впливу на навколишнє середовище в будівельній галузі, оскільки вона допоможе замкнути матеріальний цикл. Вони розробили метод оцінки енергозбереження як фактора для оцінки потенційних переваг переробки будівельних матеріалів. Це мало допомогти дизайнерам і підрядникам, які могли б порівнювати та обирати екологічні матеріали. Нарешті, відновлення - це стратегія, спрямована на зменшення марнотратного способу життя шляхом капітального ремонту та реконструкції для подовження терміну експлуатації.

Екологічні будівельні матеріали відіграють важливу роль в екологічних характеристиках будівлі та впливають на будівлю на різних етапах її життєвого циклу. Тому аналіз і вибір екологічних будівельних матеріалів також ґрунтується на оцінці життєвого циклу (LCA). LCA має довгу історію і використовується для

вирішення проблем, починаючи від надмірного споживання глобальних ресурсів, як з точки зору будівництва, так і експлуатації будівель, і закінчуючи забрудненням навколишнього середовища [126]. Сталість є важливим фактором у будівництві, і концепція сталості в цій сфері полягає у створенні та підтримці здорового будівельного середовища. У той же час, сталий розвиток також передбачає зосередження на мінімізації споживання ресурсів та енергії, тим самим зменшуючи шкоду, заподіяну навколишньому середовищу. Існує велика кількість інструментів для екологічної оцінки антропогенного середовища [123], починаючи від вибору будівельних матеріалів, енергетичного маркування та якості повітря в приміщеннях, закінчуючи оцінкою всієї будівлі, а потім оцінкою антропогенного середовища в міському масштабі. Форсберг і фон Мальмборг [184] загалом класифікують сучасні інструменти оцінки стану забудованого середовища на дві групи: якісні системи оцінювання будівель та кількісні інструменти, що використовують підхід фізичного життєвого циклу з кількісними вхідними та вихідними даними про потоки матеріалів та енергії. В обох групах існує велика кількість різноманітних концепцій у всьому світі. Найбільш прийнятним і визнаним методом, що використовується для комплексної оцінки впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з будівлею та будівельними матеріалами, є LCA [106].

LCA - це методологія, яка використовується для аналізу складних процесів, зосереджуючись на вхідних і вихідних потоках матеріалів, енергії та забруднюючих речовин у навколишнє середовище та з нього з точки зору життєвого циклу [287]. Цей аналіз найкраще визначити як системний підхід до оцінки екологічного навантаження, пов'язаного з продуктом, процесом або діяльністю, шляхом визначення та кількісної оцінки використаної енергії та матеріалів, а також відходів, що викидаються в навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу, від "колиски до могили" [238]. Таким чином, основними завданнями оцінки життєвого циклу є кількісно виміряти та оцінити екологічні характеристики продукту або процесу, допомагаючи особам, які приймають

рішення, зробити вибір між альтернативами. -

Забезпечити основу для оцінки потенційного поліпшення екологічних показників системи з метою модифікації або проектування системи та зменшення її загального впливу на довкілля. Це може бути зроблено в загальному сенсі або цілеспрямовано для поліпшення конкретних етапів протягом життєвого циклу.

Ідея LCA виникла в Європі та США наприкінці 1960-х - на початку 1970-х років. Лише наприкінці 1980-х - на початку 1990-х років у відповідь на зростання екологічної свідомості та занепокоєння щодо використання енергії, LCA привернула до себе більшу увагу [117]. Виникла потреба у більш досконалому підході до аналізу складних екологічних проблем. LCA виникає на основі аналізу чистої енергії для прогнозування майбутніх поставок сировини та енергоресурсів з використанням підходу життєвого циклу. Спочатку основна увага приділялася енергоспоживанню та ефективності, без урахування викидів відходів, пов'язаних з енергетикою [117]. Однак з початку 1970-х років відходи та викиди від виробничих процесів почали враховуватися [179].

Методологія LCA спочатку була розроблена Товариством екологічної токсикології та хімії SETAC [317] з метою вдосконалення науки, практики та застосування зменшення споживання ресурсів та екологічного навантаження, пов'язаного з продуктом, упаковкою, процесом або діяльністю. Крім того, він дає змогу ідентифікувати та кількісно оцінити використані енергію та матеріали, а також відходи, що потрапляють у довкілля протягом усього життєвого циклу [238].

На початку 1990-х років занепокоєння щодо неналежного представлення результатів LCA виробниками продукції спонукало SETAC розробити стандартну методологію для проведення досліджень LCA. У 1997 році Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) опублікувала перший стандарт ISO 14040. Серія стандартів ISO 14040, переглянута у 2006 році, містить стандартизовані настанови та принципи методології оцінки життєвого циклу [287]. Ці стандарти, включаючи ISO 14040 та ISO 14044, регулюють принципи, основи, вимоги та настанови щодо проведення досліджень з оцінки життєвого циклу (ISO, 2006a та b). Дотримуючись

підходу ISO, викладеного в цих стандартах, можна стандартизувати та узагальнити результати досліджень життєвого циклу та інвентаризації життєвого циклу.

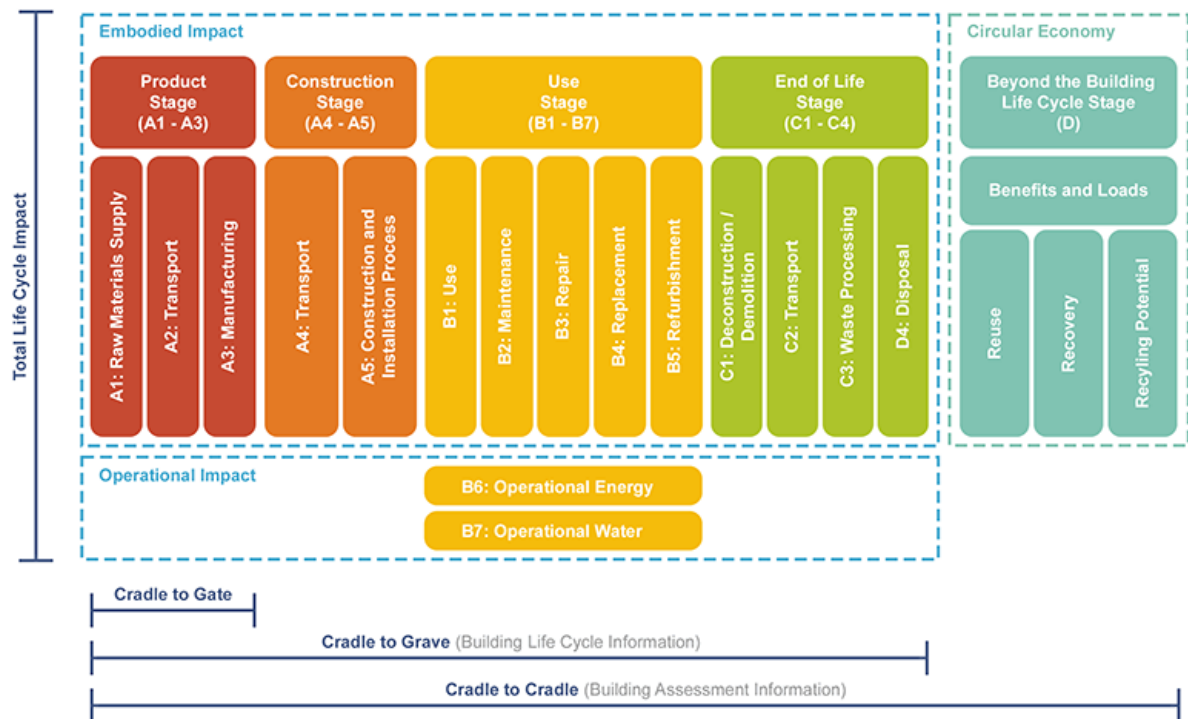


Рис. 4.2. Комплексна діаграма впливу життєвого циклу будівлі, що включає концепції "від колиски до воріт", "від колиски до могили" та "від колиски до колиски" [128]

Основні цілі LCA, згідно зі стандартом ISO, включають визнання можливостей поліпшення екологічних характеристик продукції на різних етапах її життєвого циклу, допомогу в прийнятті рішень щодо стратегічного планування, визначення пріоритетів, проектування або перепроєктування продукції, вибір відповідних показників екологічних характеристик і розробку методів вимірювання, а також сприяння маркетинговим зусиллям, таким як екологічні вимоги, схеми екологічного маркування або декларації про екологічну чистоту продукції.

На рисунку 4.2 представлено комплексну діаграму, яка відображає вплив будівлі протягом її життєвого циклу, включаючи концепції "від колиски до воріт", "від колиски до могили" та "від колиски до колиски". Розглянемо детальніше різні

компоненти цієї діаграми.

Втілений вплив. Втілений вплив стосується загального впливу життєвого циклу будівлі на етапах виробництва (A1-A3) та будівництва (A4-A5). Етап виробництва включає постачання сировини (A1), транспортування до виробництва (A2) та саме виробництво будівельних матеріалів і конструкцій (A3). На цьому етапі відбувається видобуток природних ресурсів, їх обробка та перетворення на готові будівельні продукти. Видобуток сировини, особливо вибухові роботи в кар'єрах, супроводжується значними викидами парникових газів, пилу та шкідливих речовин, що негативно впливає на якість атмосферного повітря та сприяє глобальному потеплінню.

Етап будівництва охоплює транспортування матеріалів і конструкцій до будівельного майданчика (A4) та їх встановлення або монтаж (A5). Під час транспортування відбуваються викиди парникових газів та інших забруднюючих речовин від роботи транспортних засобів. Процес будівництва також пов'язаний з використанням енергії, води та утворенням будівельних відходів.

Операційний вплив. Операційний вплив відбувається на етапі використання будівлі (B1-B7) і включає її технічне обслуговування (B2), ремонт (B3), заміну окремих елементів (B4), реконструкцію (B5), а також експлуатаційні витрати енергії (B6) і води (B7). Протягом життєвого циклу будівлі виникає потреба в періодичному обслуговуванні та ремонті для підтримання її функціональності та естетичного вигляду. Це може включати фарбування, заміну покрівельних матеріалів, ремонт інженерних систем тощо. Особливу увагу слід приділити енергоспоживанню будівлі (B6), яке часто є найбільш значним фактором операційного впливу. Використання енергії для опалення, охолодження, освітлення та роботи обладнання призводить до викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин. Тому енергоефективність будівлі та використання відновлюваних джерел енергії є ключовими стратегіями зменшення операційного впливу.

Етап закінчення терміну експлуатації. Етап закінчення терміну експлуатації

(C1-C4) розглядає впливи будівлі наприкінці її життєвого циклу, включаючи деконструкцію та знесення (C1), транспортування відходів (C2), переробку (C3) та остаточну утилізацію (C4). Процес знесення будівлі пов'язаний з утворенням значної кількості будівельних відходів, які потребують належного поводження. Роздільний збір та переробка відходів дозволяють зменшити їх негативний вплив на довкілля та повернути цінні матеріали у виробничий цикл. Частина будівельних відходів, яка не підлягає переробці, потрапляє на звалища або спалюється, що призводить до емісії парникових газів та забруднення ґрунтів і водойм. Тому важливо максимально збільшувати частку перероблених відходів та використовувати їх як вторинну сировину для виробництва нових будівельних матеріалів [123].

Концепції оцінки життєвого циклу. На діаграмі виділено три основні концепції оцінки життєвого циклу будівлі: "від колиски до воріт", "від колиски до могили" та "від колиски до колиски".

Концепція "від колиски до воріт" (Cradle to Gate) охоплює етапи від видобутку сировини до виходу готового продукту з воріт виробничого підприємства. Ця концепція дозволяє оцінити вплив будівельних матеріалів та конструкцій до моменту їх доставки на будівельний майданчик, не враховуючи подальші етапи життєвого циклу. Концепція "від колиски до могили" (Cradle to Grave) розширює межі аналізу і включає всі етапи життєвого циклу будівлі, від видобутку сировини до остаточної утилізації відходів. Ця концепція дає змогу комплексно оцінити сумарний вплив будівлі на довкілля протягом усього періоду її існування. Концепція "від колиски до колиски" (Cradle to Cradle) є найбільш прогресивною і відповідає принципам циркулярної економіки. Вона передбачає повну реінтеграцію матеріалів у нові виробничі цикли після закінчення терміну експлуатації будівлі, створюючи замкнений цикл використання ресурсів. Ця концепція спрямована на мінімізацію відходів та збереження цінності матеріалів якомога довше.

Циркулярна економіка. Окрім етапів життєвого циклу будівлі, на діаграмі

також представлено блок "Циркулярна економіка" (D), який підкреслює потенціал відновлення матеріалів та їх повернення у виробничий цикл. Циркулярна економіка базується на принципах повторного використання, ремонту, відновлення та переробки матеріалів з метою зменшення кількості відходів та збереження природних ресурсів. Застосування принципів циркулярної економіки в будівництві передбачає проектування будівель з урахуванням можливості демонтажу та повторного використання конструкцій і матеріалів, використання переробленої сировини, розробку ефективних систем збору та сортування будівельних відходів, створення інфраструктури для їх переробки тощо.

Важливість розподілу впливів. Розподіл впливів будівлі на втілені та операційні допомагає визначити, на яких етапах життєвого циклу відбувається найбільший вплив на навколишнє середовище. Традиційно основна увага приділялася зменшенню операційних впливів, зокрема через підвищення енергоефективності будівель. Однак у сучасних енергоефективних будівлях частка втіленого впливу може сягати 50% і більше від загального впливу протягом життєвого циклу.

Тому для ефективного зменшення впливу будівель на довкілля необхідно враховувати як втілені, так і операційні впливи. Це потребує комплексного підходу до проектування, будівництва та експлуатації будівель, який включає вибір екологічних матеріалів з низьким втіленим впливом, оптимізацію конструктивних рішень, мінімізацію будівельних відходів, використання відновлюваних джерел енергії, впровадження енергоефективних технологій тощо.

Отже, оцінка життєвого циклу є потужним інструментом для визначення та зменшення впливу будівель на навколишнє середовище. Аналіз різних етапів життєвого циклу, від видобутку сировини до утилізації відходів, дозволяє виявити ключові точки впливу та розробити ефективні стратегії його мінімізації. Концепції "від колиски до воріт", "від колиски до могили" та "від колиски до колиски" відображають різні межі аналізу життєвого циклу і підкреслюють важливість переходу до циркулярної економіки, яка базується на замкнених циклах

використання матеріалів. Для забезпечення сталого розвитку будівельної галузі необхідно враховувати як втілені, так і операційні впливи будівель, впроваджувати екологічні матеріали та технології, оптимізувати процеси проектування, будівництва та експлуатації, а також розвивати інфраструктуру для переробки будівельних відходів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення практичних методів та інструментів для інтеграції принципів оцінки життєвого циклу та циркулярної економіки у будівельну галузь, а також на створення нормативної бази, що стимулюватиме впровадження екологічних рішень на всіх етапах життєвого циклу будівель.

4.2. Етапи життєвого циклу будівельних матеріалів

Етап видобутку сировини пов'язаний з видобутком та збиранням сировини з природного середовища. Процес видобутку часто спричиняє пил, шум, руйнації ґрунтового покриву. Процес має безпосередній вплив на навколишнє середовище різними способами. Він порушує безпосереднє природне середовище існування, флору і фауну, характер ландшафту і спричиняє забруднення підземних і поверхневих вод [241, 284, 282]. Під час підривних робіт у кар'єрах утворюються значні обсяги пилу та газів, зокрема CO₂, CO, NO_x. Ці викиди погіршують якість повітря та підсилюють парниковий ефект, що є суттєвим недоліком етапу видобутку сировини з точки зору впливу на довкілля. На місці видобутку корисних копалин робоче середовище має серйозний вплив на здоров'я і благополуччя робітників і людей, які живуть поблизу. Процес також зазвичай характеризується високим споживанням первинної енергії через високий рівень використання техніки, і ця енергія зазвичай вважається частиною початкової втіленої енергії видобутих матеріалів.

Видобута сировина потребує виробничого процесу, щоб перетворити її на придатні для використання в будівництві матеріали. Цей процес викликає серйозне занепокоєння людей з соціальної та екологічної точки зору. Він вимагає значних

витрат енергії та інших ресурсів у процесі виробництва, а на виході зазвичай утворюються тверді відходи та інші забруднювачі, які можуть бути шкідливими для побудованого і природного середовища. Ці відходи можуть бути токсичними і практично не придатними для подальшого використання. Ця сфера привертає багато уваги до того, як ці процеси можна вдосконалити, щоб вони були більш екологічними та соціально дружніми.

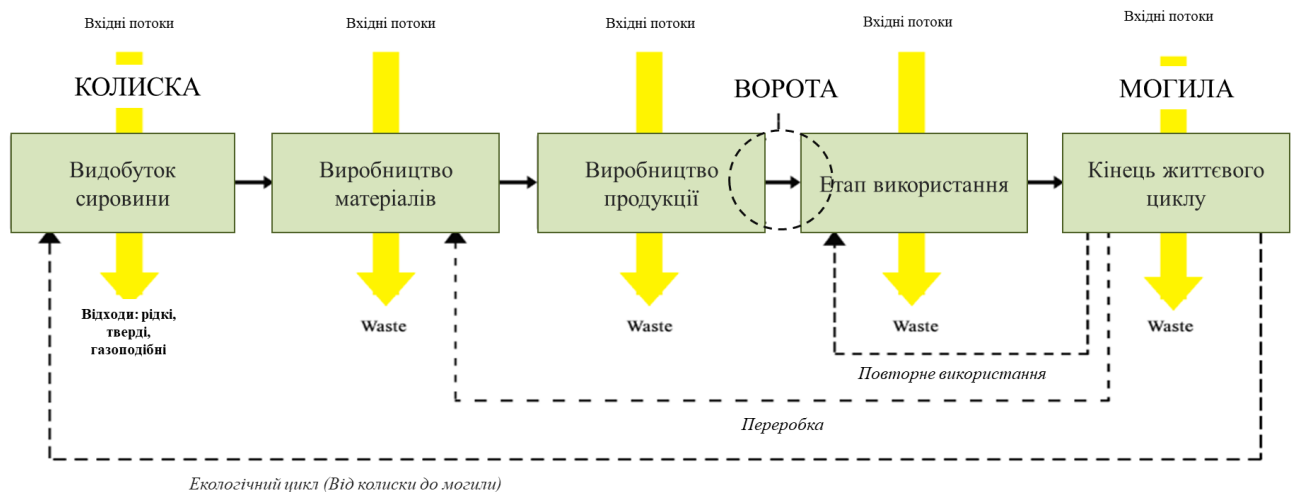


Рис. 4.3. Основа аналізу життєвого циклу продукції LCA [74]

Пакування будівельних матеріалів для доставки на будівельний майданчик також завдає шкоди навколишньому середовищу, оскільки існує небагато варіантів пакувальних матеріалів, які піддаються біологічному розкладанню або можуть бути безпечно спалені [201]. Це призводить до значних втрат ресурсів і має серйозний вплив на сміттєзвалища. Монтаж матеріалів на будівельному майданчику - це процес, який включає в себе розкрій і підгонку матеріалів для будівлі. Цей процес призводить до утворення відходів, а будівельні відходи стали серйозною екологічною проблемою. Кількість відходів, пов'язаних з будівництвом, становить приблизно 30% у США, 35% у Канаді, 50% у Великобританії [155]. Відходи часто утворюються через неефективне управління на будівельному майданчику або в цеху, а також через нераціональне використання будівельних матеріалів. Більшість цих відходів можна переробити і зменшити їх кількість за

умови належного планування та управління. Етап монтажу на будівельному майданчику також потребує енергії, що також буде враховано в розрахунку втіленої енергії. Більшість відходів, пов'язаних з будівництвом, є непотрібними, як стверджує Стернер [329], який говорить, що ці відходи мають високий потенціал для відновлення і повторного використання. Однак, через економічну природу будівельної галузі, на кожному етапі будівництва їх кількість зводиться до мінімуму. Виснаження природних ресурсів будівельною галуззю є предметом серйозних дискусій, оскільки значна частина матеріалів, що підлягають вторинній переробці, з будівельних майданчиків потрапляє на звалища.

На різних етапах життєвого циклу матеріалу часто виникає потреба у транспортуванні. Транспортування необхідне між місцем видобутку, переробки/виробництва та будівництва. Відповідне накопичення транспортних миль, пов'язане з відповідною втіленою енергією та викидами, викликає занепокоєння. Менші та регіонально розташовані заводи і розподільчі майданчики, як правило, покращують загальне екологічне навантаження на будівлю [123]. За даними Esin [168], кожна стадія виробничого процесу та остаточне складання на місці вимагає транспортування, а споживання енергії може становити приблизно 2,2% від загального споживання первинної енергії протягом життєвого циклу. Місцеві матеріали можуть суттєво вплинути на загальний вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з кожним етапом, завдяки використанню матеріалів місцевого виробництва. На етапі експлуатації будівлі матеріали також беруть участь у технічному обслуговуванні, переобладнанні та реновації до кінця терміну служби будівлі.

Матеріали, що використовуються на етапі експлуатації, тісно пов'язані з вибором матеріалів. Деякі матеріали можуть мати високу капітальну вартість і початкову втілену енергію, але низькі вимоги до технічного обслуговування. Однак, інші матеріали можуть бути навпаки. Рішення буде залежати від уподобань користувача та клієнта. Правильний вибір матеріалів може не тільки вплинути на

вимоги до технічного обслуговування, але й мати шкідливий вплив на мешканців та навколишнє середовище протягом усього терміну експлуатації будівлі, наприклад, виділення летких органічних сполук та інших речовин через хімічні речовини, що використовуються в процесі виробництва. Закінчення терміну експлуатації можна розглядати у двох аспектах. Це може стосуватися закінчення терміну служби певного матеріалу, коли подальше обслуговування може не відновити його первісну функцію або може бути економічно не вигідним. Інший аспект закінчення терміну експлуатації може стосуватися всієї будівлі, навіть якщо деякі матеріали все ще експлуатуються і функціонують. Зрештою, заміна та руйнації матеріалів призведе до їхнього захоронення на звалищі.

Обробка, покриття або консервація, які використовувалися, можуть перетворити природні матеріали на токсичні відходи, що потрапляють у повітря та воду. Тому слід обирати та використовувати матеріали, які піддаються переробці та біологічному розкладанню, щоб зменшити потребу у звалищах та викиди забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Будівельні матеріали важливо обирати не лише для того, щоб вони виконували свої функції після встановлення, але й для того, щоб вони слугували протягом прийнятної періоду часу. Деякі будівельні матеріали можуть служити протягом усього терміну експлуатації будівлі, але інші можуть функціонувати лише кілька років до заміни. Термін служби матеріалу може залежати від конкретних умов, які відображають складність його хімічних і механічних властивостей. Природні матеріали, як правило, мають нижчу енергоємність і рівень токсичності, ніж штучні матеріали. Продукти стануть стійкими, якщо використовувати природні матеріали з низьким вмістом втіленої енергії [168].

Стале будівництво та сталий розвиток передбачає врахування всього життєвого циклу будівель, які спроектовані таким чином, щоб мінімізувати всі негативні впливи на антропогенне та природне середовище шляхом сталого проектування будівель та вибору матеріалів. Обрані будівельні матеріали

впливають на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу будівлі. Цей життєвий цикл можна розділити на п'ять етапів, включаючи техніко-економічне обґрунтування, проектування, будівництво, експлуатацію та знесення. Матеріали використовуються на етапі будівництва будівлі до етапу експлуатації, який включає в себе технічне обслуговування будівлі. Заміна, оновлення та реконструкція будівельних матеріалів і компонентів триває до кінця терміну служби будівлі. По суті, матеріали відіграють важливу роль у підвищенні загальних експлуатаційних характеристик будівлі та в досягненні мети сталого будівництва в галузі.

Нижче наведено ключові етапи проведення LCA для будівельних матеріалів [281] (рис. 4.4):

1. Етап виробництва (Модулі А1-А3):
 - А1: Починається з видобутку або збору сировини.
 - А2: Включає транспортування сировини до заводу або млина.
 - А3: Охоплює виробництво самого продукту, утворюючи фазу "від колиски до воріт".
2. Етап будівництва (модулі А4-А5):
 - А4: Фокусується на транспортуванні продукту на будівельний майданчик.
 - А5: Включає монтаж та/або процес будівництва.
3. Етап використання (Модулі В1-В7):
 - Включає технічне обслуговування, ремонт, заміну, реконструкцію, а також експлуатаційне водо- та енергоспоживання протягом усього терміну служби будівлі.
4. Етап завершення експлуатації (Модулі С1-С4):
 - С1: охоплює деконструкцію або знесення.
 - С2: Передбачає транспортування відходів до місць утилізації або переробки.
 - С3: охоплює переробку відходів.
 - С4: Зосереджується на остаточному захороненні відходів, завершуючи цикл

"Від колиски до могили".

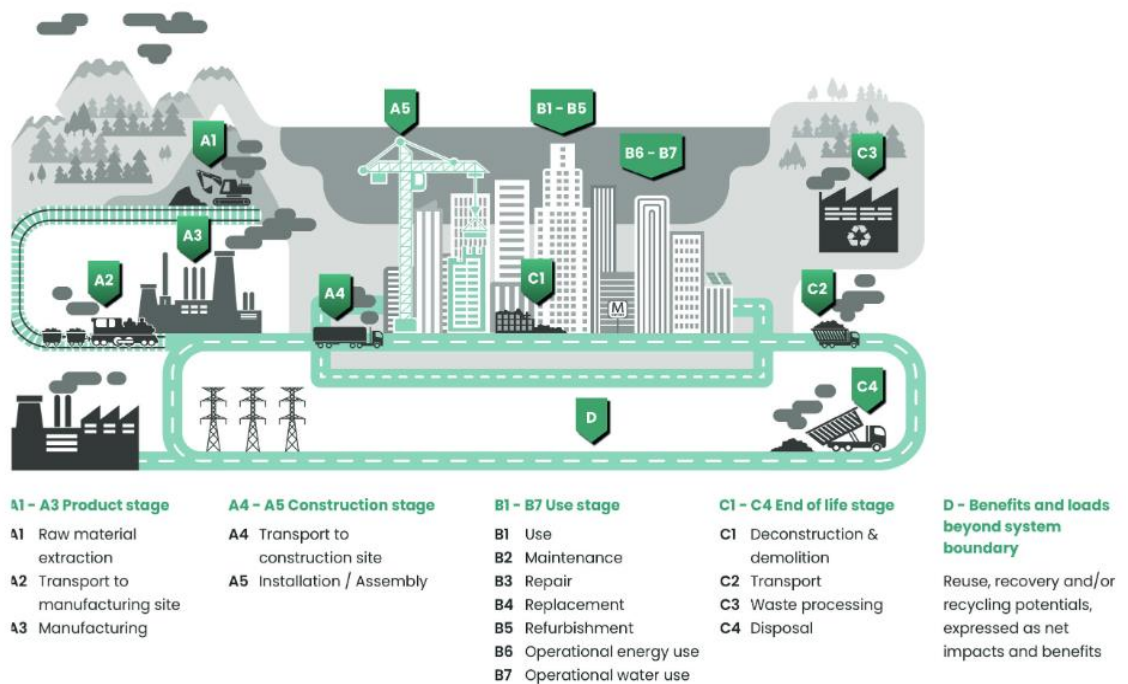


Рис. 4.4. Ключові етапи проведення LCA для будівельних матеріалів [281]

5. Додаткова інформація (Модуль D):

- Забезпечує прозорість щодо потенційних екологічних переваг від повторного використання продуктів, перероблених матеріалів, вторинного палива або відновленої енергії за межами системи.

6. Визначення сфери застосування та межі системи:

- Важливо визначити сферу застосування системи на основі цілей оцінювання, враховуючи такі елементи, як структурні системи, оздоблення, меблі та загальні експлуатаційні характеристики будівлі.

7. Вплив на навколишнє середовище:

- LCA допомагає оцінити різні впливи на навколишнє середовище, такі як потенціал глобального потепління (ПГП), підкислення, евтрофікація, виснаження озонового шару, смог і споживання викопного палива, щоб зробити проекти більш стійкими.

Ці етапи окреслюють комплексний підхід до оцінки впливу будівельних матеріалів на навколишнє середовище від виробництва до утилізації після

закінчення терміну експлуатації, акцентуючи увагу на сталому розвитку та прийнятті обґрунтованих рішень у будівельній практиці.

Згідно з коментарем до стандарту, LCA, як правило, не розглядає економічні або соціальні аспекти продукту, а вибір і припущення, зроблені в процесі, можуть бути суб'єктивними. Моделі, що використовуються для аналізу інвентаризації або для оцінки впливу на довкілля, також обмежені припущеннями. Крім того, точність результатів може бути обмежена доступністю або наявністю відповідних даних, а також якістю даних. Як правило, інформацію, отриману в результаті дослідження з оцінки життєвого циклу, слід використовувати як частину більш комплексного процесу прийняття рішень або для отримання широкого розуміння компромісів, пов'язаних з цим (ISO, 2006a).

На рис. 4.5 зображено діаграму фаз життєвого циклу будівлі, інтегровану з концепцією циклічності. Життєвий цикл поділяється на кілька етапів:

Етап видобутку сировини: охоплює управління та використання природних ресурсів, таких як викопне паливо, мінерали (метали, кераміка), органічна сировина та ґрунти. Включає видобуток і первинну переробку сировини для виробництва будівельних матеріалів.

Виробництво: цей етап охоплює видобуток, транспортування та виробництво матеріалів, необхідних для будівництва.

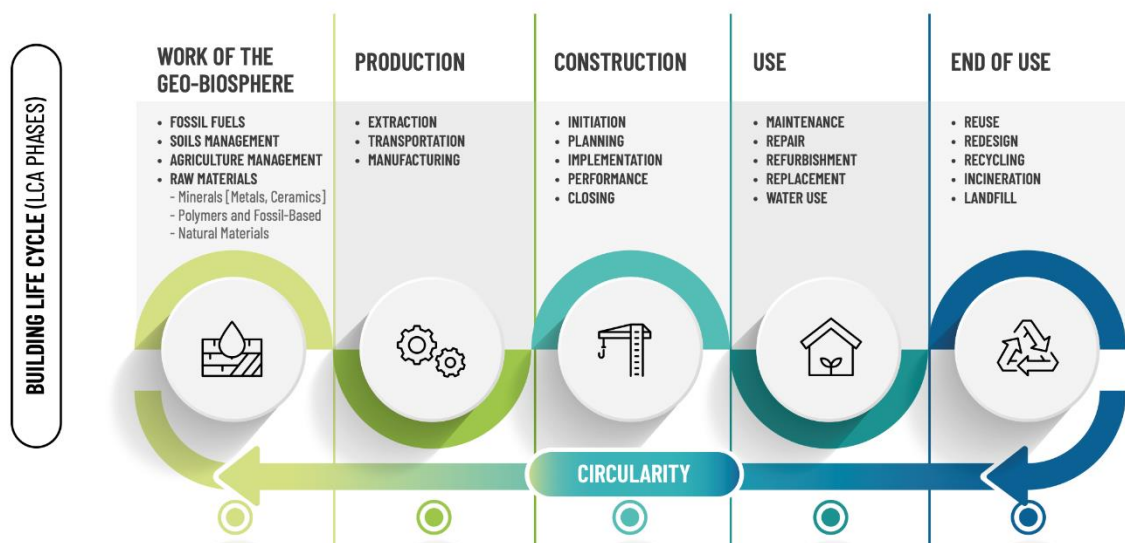


Рис. 4.5. Етапи LCA будівлі, інтегровану з концепцією циклічності [281]

Будівництво: окреслює етапи ініціювання, планування, реалізації, виконання та закриття будівельних проектів.

Використання: цей етап охоплює технічне обслуговування, ремонт, реконструкцію, заміну та водокористування будівлі протягом терміну її служби.

Кінець використання: останній етап включає повторне використання, перепланування, переробку, спалювання та захоронення відходів - ключові елементи циркулярного підходу до мінімізації відходів.

Загальна тема "циклічності" вказує на акцент на повторному використанні та переробці матеріалів наприкінці їхнього життя, щоб мінімізувати відходи та потребу в новій сировині. Вона підкреслює сталість будівельних практик, спрямованих на зменшення впливу на навколишнє середовище на кожному етапі життя будівлі. Зелені кругові стрілки підкреслюють важливість переробки та сталого розвитку в будівельній галузі, просуваючи циркулярну економіку, де ресурси використовуються повторно, зменшуючи потребу в новій сировині та зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

Одна з ключових Цілей сталого розвитку, визначених ООН, спрямована на покращення умов життя в містах та громадах. Оцінка життєвого циклу (LCA) є ефективним методом для визначення впливу будівлі на довкілля на всіх етапах її існування - від виробництва матеріалів до утилізації. LCA набуває популярності в будівельній галузі, але потребує збору та аналізу великого обсягу даних про матеріали, процеси будівництва, експлуатацію та кінець життєвого циклу будівлі, що може бути складним і трудомістким.

На підставі вивчення літературних джерел було узагальнено етапи LCA, що значно допомагає структурувати процес оцінки життєвого циклу будівельних матеріалів, забезпечуючи послідовний і всебічний аналіз їх екологічного впливу (табл. 4.1).

Етапи проведення LCA для будівельних матеріалів (сформовано автором)

Етап LCA	Опис
1. Визначення мети і сфери застосування	- Встановлення причин проведення LCA та визначення меж системи. - Визначення функціональної одиниці для порівняння альтернативних будівельних матеріалів.
2. Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу (LCI)	- Збір даних про входи (сировина, енергія, вода) і виходи (викиди, відходи) на всіх етапах життєвого циклу. - Створення моделі життєвого циклу матеріалу з урахуванням видобутку сировини, виробництва, транспортування, використання та утилізації.
3. Оцінка впливу життєвого циклу (LCIA)	- Класифікація і характеристика впливів на навколишнє середовище (наприклад, глобальне потепління, закислення, виснаження ресурсів). - Нормалізація і зважування результатів для порівняння різних категорій впливу.
4. Інтерпретація результатів	- Аналіз результатів LCI та LCIA для виявлення основних джерел впливу на навколишнє середовище. - Оцінка невизначеності та чутливості результатів. - Формулювання висновків і рекомендацій для поліпшення екологічних показників матеріалу.
5. Звітність і критичний огляд	- Підготовка прозорого і всебічного звіту про дослідження LCA. - Проведення критичного огляду для забезпечення відповідності дослідження стандартам і методологіям LCA.

Отже, такий деталізований опис етапів LCA допомагає структурувати процес оцінки життєвого циклу будівельних матеріалів, забезпечуючи послідовний і всебічний аналіз їх екологічного впливу. Результати LCA можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень при виборі матеріалів з урахуванням їх стійкості протягом усього життєвого циклу.

4.3. Порівняльна оцінка життєвого циклу бетону із заповнювачами з відходів руйнації та звичайного бетону для будівельних конструкцій

Природні або перероблені заповнювачі, як крупні, так і дрібні, складають приблизно 70% обсягу бетону. Природні заповнювачі - це частинки, які видобуваються з природних родовищ, таких як кар'єри або піщані кар'єри. З іншого боку, перероблені заповнювачі створюються шляхом переробки матеріалів з шахт

або кар'єрів, а також з відходів, що утворюються під час будівництва, реконструкції та знесення залізобетонних конструкцій. Використання цих видів заповнювачів у виробництві бетону зростає, що призводить до зменшення впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з цим важливим будівельним матеріалом. Однак внесок заповнювачів у загальні викиди CO₂ при виробництві бетону є відносно невеликим і становить лише близько 15%. Це пов'язано, головним чином, з енергією, необхідною для їх видобутку та переробки [182].

Природні заповнювачі. Життєвий цикл заповнювачів бетону можна розділити на чотири основні фази: розвідка, видобуток, переробка і транспортування. Першим кроком у виробництві заповнювачів є вибір ділянки для розвідки. Після того, як ділянка обрана, починається видобуток заповнювачів. Цей процес передбачає зняття шарів ґрунту, щоб зняти шар піску, а також відокремити органічний ґрунт від решти матеріалу. Конкретні методи видобутку залежать від типу матеріалу, що видобувається, природних умов і бажаного кінцевого продукту [150].

Пісок, як правило, видобувається з кар'єрів або виймається з підводних родовищ. Видобуток гравію та щебню відрізняється від видобутку піску, оскільки часто вимагає буріння та вибухових робіт. У гірській породі свердлять отвори, які частково заповнюють вибухівкою. Вибух, який триває лише мить, розбиває гірські породи на шматки [6]. Після того, як заповнювачі транспортуються на заводи, процес продовжується з дробленням, подрібненням, промиванням, зберіганням і постачанням. Як правило, для переміщення матеріалу до первинної дробарки використовуються вантажівки або конвеєрні стрічки. Потім матеріал подрібнюється і транспортується до вторинної дробарки по конвеєрній стрічці. По дорозі він проходить через вібросито для сортування за розміром. Після завершення сортування продукт, що відповідає вимогам, транспортується до складу готової продукції, а негабаритний матеріал відправляється назад на дроблення. Залежно від типу матеріалу, що переробляється, і бажаного кінцевого продукту, матеріал може піддаватися промиванню. Потім матеріал

транспортується до складу конвеєрними стрічками. Після продажу продукт завантажують на вантажівки і везуть до кінцевого пункту призначення [151].

Нарешті, заповнювачі транспортуються, причому приблизно 93% з них перевозяться вантажівками. Вантажівки є ефективним транспортним засобом для швидкої доставки вантажів від місця їхнього походження до місця призначення. Вони можуть перевозити близько 25 тон і пропонують економічно ефективну доставку [151].

Заповнювачі відходів руйнації. Перероблені заповнювачі можуть бути використані в бетоні замість природних заповнювачів. Існує два типи заводів для переробки будівельних відходів та відходів знесення (БВВ). Ці заводи можуть бути стаціонарними або мобільними, і їхнє розташування впливає на ефективність переробки. Ідеально, щоб завод з переробки був розташований якомога ближче до місця утворення та використання відходів. Стаціонарні заводи з переробки є стаціонарними і потребують транспортування матеріалу на етапах переробки. Вони займають велику площу і включають різні установки для сортування та переробки матеріалу. Ці заводи, як правило, мають кілька транспортних контурів, сита, етапи сортування та дробарки. У цьому дослідженні для стаціонарного заводу з переробки розглядалися такі етапи та обладнання: сортування (за вагою та типом на конвеєрних стрічках), дроблення (у дробильній машині) та просіювання (розподіл за розмірами). Грубі перероблені заповнювачі виробляються і готові до використання в бетоні, в той час як дрібні заповнювачі вважаються непридатними і відправляються на звалище.

З іншого боку, мобільні рециклінгові установки привозять на місце утворення заповнювачів з відходів руйнації. Вони мають одну вхідну потужність, конвеєрну стрічку, дробарку та одне або два різних сита. Оскільки ці заводи розташовані на місці знесення, немає необхідності транспортувати заповнювачі з відходів руйнації. Це дає економічні та екологічні переваги над стаціонарними заводами. Мобільні заводи також потребують меншої площі, мають коротший час встановлення і нижчі витрати на переробку. Однак стаціонарні заводи виробляють

ширший асортимент переробленої продукції з кращою якістю порівняно з мобільними установками. Стаціонарні заводи також мають перевагу у використанні більшого та потужнішого обладнання для покращення процесів подрібнення, видалення домішок та просіювання.

З точки зору "від колиски до воріт", у дослідженні розглядається використання як природних, так і перероблених заповнювачів у виробництві бетону. Для природних заповнювачів процес включає видобуток, переробку та транспортування на бетонний завод, а потім доставку на будівельний майданчик. І навпаки, перероблені заповнювачі отримують зі знесеного бетону, пропонуючи альтернативу, яка оминає необхідність видобутку природного заповнювача і зменшує вплив транспортування, при цьому вплив фази змішування є подібним до впливу природних заповнювачів.

Вплив на навколишнє середовище, який може варіюватися від позитивного до негативного, виникає в результаті дій або діяльності і відрізняється за величиною і характером. Життєвий цикл бетону впливає на навколишнє середовище через споживання ресурсів, викиди, що призводять до глобального потепління та інших екологічних проблем, а також викиди забруднюючих речовин. Видобуток і переробка природних заповнювачів несуть значний екологічний тягар, включаючи геологічну ерозію, забруднення, зміну ландшафту і шум. Транспортування також впливає на навколишнє середовище через викиди та шум. Використання перероблених заповнювачів може пом'якшити деякі з цих впливів, особливо ті, що пов'язані з видобутком і транспортуванням.

LCA базувався на міжнародних стандартах (ISO 14040 [227], 14044 [228]). Представлено межі дослідження: типовий термін служби приймається рівним 100 років, одиниця виміру в m^3 є релевантною для такого застосування.

Екологічні порівняння були проведені за допомогою програмного забезпечення SimaPro (7.2) з використанням різних методів оцінки впливу на навколишнє середовище. Деякі методи дозволяють охарактеризувати показники впливу на навколишнє середовище відповідно до стандарту EN15804 [162].

У таблиці 4.2 представлено категорії впливу відповідно до Декларації про вплив на навколишнє середовище та здоров'я (EPD). Розрахунок індикаторів впливу проведено для бетону класу C25/30 з використанням портландцементу СЕМ І 42.5, природного піску та гравію (для еталонного складу) та гранульованого бетонного щебню фракції 4/16 (для бетону з переробленими заповнювачами). Функціональна одиниця - 1 м³ бетонної суміші.

Цей метод є специфічним для створення екологічних декларацій продукції і дозволяє оцінювати показники різних категорій. Показники середнього рівня наведені в таблиці 4.2. Метод CML 2 групує результати інвентаризації життєвого циклу в категорії середнього рівня на основі таких факторів, як зміна клімату або екотоксичність. Цей метод було використано для розрахунку конкретних індикаторів впливу, як показано в таблиці 4.2. Однак метод EDIP3 та метод BEES4 не були включені в межі системи для цього дослідження, оскільки воно зосереджене на оцінці "від колиски до воріт". Аналізована частина життєвого циклу включає виробництво і транспортування піску, гравію, цементу, заповнювачів і домішок, а також виробництво бетону.

Таблиця 4.2

Розрахунок індикаторів впливу для різних типів бетону

Категорії впливу	Одиниці	Натуральні заповнювачі бетону	Заповнювачі відходів руйнації
Споживання енергетичних ресурсів	10 ³ МДж	2.22	1.29
Виснаження абіотичних ресурсів	кг Sb екв	1.70	0.90
Споживання води	10 ⁵ л	8.45	6.66
Глобальне потепління	10 ² кг CO ₂ екв	4.69	3.57
Погіршення кислотності	кг SO ₂ екв	0.75	0.90
Евтрофікація	кг PO ₄ ³⁻ екв	0.23	0.13
Забруднення повітря	10 ⁶ м ³	8.77	4.76
Водне забруднення	10 ⁵ м ³	3.56	2.39
Руйнації озонового шару	10 ⁻⁵ кг CFC-11 екв	2.96	1.65
Фотохімічне окиснення	кг CH ₄ екв	0.14	0.07

Були розглянуті короткі відстані поставок, і було зроблено припущення, що

відстані транспортування від переробних центрів відповідають використанню доріг і оптимізовані для виробництва перероблених заповнювачів для виробництва бетону. Крім того, було зроблено припущення, що транспортування всіх компонентів здійснюється вантажним транспортом. Функціональна одиниця, що використовувалася в якості еталонної для порівняння різних зразків, базувалася на моделі еталонного потоку (m^3 продукту) і враховувала всі компоненти, корисні для реалізації зразків, а також утворення пилу. Порівнювалися набори зразків бетону товщиною 20 мм. У всіх випадках функціональна одиниця відповідала певній меті, при цьому три зразки бетону товщиною 20 мм були виготовлені з однаковою міцністю.

Показники впливу на навколишнє середовище трьох зразків 20-мм бетону (зразки RC і TC) представлені в таблиці 4.2 і на рис. 4.6 відповідно до стандарту EN15804 [162]. Зразок 20-мм бетону із додаванням заповнювачів з відходів руйнації демонструє найкращу екологічну поведінку: всі показники впливу на навколишнє середовище значно нижчі порівняно з традиційним зразком, який оцінювався як еталонний. Інтеграція перероблених заповнювачів у рецептуру бетону видається переважною з точки зору його екологічної поведінки.

Рисунок представляє екологічну оцінку зразків бетону відповідно до стандарту EN15804, порівнюючи традиційний бетон та бетон з використанням переробленого заповнювача (recycled concrete). Оцінка проводиться за сімома основними категоріями впливу на навколишнє середовище: споживання енергетичних ресурсів, виснаження абіотичних ресурсів, евтрофікація, закислення, забруднення повітря, забруднення води та глобальне потепління.

Кожна з цих категорій впливу має своє значення та показує, як різні аспекти виробництва бетону можуть впливати на навколишнє середовище. Детальніше розглянемо ці категорії та їхнє значення:

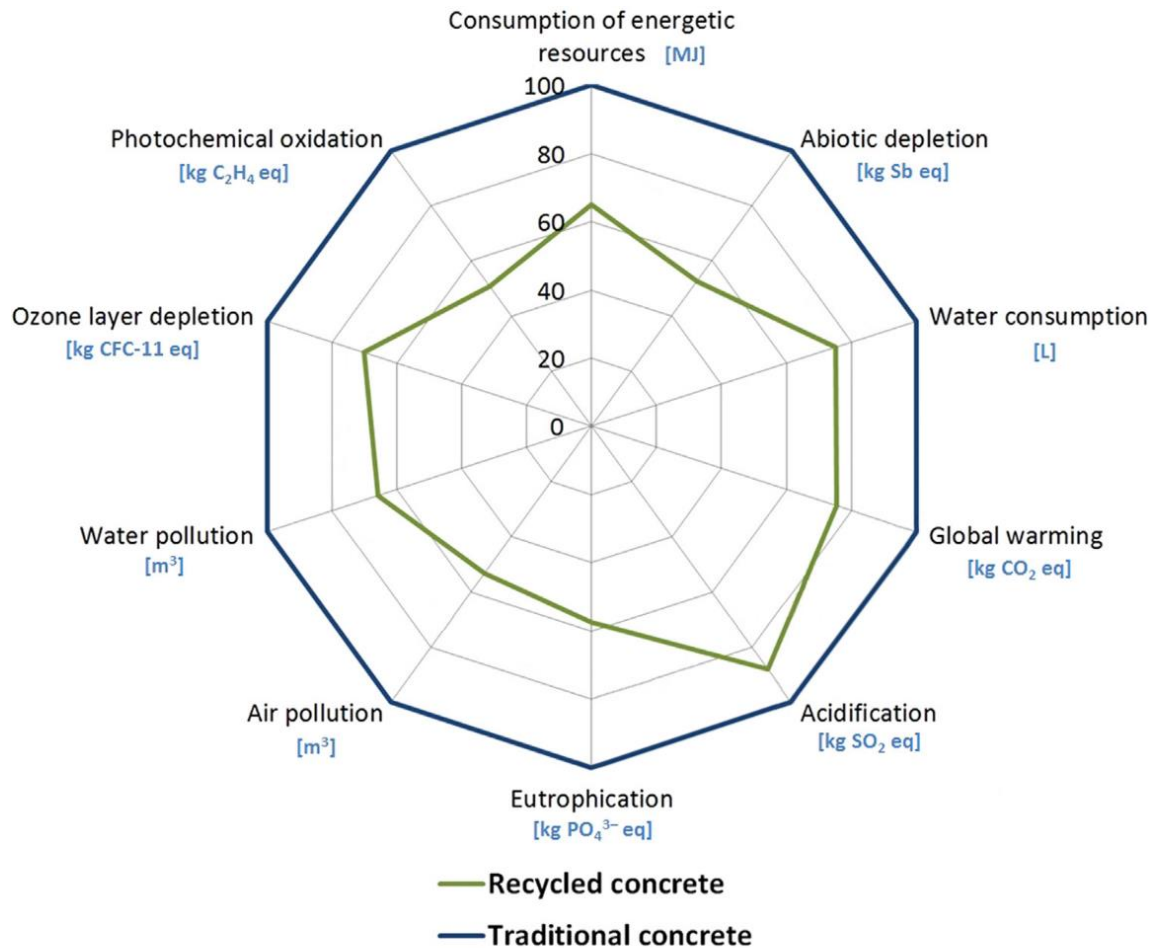


Рис. 4.6. Екологічна оцінка зразків бетону відповідно до стандартів EN15804 (розроблено автором)

1. Споживання енергетичних ресурсів (Use of renewable primary energy) [163, 227]

Вимірює кількість використаної енергії в процесі виробництва, транспортування, споживання товарів та послуг. Воно включає в себе використання відновлюваних та невідновлюваних джерел енергії. Високе споживання енергії може призвести до зменшення запасів невідновлюваних ресурсів та збільшення викидів парникових газів. Виробництво бетону потребує великих витрат енергії, особливо на випалювання цементу при високих температурах у обортових печах. Це споживає значні обсяги викопного палива (вугілля, газу тощо). Ці викиди є основним джерелом парникових газів у цементній промисловості. Зниження енергоспоживання на 35% при використанні

заповнювачів з відходів руйнації свідчить про меншу енергоємність процесів рециклінгу порівняно з видобутком та обробкою натуральних матеріалів.

Окрім значних витрат енергії, процес виробництва цементу супроводжується суттєвими викидами CO_2 внаслідок хімічної реакції розкладу вапняку (CaCO_3) на негашене вапно (CaO) та вуглекислий газ (CO_2) при високих температурах у печах.

2. Виснаження абіотичних ресурсів (Depletion of abiotic resources) [134]

Це стосується вичерпання невідновлюваних природних ресурсів, таких як мінерали, метали та викопне паливо. Виснаження цих ресурсів зменшує доступність сировини для майбутніх поколінь і може призвести до екологічних проблем, пов'язаних з їх видобутком та переробкою. Для бетону потрібні великі об'єми невідновлюваних мінеральних ресурсів, таких як вапняк, глина, пісок, гравій. Їх видобуток виснажує ці ресурси. Зниження на 25% може бути результатом ефективніших технологій водокористування у процесах рециклінгу заповнювачів. Використання заповнювачів з відходів руйнації знижує потребу в нових видах абіотичних ресурсів, оскільки перероблені матеріали вже були отримані з існуючих продуктів, що зменшує вплив на невідновлювані ресурси.

3. Споживання води (Water consumption) [225, 212, 289]

Цей параметр вказує на обсяг води, використаної для виробничих і споживчих потреб. Нераціональне використання води може призвести до її дефіциту, впливаючи на доступність питної води для людей і екосистем. Виробництво бетону та бетонних виробів потребує значних обсягів води, особливо на етапі приготування бетонної суміші та догляду за ним. Зниження на 25% може бути результатом більш ефективних технологій переробки, які вимагають менше водних ресурсів порівняно з традиційним видобутком і обробкою натуральних матеріалів.

4. Глобальне потепління (Global warming potential) [221, 187]

Це процес збільшення середньої температури земної атмосфери та океанів, здебільшого через викиди парникових газів від людської діяльності. Глобальне потепління призводить до кліматичних змін, які можуть впливати на природні

екосистеми, сільське господарство, водні ресурси тощо. Основний внесок тут походить від випалювання цементу, що супроводжується значними викидами CO_2 унаслідок хімічних реакцій розкладання вапняку. Для оцінки зниження викидів CO_2 при заміні 50% природного гравію переробленим бетонним щебнем проведено розрахунок на основі даних про питомі викиди на тонну заповнювача. Для природного гравію прийнято значення 4,2 кг $\text{CO}_2/\text{т}$, для переробленого щебеню - 1,8 кг $\text{CO}_2/\text{т}$ з урахуванням викидів при дробленні та транспортуванні. Для бетону класу C25/30 з витратою заповнювачів 1200 кг/м³ заміна 50% гравію на щебін з відходів руйнації дозволяє знизити викиди CO_2 на 1,44 кг/м³ або на 17,1%.

Для оцінки зменшення екологічного сліду бетону з переробленими заповнювачами проведено розрахунок на основі методики "Ecological Footprint Standards 2009". Встановлено, що заміна 50% природного гравію переробленим бетонним щебнем дозволяє зменшити екологічний слід на 0,12 га/м³ бетону або на 21,4%. Це еквівалентно збереженню 1200 м² біологічно продуктивних територій на кожні 1000 м³ бетону.

5. Закислення (Acidification potential) [209, 218]

Це відноситься до збільшення кислотності ґрунту або води через антропогенні впливи, наприклад, через викиди діоксиду сірки та азоту. Збільшення кислотності може шкодити водним організмам, рослинності та будівлям. - Окремі стадії виробництва цементу та бетону можуть супроводжуватися викидами оксидів сірки та азоту, що призводять до підкислення опадів та навколишнього середовища. Незначне зниження на 4.7% може вказувати на легке зменшення викидів кислототворних газів, але загалом показує, що вплив на кислотність залишається порівняно високим. Це зумовлено викристанням суперпластифікатора, під час синтезу якого в повітря виділяються речовини з високим потенціалом підкислення атмосфери, такі як NO_x , SO_x , кислоти тощо.

6. Евтрофікація (Eutrophication potential) [224, 211]

Це збагачення водойм поживними речовинами, зазвичай азотом та фосфором, що призводить до масового росту водоростей і зниження рівня кисню у

воді. Це може призвести до масової загибелі водних організмів і зниження біорізноманіття. При виробництві бетону це може бути пов'язане з забрудненням водойм у місцях видобутку піску, гравію. Зменшення на 40.9% підкреслює зменшене навантаження на водойми від викидів поживних речовин. Зниження евтрофікації може відбуватися через зменшене використання добрив у видобутку натуральних матеріалів, які можуть потрапляти в водойми, стимулюючи ріст водоростей. Матеріали з рециклінгу виключають таку потребу.

7. Забруднення повітря (Photochemical ozone creation) [196, 364]

Це викид в атмосферу шкідливих речовин від промислових, транспортних та інших джерел, що негативно впливає на здоров'я людей, якість повітря та природні екосистеми. Випалювання цементу, транспортування сировини та пилу під час виробництва спричиняють значні викиди пилу, оксидів азоту, сірки та інших забруднювачів повітря. Зниження на 46.6% свідчить про значне зменшення обсягів шкідливих викидів в атмосферу завдяки використанню заповнювачів з відходів руйнації. Зменшення обсягів забруднення повітря може бути досягнуто через використання менш енергоємних процесів рециклінгу та зменшення викидів шкідливих речовин порівняно з традиційним виробництвом.

8. Забруднення води (Pollution of water [307, 225]

Це введення в водойми шкідливих речовин, що може вплинути на якість води, здоров'я людей та водних організмів. Утворення стічних вод з надлишками твердих часток, хімікатів під час виробництва може забруднювати водойми. Зниження на 34.3% демонструє, що використання заповнювачів з відходів руйнації сприяє зменшенню впливу на водні ресурси та зменшує ризик забруднення водойм. Менше водне забруднення може бути результатом кращого контролю над викидами в процесі рециклінгу та меншої потреби в використанні хімічних речовин, які можуть забруднити водойми.

9. Руйнування озонового шару (Ozone depletion potential) [364, 307, 328]

Це зменшення концентрації озону в стратосфері, здебільшого через викиди хлорфторвуглеців (ХФВ) та інших озоноруйнівних речовин. Озоновий шар

захищає живі організми від шкідливого ультрафіолетового випромінювання. Зниження на 30% показує, що рециклінг бетону може сприяти зменшенню викидів озоноруйнівних речовин, тим самим зменшуючи негативний вплив на озоновий шар. Зниження впливу на озоновий шар при використанні заповнювачів з відходів руйнації зумовлене меншою кількістю викидів озоноруйнівних речовин, які могли б виникати в результаті виробництва та використання натуральних матеріалів.

10. Фотохімічне окиснення (Photochemical oxidation) [354, 231, 142]

Цей критерій характеризує потенціал утворення фотохімічних окиснювачів (наприклад, озону) в результаті реакцій летких органічних сполук (ЛОС) та оксидів азоту під впливом сонячного світла. Фотохімічне забруднення може негативно впливати на здоров'я людей, рослинність та матеріали. Це може призвести до проблем з дихальними шляхами у людей та пошкодження рослин. Викиди оксидів азоту, вуглеводнів з процесів спалювання палива та нагрівання можуть сприяти фотохімічному смогу. Зменшення на 46.2% вказує на зниження викидів речовин, що сприяють утворенню озону в нижніх шарах атмосфери, що є позитивним як для якості повітря, так і для здоров'я людей. Зниження може бути результатом зменшення викидів летких органічних сполук і оксидів азоту, які беруть участь у формуванні озону на низьких висотах, завдяки меншому використанню палива і хімікатів у процесах рециклінгу.

За більшістю категорій бетон з переробленим заповнювачем демонструє нижчі показники впливу на довкілля у порівнянні з традиційним бетоном. Зокрема, споживання енергетичних ресурсів для переробленого бетону становить близько 60 МДж, тоді як для традиційного бетону - близько 100 МДж. Це свідчить про енергоефективність використання перероблених матеріалів у виробництві бетону.

Виснаження абіотичних ресурсів, тобто невідновлюваних природних ресурсів, таких як корисні копалини, також є нижчим для переробленого бетону. Це пояснюється зменшенням потреби у видобутку первинної сировини за рахунок використання будівельних відходів як вторинного заповнювача.

Показники евтрофікації, закислення та забруднення повітря і води також є

меншими для бетону з переробленим заповнювачем, хоча різниця є менш вираженою. Це може бути пов'язано зі зменшенням викидів забруднюючих речовин при виробництві цементу та інших компонентів бетону за рахунок використання вторинної сировини.

Однак за категорією глобального потепління, яка враховує викиди парникових газів, зокрема CO₂, бетон з переробленим заповнювачем має дещо вищий показник у порівнянні з традиційним бетоном. Це може бути зумовлено додатковими енерговитратами на переробку будівельних відходів та транспортування вторинних заповнювачів.

Висновки до розділу 4

Оцінка життєвого циклу (LCA) є ефективним інструментом для визначення та зменшення впливу будівельних матеріалів та конструкцій на навколишнє середовище. Аналіз різних етапів життєвого циклу бетону з використанням заповнювачів з відходів руйнації показав значний потенціал зниження екологічного навантаження порівняно з традиційним бетоном на природних заповнювачах.

Зокрема, застосування заповнювачів з відходів руйнації дозволяє зменшити споживання енергетичних ресурсів на 41,9%, виснаження абіотичних ресурсів - на 47,1%, споживання води - на 21,2%, викиди парникових газів - на 23,9%, забруднення повітря - на 45,7%, забруднення води - на 32,9% тощо. Ці кількісні дані підкреслюють екологічні переваги використання перероблених матеріалів у виробництві бетону.

Для забезпечення сталого розвитку будівельної галузі необхідно впроваджувати принципи циркулярної економіки, які базуються на замкнених циклах використання матеріалів, мінімізації відходів та зниженні потреби у видобутку первинної сировини. Використання заповнювачів з відходів руйнації є одним з ключових напрямків реалізації цих принципів у бетонній індустрії.

Водночас, для ефективного застосування заповнювачів з відходів руйнації потрібно вирішити низку технологічних та нормативних питань. Зокрема, необхідно вдосконалювати процеси переробки будівельних відходів для отримання якісних вторинних заповнювачів, оптимізувати склади бетонних сумішей з урахуванням особливостей перероблених матеріалів, забезпечувати належний контроль якості на всіх етапах виробництва.

Важливим завданням є також розроблення нормативної бази, яка б регламентувала вимоги до заповнювачів з відходів руйнації та бетонів на їх основі, методи випробувань, правила проектування та застосування таких бетонів у різних конструкціях. Це дозволить створити необхідні передумови для широкого впровадження практики використання перероблених матеріалів у будівництві.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію всього життєвого циклу бетону з заповнювачами з відходів руйнації, включаючи етапи проектування складу, виробництва, транспортування, зведення конструкцій, експлуатації та утилізації. Це дозволить максимально розкрити потенціал зниження екологічного впливу та забезпечити сталий розвиток будівельної галузі.

Аналіз показує, що використання заповнювачів відходів руйнації замість натуральних заповнювачів бетону сприяє значному зменшенню негативного впливу на довкілля за багатьма ключовими показниками. Це включає зменшення споживання енергетичних ресурсів, виснаження абіотичних ресурсів, споживання води, впливу на глобальне потепління, евтрофікацію, забруднення повітря і води, а також зменшення ризику руйнації озонового шару та фотохімічного окиснення. Розрахунки показують, що використання заповнювачів з відходів руйнації дозволяє знизити сумарний вплив на довкілля (за методом Eco-indicator 99) на 25-30% порівняно з традиційним бетоном. Це еквівалентно зменшенню екологічних витрат на 15-20 євро/м³ бетону та скороченню викидів парникових газів на 30-40 кг CO₂-екв/м³. Ці дані підтверджують, що такі заповнювачі бетону може бути важливим кроком до більш сталого будівництва та зменшення екологічного відбитка будівельної індустрії.

Загалом, результати екологічної оцінки за стандартом EN15804 свідчать про екологічні переваги використання перероблених заповнювачів у виробництві бетону. Це дозволяє зменшити споживання первинних природних ресурсів, знизити енергоємність виробництва та скоротити викиди забруднюючих речовин.

Проте для більш повної оцінки екологічного впливу бетону з переробленими заповнювачами необхідно враховувати весь життєвий цикл матеріалу, включаючи етапи будівництва, експлуатації та утилізації. Також важливо забезпечити належну якість перероблених заповнювачів та оптимізувати склад бетонної суміші для досягнення необхідних експлуатаційних характеристик бетону.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення технологій переробки будівельних відходів, розроблення ефективних методів проектування складу бетону з переробленими заповнювачами, а також на створення нормативної бази, яка б регламентувала застосування таких бетонів у будівництві з урахуванням екологічних аспектів.

РОЗДІЛ 5

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ БЕТОНУ З ДОДАВАННЯМ ЗАПОВНЮВАЧА З ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ В УКРАЇНІ З ВРАХУВАННЯМ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

5.1. Система роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках

Масштабні руйнування, спричинені російською агресією проти України, призвели до утворення величезної кількості будівельних відходів, які потребують ефективного управління та переробки. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, обсяги відходів руйнації вже можна порівняти з кількістю твердих побутових відходів, що в середньому утворюються в країні за рік [97]. Ця ситуація створює значні екологічні та економічні виклики, але водночас відкриває можливості для впровадження принципів циркулярної економіки та сталого будівництва.

Для вирішення проблеми відходів руйнації та перетворення їх на цінний ресурс необхідно впровадити ефективну систему роздільного збору та сортування безпосередньо на будівельних майданчиках. Така система дозволить виокремити фракції відходів, придатні для подальшої переробки та повторного використання, зокрема в якості заповнювачів у виробництві бетону.

Пропонується наступна система роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках з обґрунтуванням вибору оптимальної логістичної системи, що включає наступні етапи:

1. Навчання та інформування: проведення тренінгів для робітників щодо правильного сортування відходів;

2. Попереднє сортування на місці: виділення окремих зон для розміщення різних типів відходів (бетон, цегла, метал, дерево тощо);
3. Встановлення спеціальних контейнерів або відсіків для кожного типу відходів;
4. Використання мобільних сортувальних установок безпосередньо на будівельному майданчику;
5. Оптимізація логістики: планування оптимальних маршрутів транспортування відходів до місць переробки;
6. Контроль та моніторинг: регулярні перевірки якості сортування відходів на будівельному майданчику та ведення обліку кількості та типів зібраних і вивезених відходів;
7. Стимулювання та заохочення: впровадження системи заохочень для робітників за правильне сортування відходів (табл. 5.1).

Така система роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках дозволяє ефективно виділяти фракції, придатні для подальшої переробки та повторного використання. Вона сприяє зменшенню обсягів відходів, що потрапляють на звалища, та підвищує рівень рециклінгу будівельних матеріалів, що є важливим кроком до сталого розвитку будівельної галузі.

Відокремлення відходів руйнації на будівельному майданчику для подрібнення та подальшого використання у бетонних сумішах є важливим етапом у процесі утилізації та рециклінгу будівельних матеріалів. Це дозволяє зменшити обсяг відходів, знизити витрати на нові матеріали та зменшити вплив будівельної діяльності на довкілля. Нижче наведено детальний опис процесу, який допоможе визначити відходи, придатні для подрібнення та використання у бетонних сумішах.

Первинна сортування на місці. Першим етапом є первинне сортування відходів руйнації. Це можна здійснити вручну або за допомогою спеціального обладнання.

Система роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних
майданчиках

Етап	Заходи	Обґрунтування
1. Навчання та інформування	<ul style="list-style-type: none"> - Проведення тренінгів для робітників - Розміщення інформаційних стендів і покажчиків 	<ul style="list-style-type: none"> - Забезпечує обізнаність робітників щодо правильного сортування відходів - Сприяє ефективному функціонуванню системи на всіх етапах
2. Попереднє сортування на місці	<ul style="list-style-type: none"> - Виділення окремих зон для різних типів відходів - Забезпечення робітників інструментами та засобами захисту 	<ul style="list-style-type: none"> - Оптимізує процес сортування та зменшує витрати на транспортування - Мінімізує ризики забруднення та змішування різних типів відходів
3. Контейнери для роздільного збору	<ul style="list-style-type: none"> - Встановлення спеціальних контейнерів або бункерів - Маркування контейнерів - Регулярне спустошення контейнерів 	<ul style="list-style-type: none"> - Забезпечує ефективне розділення відходів за типами - Спрощує подальше транспортування та переробку відходів
4. Мобільні сортувальні установки	<ul style="list-style-type: none"> - Використання мобільних сортувальних установок на майданчику 	<ul style="list-style-type: none"> - Дозволяє здійснювати більш глибоке сортування відходів безпосередньо на місці - Зменшує витрати на транспортування та підвищує ефективність переробки
5. Оптимізація логістики	<ul style="list-style-type: none"> - Планування оптимальних маршрутів транспортування відходів - Вибір відповідних транспортних засобів - Створення партнерств з переробними підприємствами 	<ul style="list-style-type: none"> - Мінімізує витрати на транспортування та зменшує викиди CO₂ - Забезпечує своєчасну доставку відходів до місць переробки - Сприяє ефективній утилізації та повторному використанню відходів
6. Контроль та моніторинг	<ul style="list-style-type: none"> - Впровадження системи відстеження руху відходів - Регулярний аудит та оцінка ефективності системи 	<ul style="list-style-type: none"> - Дозволяє контролювати процеси та оптимізувати логістику - Забезпечує прозорість та відповідність нормативним вимогам
7. Стимулювання та заохочення	<ul style="list-style-type: none"> - Впровадження системи заохочень для робітників - Інформування про переваги та екологічні вигоди від роздільного збору та переробки відходів 	<ul style="list-style-type: none"> - Мотивує робітників до правильного сортування відходів - Підвищує обізнаність про екологічні та економічні переваги системи

Важливо розділити відходи на різні категорії, зокрема:

- бетонні уламки: основний матеріал, який використовується для повторного подрібнення;
- цегла та кераміка: також можуть бути використані після подрібнення;
- метали: відокремлюються для подальшої переробки;
- деревина: може бути використана для інших цілей або утилізована окремо, як біопаливо;
- скло: підлягає окремій переробці;
- небезпечні відходи: азбест, фарби та інші матеріали, які потребують спеціальної утилізації.

Виявлення придатних для подрібнення матеріалів. Основним матеріалом, який підходить для подрібнення та подальшого використання у бетонних сумішах, є бетон. Уламки бетону можуть бути легко перероблені та використані як заповнювачі у нових бетонних сумішах. Також придатні цегла, черепиця та деякі види каменю.

Очищення від домішок. Після первинного сортування необхідно очистити матеріали від домішок, таких як арматура, проводка, скло, пластик та інші непотрібні матеріали. Для цього використовуються магнітні сепаратори (для металів) та інші види обладнання.

Подрібнення на мобільних установках. На місці будівельного майданчика встановлюються мобільні дробарки, які можуть подрібнювати бетонні уламки до необхідних розмірів. Існує кілька типів дробарок: щоківні дробарки: підходять для початкового подрібнення великих уламків бетону; роторні дробарки: використовуються для середнього та дрібного подрібнення; конусні дробарки: забезпечують кінцеве подрібнення до необхідних фракцій.

Контроль якості подрібненого матеріалу. Після подрібнення важливо контролювати якість отриманого матеріалу. Він повинен відповідати певним стандартам за розміром фракцій, чистотою та іншими показниками, щоб бути придатним для використання у бетонних сумішах. Для цього проводяться лабораторні аналізи та контрольні випробування.

Додавання подрібненого матеріалу до бетонних сумішей. Подрібнений матеріал змішується з іншими компонентами бетонної суміші (цементом, піском, водою) у необхідних пропорціях. Важливо дотримуватися технологічних вимог, щоб забезпечити належну якість кінцевого продукту.

Випробування та сертифікація бетонних сумішей. Перед використанням бетонної суміші у будівництві необхідно провести випробування на міцність, зносостійкість та інші характеристики. Це гарантує, що отриманий матеріал відповідає всім будівельним нормам і стандартам.

Переваги використання мобільних дробильних установок на будівельному майданчику включають:

1. Зменшення витрат на транспортування відходів до віддалених місць переробки.
2. Скорочення викидів CO₂ та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.
3. Можливість швидкого реагування на потреби будівельного проекту в щебені.
4. Підвищення рівня рециклінгу бетонних відходів та зменшення обсягів відходів, що потрапляють на звалища.

Для ефективного функціонування системи виокремлення та переробки бетонних відходів на будівельному майданчику важливо також налагодити співпрацю з проектувальниками та виробниками бетонних сумішей. Це дозволить врахувати специфічні вимоги до якості щебеню та розробити оптимальні рецептури бетонних сумішей з використанням переробленого заповнювача.

Крім того, необхідно забезпечити належне документування та звітність процесу переробки відходів. Це включає ведення обліку кількості та типів перероблених відходів, результатів лабораторних випробувань, а також даних про використання отриманого щебеню в будівельних проектах. Така інформація дозволяє контролювати ефективність системи, оптимізувати процеси та демонструвати переваги рециклінгу бетонних відходів зацікавленим сторонам.

Впровадження системи виокремлення та переробки бетонних відходів безпосередньо на будівельному майданчику з використанням мобільних дробильних установок є важливим кроком на шляху до сталого розвитку будівельної галузі. Це дозволяє зменшити екологічний вплив, скоротити витрати на утилізацію відходів та забезпечити ефективне використання ресурсів. Такий підхід сприяє переходу до циркулярної економіки, де відходи розглядаються як цінний ресурс, який може бути повторно використаний у виробничому циклі.

Для успішної реалізації цієї системи необхідна тісна співпраця між усіма учасниками будівельного процесу, включаючи замовників, проектувальників, підрядників та постачальників матеріалів. Крім того, важливо забезпечити належне навчання та інформування персоналу щодо принципів та процедур селективного демонтажу, сортування та переробки відходів.

Державна підтримка та стимулювання також відіграють важливу роль у поширенні практики рециклінгу будівельних відходів. Це може включати розробку відповідних нормативно-правових актів, впровадження економічних інструментів (наприклад, податкових пільг для компаній, що використовують перероблені матеріали) та проведення інформаційних кампаній для підвищення обізнаності громадськості.

У довгостроковій перспективі впровадження системи виокремлення та переробки бетонних відходів на будівельних майданчиках може стати стандартною практикою в галузі. Це не тільки зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, але й дозволить оптимізувати витрати на будівництво та підвищити конкурентоспроможність компаній, які дотримуються принципів сталого розвитку.

Таким чином, виокремлення на будівельному майданчику відходів руйнації, які можна одразу на місці за допомогою мобільних установок подрібнювати і додавати до бетонних сумішей, є комплексним завданням, що вимагає системного підходу та залучення всіх зацікавлених сторін. Реалізація такої системи дозволить досягти значних екологічних та економічних переваг та сприятиме переходу до більш сталої та ефективної моделі виробництва в будівельній галузі.

5.2. Перспективи використання відходів руйнації як заповнювачів у виробництві бетону

Одним із перспективних напрямків утилізації відходів руйнації є їх використання як заповнювачів у виробництві бетону. Цей підхід дозволяє зменшити потребу у видобутку природних ресурсів, знизити енергоємність виробництва та скоротити викиди парникових газів. Крім того, застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації (БДЗВР) може сприяти здешевленню процесу відбудови зруйнованої інфраструктури та створенню нових робочих місць у сфері переробки відходів.

Для успішного застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації у практику відбудови України необхідно розробити комплексні рекомендації, які б враховували технічні, екологічні та економічні аспекти застосування цього матеріалу. Ці рекомендації мають базуватися на принципах оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка дозволяє комплексно проаналізувати потенційні впливи продукту на навколишнє середовище протягом усього його життєвого циклу, від видобутку сировини до утилізації відходів.

Оцінка життєвого циклу бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації

1. Межі системи та функціональна одиниця. Для проведення LCA БДЗВР необхідно чітко визначити межі системи, які включають усі етапи життєвого циклу матеріалу: видобуток та переробка сировини, транспортування, виробництво бетону, будівництво, експлуатація та знесення будівлі, утилізація відходів. Функціональною одиницею, тобто основою для порівняння, може бути 1 м³ бетону або 1 м² бетонної конструкції із заданими експлуатаційними характеристиками [249].

2. Інвентаризаційний аналіз. На етапі інвентаризаційного аналізу збираються дані про всі вхідні потоки (сировина, енергія, вода) та вихідні потоки (викиди в атмосферу, скиди у водойми, відходи) на кожному етапі життєвого циклу БДЗВР.

Для цього можуть використовуватися як первинні дані з конкретних підприємств, так і вторинні дані з літературних джерел та баз даних [151].

Особливу увагу слід приділити збору даних про склад та властивості заповнювачів з відходів руйнації, оскільки вони можуть значно варіюватися залежно від походження та методів переробки. Важливо забезпечити репрезентативність та надійність цих даних, щоб уникнути викривлення результатів оцінки.

3. Оцінка впливів. На основі зібраних даних проводиться оцінка потенційних впливів БДЗВР на навколишнє середовище за такими категоріями [210]:

- Виснаження абіотичних ресурсів (кг Sb-екв.) - враховує споживання невідновлюваних природних ресурсів, таких як корисні копалини та викопне паливо.

- Потенціал глобального потепління (кг CO₂-екв.) - оцінює внесок у зміну клімату через викиди парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю, метану та закису азоту.

- Потенціал закислення (кг SO₂-екв.) - характеризує вплив на ґрунти та водойми через викиди кислотоутворюючих речовин, таких як оксиди сірки та азоту.

- Потенціал евтрофікації (кг PO₄-екв.) - показує ризик надмірного збагачення водойм поживними речовинами, що призводить до порушення водних екосистем.

- Потенціал утворення фотохімічного озону (кг C₂H₄-екв.) - відображає здатність викидів летких органічних сполук та оксидів азоту утворювати тропосферний озон під дією сонячного світла.

- Потенціал виснаження озонового шару (кг CFC-11-екв.) - оцінює вплив на стратосферний озоновий шар через викиди озоноруйнівних речовин.

Для кожної категорії впливу розраховуються характеристичні коефіцієнти, які дозволяють привести різні забруднюючі речовини до єдиної одиниці виміру та оцінити їх відносний внесок у загальний вплив.

Для розрахунку характеристичних коефіцієнтів в кожній категорії впливу використовуються спеціальні моделі та методи, які дозволяють оцінити відносний внесок різних забруднюючих речовин у загальний вплив на навколишнє середовище. Ці коефіцієнти базуються на наукових дослідженнях та міжнародних угодах щодо оцінки життєвого циклу. Розглянемо методи розрахунку для кожної категорії впливу (табл. 5.1).

За даними таблиці 5.2. встановлено, що для виснаження абіотичних ресурсів (ADP) характеристичний коефіцієнт розраховується на основі співвідношення між швидкістю видобутку ресурсу та його запасами. Як еталонна речовина використовується сурма (Sb). Коефіцієнт для кожного ресурсу розраховується за формулою: $ADP = (DR / RR) / (DR(Sb) / RR(Sb))$, де DR - швидкість видобутку ресурсу, RR - запаси ресурсу, DR(Sb) і RR(Sb) - відповідні значення для сурми.:

Характеристичні коефіцієнти для парникових газів (потенціал глобального потепління (GWP)) базуються на їх здатності поглинати інфрачервоне випромінювання та часу перебування в атмосфері. Як еталонний газ використовується діоксид вуглецю (CO₂).

Характеристичні коефіцієнти для кислотоутворюючих речовин (потенціал закислення (AP)) базуються на їх здатності вивільняти протони (H⁺) в навколишнє середовище. Як еталонна речовина використовується діоксид сірки (SO₂).

Характеристичні коефіцієнти для речовин, що спричиняють евтрофікацію (потенціал евтрофікації (EP)), базуються на їх здатності стимулювати ріст водоростей. Як еталонна речовина використовується фосфат (PO₄). Коефіцієнти розраховуються на основі стехіометричного співвідношення між речовиною та PO₄ з урахуванням лімітуючого поживного елемента (зазвичай, фосфору).

Характеристичні коефіцієнти для речовин, що сприяють утворенню тропосферного озону (потенціал утворення фотохімічного озону (POCP)), базуються на їх реакційній здатності з гідроксильними радикалами (OH). Як еталонна речовина використовується етилен (C₂H₄). Коефіцієнти розраховуються на основі відносної швидкості реакції речовини з OH у порівнянні з етиленом.

Методи, які дозволяють оцінити відносний внесок різних забруднюючих речовин у загальний вплив на навколишнє середовище на основі розрахунку характеристичного коефіцієнту (власна розробка)

Категорія впливу	Позначення	Характеризаційний коефіцієнт	Еталонна речовина
Виснаження абіотичних ресурсів	ADP	$ADP = (DR / RR) / (DR(Sb) / RR(Sb))$	Сурма (Sb)
Потенціал глобального потепління	GWP	$GWP = (IЧ \text{ поглинання газу} \times \text{Час життя газу}) / (IЧ \text{ поглинання CO}_2 \times \text{Час життя CO}_2)$	Діоксид вуглецю (CO ₂)
Потенціал закислення	AP	$AP = (\text{Молярна маса H}^+ \times \text{Кількість атомів H}^+ \text{ у молекулі речовини}) / (\text{Молярна маса речовини} \times 2)$	Діоксид сірки (SO ₂)
Потенціал евтрофікації	EP	Коефіцієнт базується на стехіометричному співвідношенні між речовиною та PO ₄	Фосфат (PO ₄)
Потенціал утворення фотохімічного озону	POCP	Коефіцієнт базується на відносній швидкості реакції речовини з OH у порівнянні з етиленом	Етилен (C ₂ H ₄)
Потенціал виснаження озонового шару	ODP	Коефіцієнт базується на відносній здатності речовини руйнувати озон у порівнянні з CFC-11	Трихлорфторметан (CFC-11)

Примітка: DR - швидкість видобутку ресурсу, RR - запаси ресурсу, DR(Sb) і RR(Sb) - відповідні значення для сурми; IЧ - інфрачервоне випромінювання; OH – гідроксильний радикал

Характеризаційні коефіцієнти для озоноруйнівних речовин (потенціал виснаження озонового шару (ODP)) базуються на їх здатності руйнувати стратосферний озон. Як еталонна речовина використовується трихлорфторметан (CFC-11). Коефіцієнти розраховуються на основі відносної здатності речовини руйнувати озон у порівнянні з CFC-11.

Слід зазначити, що існують різні методика та бази даних для розрахунку характеристичних коефіцієнтів, такі як CML 2001, ReCiPe, IMPACT 2002+, TRACI та інші. Вони можуть використовувати дещо відмінні підходи та еталонні речовини для окремих категорій впливу, але загальні принципи розрахунку залишаються подібними.

Характеризаційні коефіцієнти дозволяють привести різні забруднюючі речовини до спільної одиниці виміру в межах кожної категорії впливу та оцінити

їх відносний внесок у загальний вплив на навколишнє середовище. Це дає можливість порівнювати та агрегувати результати оцінки життєвого циклу для різних продуктів, процесів та систем.

4. Інтерпретація результатів. На основі отриманих результатів оцінки впливів проводиться інтерпретація та порівняння екологічного профілю застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації з традиційним бетоном на основі природних заповнювачів. Це дозволяє виявити етапи життєвого циклу та процеси, які мають найбільший внесок у загальний вплив, і визначити потенціал для його зменшення.

Наприклад, використання заповнювачів з відходів руйнації може знизити вплив на виснаження абіотичних ресурсів та потенціал глобального потепління за рахунок зменшення потреби у видобутку природної сировини та скорочення викидів парникових газів при виробництві цементу. Водночас додаткові процеси збору, сортування та переробки будівельних відходів можуть призвести до збільшення впливу на закислення та евтрофікацію [215].

Важливо також враховувати невизначеності та варіативність даних, які можуть вплинути на надійність отриманих результатів. Для цього рекомендується проводити аналіз чутливості та невизначеності, який дозволяє оцінити вплив зміни ключових параметрів на результати оцінки.

Технічні аспекти застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації

1. Вимоги до якості заповнювачів з відходів руйнації. Для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик БДЗВР заповнювачі з відходів руйнації мають відповідати певним вимогам якості, які регламентуються державними стандартами та будівельними нормами. Зокрема, ДСТУ Б В.2.7-75-98 "Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови" встановлює вимоги до гранулометричного складу, вмісту пилоподібних і глинистих частинок, морозостійкості та інших показників якості щебеню та гравію [23].

Для заповнювачів з відходів руйнації ці вимоги можуть бути адаптовані з урахуванням специфіки їх походження та властивостей. Наприклад, допустимий вміст пилоподібних і глинистих частинок може бути збільшений до 5-7% для врахування наявності цементного каменю на поверхні зернят заповнювача. Також може знадобитися додатковий контроль вмісту солей, сульфатів та інших потенційно шкідливих домішок, які можуть міститися в будівельних відходах [171].

Важливо забезпечити належний відбір, сортування та переробку відходів руйнації для отримання заповнювачів необхідної якості. Це може включати видалення сторонніх домішок (дерево, пластик, скло), дроблення та фракціонування матеріалу, промивання для видалення пилу та глинистих частинок. Для цього можуть застосовуватися як ручні, так і автоматизовані методи сортування та переробки відходів [96].

2. Проектування складу бетонної суміші. При проектуванні складу БДЗВР необхідно враховувати особливості заповнювачів з відходів руйнації, зокрема їх підвищену потребу у воді, знижену щільність та можливу варіативність властивостей. Це може потребувати коригування витрати води, цементу та добавок для забезпечення необхідної консистенції, міцності та довговічності бетону.

Зокрема, для компенсації підвищеної потреби у воді заповнювачів з відходів руйнації рекомендується використовувати пластифікуючі добавки, які дозволяють зменшити кількість води замішування без погіршення легкоукладальності бетонної суміші. Також доцільно застосовувати активні мінеральні добавки, такі як мікрокремнезем, метакаолін, зола-винесення, які ущільнюють структуру цементного каменю та підвищують його міцність і довговічність [255].

При підборі оптимального співвідношення компонентів бетонної суміші слід керуватися принципом мінімізації цементовмісту, який має найбільший внесок у сумарний вплив бетону на навколишнє середовище. Це може досягатися за рахунок використання ефективних заповнювачів, оптимізації гранулометричного складу, застосування добавок-модифікаторів.

Для визначення оптимального вмісту заповнювачів з відходів руйнації в бетоні рекомендується проводити експериментальні дослідження з варіюванням їх частки від 20% до 50% від загального об'єму крупного заповнювача. При цьому необхідно контролювати такі показники якості бетонної суміші та бетону, як легкоукладальність, середня щільність, міцність на стиск, морозостійкість, водонепроникність, стиранисть [335].

3. Контроль якості в процесі виробництва. Для забезпечення стабільності властивостей бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації необхідно здійснювати постійний контроль якості сировинних матеріалів, дозування компонентів, режимів перемішування та транспортування бетонної суміші, а також умов тверднення бетону. Це потребує впровадження системи управління якістю на підприємствах-виробниках бетону, яка б відповідала вимогам міжнародних стандартів серії ISO 9000 [226].

Особливу увагу слід приділяти вхідному контролю якості заповнювачів з відходів руйнації, який має включати перевірку їх гранулометричного складу, вмісту пилоподібних і глинистих частинок, наявності шкідливих домішок, потреби у воді, насипної щільності тощо. Ці показники потрібно контролювати для кожної партії заповнювачів і при необхідності коригувати склад бетонної суміші.

Також важливо забезпечити належні умови зберігання заповнювачів з відходів руйнації на підприємстві, щоб уникнути їх забруднення та зволоження. Для цього рекомендується облаштовувати криті склади з твердим покриттям та системою дренажу, які б дозволяли захистити матеріали від атмосферних опадів та ґрунтових вод.

Екологічні аспекти застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації

1. Зменшення емісії парникових газів. Однією з ключових екологічних переваг застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації є зменшення емісії парникових газів у порівнянні з традиційним бетоном на основі природних заповнювачів. Це досягається за рахунок скорочення енергоємних

процесів видобутку, транспортування та переробки природної сировини, а також зменшення викидів CO₂ при виробництві цементу.

За даними досліджень, використання заповнювачів з відходів руйнації в бетоні може знизити викиди парникових газів на 15-20% залежно від частки заміщення природного щебеню та гравію [240]. При цьому важливо враховувати додаткові викиди, пов'язані зі збором, сортуванням та переробкою будівельних відходів, а також можливе підвищення транспортних витрат при доставці цих матеріалів на будівельний майданчик.

2. Збереження природних ресурсів. Застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації дозволяє зменшити потребу у видобутку природних корисних копалин, таких як щебінь, гравій, пісок, які використовуються як заповнювачі для традиційного бетону. Це сприяє збереженню невідновлюваних природних ресурсів та зменшенню негативного впливу на ландшафти й екосистеми в місцях видобутку.

За оцінками фахівців, використання 1 тони заповнювачів з відходів руйнації дозволяє економити до 1,5 тони природного щебеню або гравію [120]. При масштабному застосуванні БДЗВР у процесі відбудови України це може значно знизити навантаження на природні ресурси та сприяти відновленню порушених земель.

3. Зменшення обсягів захоронення відходів. Використання відходів руйнації як вторинної сировини для виробництва бетону дозволяє зменшити обсяги їх захоронення на звалищах та полігонах. Це має важливе значення в умовах дефіциту земельних ресурсів та високої вартості облаштування й експлуатації місць захоронення відходів.

За даними Мінприроди, в Україні щорічно утворюється близько 300-500 тис. тон будівельних відходів, з яких лише 5-10% переробляються, а решта потрапляє на звалища [95]. Впровадження БДЗВР дозволить суттєво збільшити рівень переробки цих відходів та зменшити навантаження на сектор поводження з відходами.

4. Зниження екологічних ризиків. Неналежне поводження з відходами руйнації, зокрема їх неконтрольоване захоронення або спалювання, створює значні екологічні ризики для довкілля та здоров'я людей. Ці відходи можуть містити небезпечні речовини, такі як азбест, свинець, ртуть, які здатні забруднювати ґрунти, поверхневі та підземні води, повітря.

Використання відходів руйнації як вторинної сировини для виробництва бетону дозволяє мінімізувати ці ризики за рахунок контрольованого збору, сортування та переробки відходів. При цьому важливо забезпечити належний екологічний контроль на всіх етапах поводження з відходами та дотримуватися вимог безпеки при їх переробці.

Економічні аспекти застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації

1. Зниження вартості будівництва. Застосування БДЗВР може дозволити знизити вартість будівництва за рахунок використання більш дешевої сировини у порівнянні з природними заповнювачами. Це особливо актуально для відбудови України, яка потребує значних обсягів будівельних матеріалів в умовах обмежених фінансових ресурсів.

За оцінками експертів, вартість заповнювачів з відходів руйнації може бути на 20-50% нижчою за вартість природного щебеню та гравію залежно від регіону та наявності місцевих джерел відходів [363, 360]. Крім того, використання БДЗВР дозволяє зменшити транспортні витрати на доставку заповнювачів, оскільки будівельні відходи часто утворюються безпосередньо на місці руйнувань або неподалік від нього.

2. Створення нових робочих місць. Впровадження БДЗВР може сприяти створенню нових робочих місць у сфері збору, сортування та переробки будівельних відходів. Це особливо важливо для регіонів, які зазнали значних руйнувань внаслідок бойових дій та потребують відновлення економічної активності.

За даними досліджень, створення інфраструктури для переробки 1 млн тон будівельних відходів на рік може забезпечити до 500 нових робочих місць [94, 121]. При цьому важливо забезпечити належні умови праці, безпеку та соціальний захист працівників, зайнятих у цій сфері.

3. Розвиток малого та середнього бізнесу. Збір, сортування та переробка будівельних відходів можуть стати перспективною нішею для розвитку малого та середнього бізнесу в Україні. Це може включати створення мобільних та стаціонарних пунктів прийому відходів, організацію логістичних ланцюгів, надання послуг з переробки відходів на замовлення будівельних компаній тощо.

Для стимулювання розвитку цього сектору економіки необхідно створити сприятливе регуляторне середовище, яке б включало спрощення процедур отримання дозволів та ліцензій, надання податкових пільг та преференцій для підприємств, що займаються переробкою відходів, забезпечення доступу до кредитних ресурсів та грантового фінансування [192].

Економічна ефективність використання відходів руйнації та додатків, наповнювачів, захисних покриттів та інгібіторів корозії у порівнянні зі звичайним бетоном може бути оцінена з урахуванням кількох факторів:

1. Вартість сировини:

- Використання відходів руйнації як заповнювача або наповнювача може значно знизити витрати на сировину в порівнянні з природними матеріалами, такими як щебінь або пісок.

- Додавання промислових відходів (наприклад, золи-виносу, шлаку) також може бути економічно вигідним у порівнянні з традиційними добавками.

2. Витрати на переробку та транспортування:

- Переробка відходів руйнації на місці або поблизу будівельного майданчика може скоротити витрати на транспортування в порівнянні з доставкою природних заповнювачів з віддалених кар'єрів.

- Однак, може знадобитися додаткове обладнання та енергія для переробки відходів, що слід врахувати при оцінці загальної економічної ефективності.

3. Довговічність та експлуатаційні витрати:

- Використання захисних покриттів та інгібіторів корозії може подовжити термін служби бетонних конструкцій, зменшуючи потребу в ремонті та заміні.

- Це може призвести до значної економії коштів протягом життєвого циклу споруди, незважаючи на початкові додаткові витрати на ці матеріали.

4. Екологічні витрати та вигоди:

- Застосування відходів руйнації та промислових відходів може зменшити потребу в видобутку природних ресурсів та знизити викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом цементу.

- Ці екологічні вигоди можуть мати економічну цінність, особливо в умовах зростаючого попиту на сталі будівельні практики та потенційних податків на викиди вуглецю.

Для кількісної оцінки економічної ефективності можна провести аналіз витрат протягом життєвого циклу (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) для різних варіантів бетонних сумішей та захисних систем. Цей аналіз враховує початкові витрати, експлуатаційні витрати, витрати на ремонт та утилізацію, а також потенційні екологічні витрати та вигоди [213]. Наприклад, дослідження Braga [125] показало, що використання 50% переробленого бетонного заповнювача може знизити витрати на бетон на 12-18% у порівнянні зі звичайним бетоном. Крім того, дослідження Суенса-Моуано [139] продемонструвало, що застосування інгібіторів корозії може подовжити термін служби залізобетонних конструкцій на 15-20 років, що призводить до значної економії коштів протягом життєвого циклу.

Проте, точні показники економічної ефективності можуть варіюватися залежно від місцевих умов, доступності матеріалів та конкретних проектних вимог. Тому в рамках дисертаційного дослідження важливо провести детальний економічний аналіз з урахуванням специфіки регіону та досліджуваних матеріалів.

На основі узагальнення результатів різних досліджень [125, 139, 325] та за рахунок адаптації відповідно до конкретних умов та результатів, отриманих в рамках дисертаційного дослідження, нами проведено порівняння економічної

ефективності використання відходів руйнації та додатків, наповнювачів, захисних покриттів та інгібіторів корозії у порівнянні зі звичайним бетоном (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Порівняння економічної ефективності альтернативних та звичайних бетонних матеріалів (розробка автора)

Фактор	Звичайний бетон	Бетон з відходами руйнації	Бетон з промисловими відходами	Бетон з захисними покриттями та інгібіторами корозії
Вартість сировини	Базова	Нижча на 20-40%	Нижча на 10-30%	Базова або вища на 5-15%
Витрати на переробку	Не застосовно	Вищі на 10-20%	Вищі на 5-15%	Не застосовно
Витрати на транспортування	Базові	Нижчі на 15-30%	Базові або нижчі на 5-20%	Базові
Довговічність	Базова	Подібна або нижча на 5-10%	Подібна або вища на 5-15%	Вища на 20-40%
Експлуатаційні витрати	Базові	Подібні або нижчі на 5-10%	Подібні або нижчі на 5-15%	Нижчі на 15-30%
Екологічні витрати	Базові	Нижчі на 20-40%	Нижчі на 15-35%	Подібні або нижчі на 5-10%
Загальна економічна ефективність	Базова	Вища на 10-25%	Вища на 5-20%	Вища на 15-30%

Примітки:

- Процентні значення є орієнтовними і можуть варіюватися залежно від конкретних умов та матеріалів.

- "Базова" означає типовий рівень для звичайного бетону без використання відходів або спеціальних додатків.

- Загальна економічна ефективність враховує сукупність всіх факторів протягом життєвого циклу бетонної конструкції.

Дані таблиці свідчать, що використання відходів руйнації, промислових відходів та захисних систем може призвести до значної економії коштів у порівнянні зі звичайним бетоном. Однак, важливо враховувати специфіку кожного проекту та проводити детальний економічний аналіз для прийняття оптимальних рішень.

Соціальні аспекти застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації

1. Підвищення обізнаності та екологічної свідомості. Впровадження БДЗВР у процес відбудови України може сприяти підвищенню обізнаності та екологічної свідомості населення щодо важливості раціонального використання ресурсів та зменшення відходів. Це може досягатися за рахунок проведення інформаційно-просвітницьких кампаній, залучення громадськості до процесів прийняття рішень, демонстрації успішних прикладів застосування БДЗВР на практиці.

Важливо доносити до суспільства інформацію про екологічні, економічні та соціальні переваги використання вторинної сировини у будівництві, а також розвінчувати можливі міфи та стереотипи щодо якості та безпечності бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації.

2. Покращення якості життя та здоров'я населення. Неналежне поводження з будівельними відходами може створювати значні ризики для здоров'я населення, особливо у випадку їх неконтрольованого спалювання або захоронення поблизу житлових районів. Забруднення повітря, ґрунтів та водойм небезпечними речовинами може призводити до зростання захворюваності, зокрема на рак, респіраторні та алергічні хвороби.

Впровадження системи збору та переробки відходів руйнації для виробництва БДЗВР дозволяє мінімізувати ці ризики та покращити якість життя населення в зонах відбудови. Крім того, використання БДЗВР може сприяти створенню більш комфортного та безпечного середовища проживання за рахунок швидшого та ефективнішого відновлення зруйнованої інфраструктури.

3. Залучення громадськості до процесу відбудови. Застосування БДЗВР може стати платформою для залучення місцевих громад до процесу відбудови України. Це може включати організацію волонтерських акцій зі збору та сортування будівельних відходів, проведення громадських слухань щодо планів відбудови з використанням екологічних матеріалів, створення кооперативів з переробки відходів на базі ОСББ тощо.

Такі ініціативи дозволять не лише прискорити процес відбудови, але й сприятимуть розвитку місцевого самоврядування, зміцненню соціальних зв'язків та підвищенню рівня довіри між владою та громадянами.

Таки чином, застосування бетону з додаванням заповнювачів з відходів руйнації є перспективним напрямком для екологічно безпечної та ефективної відбудови України. Цей підхід дозволяє вирішити низку нагальних проблем, пов'язаних з утворенням та накопиченням будівельних відходів, зменшити навантаження на природні ресурси, знизити вартість будівництва та створити нові робочі місця.

Для успішного впровадження БДЗВР у практику відбудови необхідно забезпечити комплексний підхід, який би враховував технічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти застосування цього матеріалу. Зокрема, важливо розробити національні стандарти та будівельні норми, які б регламентували вимоги до якості заповнювачів з відходів руйнації та проектування складу бетонних сумішей з їх використанням.

Також необхідно створити ефективну систему збору, сортування та переробки будівельних відходів, яка б забезпечувала стабільне постачання якісної вторинної сировини для виробництва БДЗВР. Це потребує розвитку відповідної інфраструктури, логістичних ланцюгів, стимулювання малого та середнього бізнесу в цій сфері.

Важливу роль у просуванні БДЗВР відіграє інформаційно-просвітницька робота з населенням та фахівцями будівельної галузі щодо переваг використання вторинної сировини та принципів сталого будівництва. Необхідно доносити до суспільства інформацію про екологічну безпечність та економічну доцільність застосування БДЗВР, а також залучати громадськість до процесу відбудови.

При цьому слід враховувати регіональні особливості та потреби, адаптувати підходи до місцевих умов та ресурсів. Важливо забезпечити синергію зусиль влади, бізнесу, науки та громадянського суспільства для створення сприятливого середовища для розвитку циркулярної економіки в будівельній галузі.

Оцінка життєвого циклу має стати невід'ємною складовою процесу проектування та будівництва з використанням БДЗВР. Це дозволить комплексно оцінити потенційні впливи цього матеріалу на довкілля та здоров'я людей, виявити можливості для оптимізації та зменшення негативних наслідків.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення технологій переробки будівельних відходів, розроблення нових рецептур бетонних сумішей з підвищеними експлуатаційними характеристиками, оптимізацію логістичних ланцюгів та інфраструктури поводження з відходами. Також важливо вивчати довгостроковий вплив БДЗВР на довкілля та здоров'я людей, розробляти методи моніторингу та контролю якості матеріалів протягом усього життєвого циклу.

Екологічно безпечна відбудова України з використанням БДЗВР може стати прикладом для інших країн, які стикаються з проблемами накопичення будівельних відходів та дефіциту природних ресурсів. Цей досвід може бути масштабований та адаптований до різних соціально-економічних та екологічних умов, сприяючи переходу до сталого розвитку в глобальному вимірі.

Висновки до розділу 5

Впровадження системи роздільного збору та сортування відходів руйнації на будівельних майданчиках та їх подальше використання в якості заповнювачів для бетону є важливими кроками на шляху до сталого розвитку будівельної галузі в Україні. Ця практика дозволяє перетворити проблему відходів на можливість для інновацій та ефективного використання ресурсів, що є особливо актуальним в умовах післявоєнного відновлення країни. Для успішної реалізації цього підходу необхідна тісна співпраця між усіма зацікавленими сторонами - державними органами, будівельними компаніями, переробними підприємствами, науково-дослідними установами та громадськістю.

Для успішного впровадження БДЗВР у практику відбудови необхідно забезпечити комплексний підхід, який би враховував технічні, екологічні,

економічні та соціальні аспекти застосування цього матеріалу. Важливо розробити національні стандарти та будівельні норми, створити ефективну систему збору, сортування та переробки будівельних відходів, проводити інформаційно-просвітницьку роботу з населенням та фахівцями будівельної галузі.

Оцінка життєвого циклу має стати невід'ємною складовою процесу проектування та будівництва з використанням БДЗВР. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення технологій переробки будівельних відходів, розроблення нових рецептур бетонних сумішей з підвищеними експлуатаційними характеристиками, оптимізацію логістичних ланцюгів та інфраструктури поводження з відходами.

Екологічно безпечна відбудова України з використанням БДЗВР може стати прикладом для інших країн, які стикаються з проблемами накопичення будівельних відходів та дефіциту природних ресурсів. Цей досвід може бути масштабований та адаптований до різних соціально-економічних та екологічних умов, сприяючи переходу до сталого розвитку в глобальному вимірі.

ВИСНОВКИ

Дослідження, проведене в рамках даної дисертаційної роботи, присвячене актуальній проблемі підвищення екологічної безпеки шляхом впровадження ефективних стратегій управління відходами руйнації в контексті сталого розвитку та циркулярної економіки. Отримані результати дозволяють зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. На основі критичного аналізу існуючих теоретичних підходів та практичного досвіду управління відходами руйнації встановлено, що традиційні методи поводження з цими відходами, зокрема захоронення на звалищах або спалювання, не відповідають сучасним вимогам екологічної безпеки та ресурсоефективності. Обґрунтовано доцільність переходу до моделі циркулярної економіки в будівельній галузі, що передбачає максимальне залучення відходів руйнації у повторний господарський обіг як цінної вторинної сировини. Перспективним напрямом утилізації відходів руйнації є їх використання як заповнювачів при виробництві бетонних сумішей та виробів, що дозволяє суттєво зменшити потребу у природних матеріалах та знизити екологічний слід будівництва.

2. Аналіз сучасного стану проблеми показав, що в Україні щорічно утворюється близько 8,5 млн тон будівельних відходів, а внаслідок військових дій їх обсяг значно зріс і становить понад 100 млн тон. При цьому рівень переробки цих відходів не перевищує 5%, що свідчить про значний невикористаний потенціал їх залучення у виробничий цикл. Критичний огляд літературних джерел виявив недостатній рівень розвитку нормативно-правової бази, відсутність комплексної стратегії управління відходами руйнації, обмеженість даних щодо властивостей бетонів з використанням заповнювачів з відходів руйнації (ЗВР) в умовах України. Відсутність достовірної інформації ускладнює розробку ефективних стратегій управління відходами руйнації та може призвести до неоптимального

використання ресурсів при відновленні зруйнованих територій. Тому першочерговим завданням є створення системи обліку відходів руйнації, яка дозволить оцінити їх обсяги, склад та просторовий розподіл. Крім того, необхідно прискорити розробку та прийняття державної програми поводження з відходами, яка має включати специфічні положення щодо управління відходами руйнації в умовах військових дій та післявоєнного відновлення. Програма повинна передбачати механізми стимулювання рециклінгу та повторного використання відходів, створення інфраструктури для їх переробки, а також забезпечення екологічної безпеки при поводженні з потенційно небезпечними матеріалами. Тільки за умов наявності достовірних даних про обсяги та характеристики відходів руйнації, а також законодавчо закріплених механізмів управління ними, можливо розробити та реалізувати ефективні стратегії поводження з цими відходами, що сприятимуть сталому відновленню регіонів України, постраждалих внаслідок військових дій.

3. Проведений аналіз впливу відходів руйнації на стан довкілля виявив значні екологічні ризики, пов'язані з їх неконтрольованим розміщенням та накопиченням. Встановлено, що будівельні відходи містять широкий спектр забруднюючих речовин, таких як важкі метали, нафтопродукти, азбест тощо, які при потраплянні у навколишнє середовище можуть спричиняти деградацію ґрунтів, забруднення водних об'єктів та атмосферного повітря. Особливу небезпеку становлять відходи руйнації, що утворюються внаслідок військових дій та містять токсичні компоненти вибухівки та боєприпасів. Для мінімізації негативного впливу відходів руйнації на довкілля необхідно впроваджувати сучасні методи їх роздільного збирання, механічного та хімічного сортування, переробки та безпечної утилізації із застосуванням принципів найкращих доступних технологій.

4. Здійснений комплексний огляд сучасних наукових досліджень та практичного досвіду використання відходів руйнації як заповнювачів бетону засвідчив техніко-економічну доцільність та екологічні переваги даного підходу в контексті реалізації концепції сталого будівництва. Встановлено, що часткова або

повна заміна природного щебеню та піску рециклінговими аналогами дозволяє отримувати бетоні суміші та вироби з необхідними експлуатаційними характеристиками, забезпечуючи при цьому істотну економію матеріально-сировинних та енергетичних ресурсів, скорочення викидів парникових газів та зменшення обсягів відходів, що підлягають захороненню. Водночас, аналіз виявив ряд особливостей рециклінгових заповнювачів порівняно з природними, зокрема підвищену пористість, водопоглинання, вміст дрібнодисперсних фракцій та домішок, які необхідно враховувати при проектуванні рецептур бетонних сумішей.

5. У роботі розроблено методологію дослідження властивостей бетонів з використанням ЗВР, яка включає вибір та обґрунтування компонентів бетонної суміші, проектування складів бетону, визначення основних фізико-механічних та експлуатаційних характеристик. Експериментальні дослідження проводились на зразках бетону з різним вмістом ЗВР (0%, 25% та 50% заміщення крупного природного заповнювача). Встановлено, що використання ЗВР покращує легкоукладальність бетонної суміші, підвищуючи осадку конуса з 18 см для еталонного бетону до 21 см для бетону з 50% ЗВР. При цьому міцність на стиск бетону з 25% ЗВР у віці 28 діб становить 48 МПа, що лише на 4% менше за еталонний бетон. Міцність на згин та енергія руйнації бетону з 50% ЗВР знаходяться на рівні 95-98% від еталонного бетону. Таким чином, заміна до 50% природного щебеню ЗВР дозволяє отримати бетони з необхідними будівельно-технічними властивостями.

6. Дослідження довговічності бетонів з ЗВР показали, що коефіцієнт дифузії хлоридів збільшується з $0,837 \text{ мм/год}^{0,5}$ для еталонного бетону до $0,925 \text{ мм/год}^{0,5}$ для бетону з 50% ЗВР, що вказує на потенційне скорочення терміну до початку корозії арматури. Прискорені корозійні випробування підтвердили задовільну корозійну стійкість бетонів з 25% ЗВР, тоді як для бетонів з 50% ЗВР зафіксовано підвищення густини корозійного струму на 15-20%. Отже, оптимальний вміст ЗВР у бетоні з точки зору довговічності становить 25%. Оптимізація рецептур бетонних сумішей із застосуванням рециклінгових

заповнювачів на основі відходів руйнації здійснювалась з використанням методів математичного планування експерименту та комп'ютерного моделювання. В результаті розроблено склади важкого конструкційного бетону класів C16/20 - C30/35 з вмістом заповнювачів з відходів руйнації від 20% до 50%, які характеризуються необхідними показниками рухливості, середньої густини, міцності при стиску та на розтяг при згині, морозостійкості, водонепроникності та довговічності. Встановлено, що ключовими факторами, які визначають ефективність використання заповнювачами з відходів руйнації у бетоні, є їх фракційний склад, вміст пилюватих і глинистих домішок, водопоглинання та міцність зернят. Для забезпечення стабільності властивостей бетону рекомендовано застосовувати пластифікуючі добавки та активні мінеральні наповнювачі, зокрема мікрокремнезем та метакаолін, які сприяють ущільненню мікроструктури та підвищенню адгезії цементного каменю до поверхні заповнювача.

7. Оцінка життєвого циклу бетонів з ЗВР за стандартом EN 15804 виявила значний потенціал зниження впливу на довкілля порівняно з традиційним бетоном. Використання ЗВР дозволяє зменшити споживання енергетичних ресурсів на 41,9%, виснаження абіотичних ресурсів - на 47,1%, споживання води - на 21,2%, викиди парникових газів - на 23,9%, забруднення повітря - на 45,7%, забруднення води - на 32,9%. Розрахунки показали, що сумарний вплив бетону з ЗВР на довкілля (за методом Eco-indicator 99) є меншим на 25-30%, а викиди парникових газів скорочуються на 30-40 кг CO₂-екв/м³. Заміна 50% природного щебеню ЗВР дозволяє знизити екологічний слід бетону на 0,12 га/м³ або на 21,4%, що еквівалентно збереженню 1200 м² біологічно продуктивних територій на кожні 1000 м³ бетону.

На основі результатів досліджень розроблено практичні рекомендації щодо використання бетонів з заповнювачами з відходів руйнації при виготовленні збірних та монолітних конструкцій. Запропоновано шляхи вдосконалення нормативної бази та системи управління відходами руйнації в Україні, зокрема

створення національного стандарту щодо використання ЗВР у бетонах, розроблення концепції поводження з відходами руйнації на засадах циркулярної економіки, впровадження механізмів стимулювання їх переробки та повторного використання.

Результати роботи мають важливе значення для відновлення та розвитку будівельної галузі України на засадах сталості, ресурсо- та енергоефективності. Впровадження розроблених підходів та рекомендацій дозволить перетворити відходи руйнації на цінний будівельний ресурс, зменшити негативний вплив на довкілля, скоротити витрати на утилізацію відходів та закупівлю природної сировини. Використання бетонів з ЗВР сприятиме підвищенню рівня переробки будівельних відходів в Україні до 50-70%, що відповідає показникам провідних європейських країн.

Отримані наукові та практичні результати можуть бути використані проектними, будівельними та переробними компаніями, екологічними службами, органами державного управління та місцевого самоврядування для обґрунтування та реалізації проектів післявоєнної відбудови України на принципах циркулярної економіки та сталого розвитку. Соціальний ефект полягає у поширенні культури роздільного збору та переробки відходів серед населення, створенні нових робочих місць у сфері рециклінгу, покращенні якості життя громад внаслідок зменшення екологічного навантаження.

Таким чином, дисертаційна робота вирішує важливу науково-прикладну проблему ефективного управління відходами руйнації та їх використання в якості заповнювачів для бетону, що має значення для відновлення та сталого розвитку України в післявоєнний період. Подальше впровадження та масштабування запропонованих підходів та рішень дозволить зробити вагомий внесок у перехід будівельної галузі на модель циркулярної економіки, мінімізацію екологічних впливів та досягнення цілей сталого розвитку на національному та глобальному рівнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анісімова, Г., & Донець, О. (2022). Правові аспекти забезпечення безпековості поводження з відходами будівельно-ремонтних робіт в умовах воєнного стану. *Grail of Science*, (14-15), 153-159.
2. Аналітичний звіт з результатів дослідження законодавства. *Zero Waste Lviv*. (2024). URL: https://zerowaste.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/dodatok_2_analitychnyj_zvit_z_rezultativ_doslidzhennya_zakonodavstva.pdf (дата звернення: 01.06.2024).
3. Арутюнян, А. І., & Шуваєв, А. А. (2020). Екологічно-економічна доцільність комплексного управління потоками відходів в будівельній галузі. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 18, 9-17.
4. Берлінг, Р. З., Думич, О. Я., Сокіл, М. Б. (2022). Екологічна освіта в умовах війни: виклики та перспективи. *Екологічні науки*, (5), 123-129. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2022-eco-5-40-19>
5. Бойко, В.В., Кузьменко, А.О., & Хлевнюк, Д.В. (2017) Норми сейсмічної безпеки при проведенні вибухових робіт на кар'єрах *Вісник ЖДТУ. Технічні Науки*. Вип. № 2 (80). С. 214 – 224.
6. Бондаренко, В. В. (2020). Перспективна оцінка комплексу корисних копалин, супутніх залізу у межах Конкського залізорудного району (Середньопридніпровський мегаблок).
7. Відходи війни в Україні вже набули таких масштабів, яких на Європейському континенті не існувало з часів Другої світової війни: веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/vidhody-vijny-v-ukrayini-vzhe-nabuly-takyh-masshtabiv-yakuh-na-yevropejskomu-kontynenti-ne-isnuvalo-z-chasiv-drugoyi-svitovoyi-vijny/> (дата звернення 01.10.2023).
8. Відходи війни: веб-сайт. URL: <https://rubryka.com/article/waste-from-war/>. (дата звернення 21.11.2023).
9. Войціховська, А., Кравченко, О., Мелень-Забрамна, О., & Панькевич,

М. (2019). Кращі європейські практики управління відходами. Посібник. Видавництво «Компанія «Манускрипт». URL: http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2019/07/Krashchi_ES_praktuku_NET.pdf

10. Герасимчук, Л.О., Валерко, Р.А., & Довбаш В.В. (2022) Регіональний аспект поводження з відходами у Житомирській області в контексті сталого розвитку. Екологічні науки. № 1 (40). С. 104-109. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.19>.

11. Герасимчук, Л.О., Валерко, Р.А., Долінська, Н.Ф., & Вітер О.В.(2023) Аналіз стратегій поводження з твердими побутовими відходами в умовах Коростишівської територіальної громади. Екологічні науки. № 2 (47). С. 222-227. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.36>.

12. Герасимчук, Л.О., Валерко, Р.А., Ярошенко, Б.О., & Члек, О.М. (2022) Загрози довкілля внаслідок військових дій очима дітей. Екологічні науки. № 4 (43). С. 168-173. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.28>.

13. Герасимчук, Л.О., Валерко, Р.А., Ясінський, В.В., Піциль, А.О. & Соловйова, О.О.(2022) Державний контроль у сфері поводження з відходами на території Житомирської області. Екологічні науки. № 5 (44). С. 255-259. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.39>.

14. Громадська синергія. (2021). Чи стає Україна "зеленішою"? Експертне опитування щодо екологічної політики 2021: веб-сайт. URL: <https://www.civic-synergy.org.ua/analytics/chy-staye-ukrayina-zelenishoyu-ekspertne-opytuvannya-shhodo-ekologichnoyi-polityky-2021/> (дата звернення 15.11.2023).

15. Груздова, В. О., & Колошко, Ю. В. (2022). Особливості розвитку науки «Екологія України», її проблеми та наслідки (Doctoral dissertation, Одеський державний екологічний університет). URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/16039/1/%D0%9E%D0%B4%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%B0.pdf>

16. Гусєв, В. О., Смирнов, А. С., & Нікіфорова, Т. Д. (2022). Використання бетонних сумішей на основі продуктів рециклінгу будівельних відходів для

- зведення будівель методом 3d-друку. URL: <https://zenodo.org/records/6973379/files/Use%20of%20concrete%20mixtures%20based%20on%20construction%20waste%20recycling%20products%20for%20construction%20of%20buildings%20using%203D-printing.pdf>
17. Дворкін, Л.Й. (2007). Основи бетонознавства: Навчальний посібник / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. К.: Основа, 2007. 613 с.
 18. Дворкін, Л. Й., & Лаповська, С. Д. (2016). Будівельне матеріалознавство. Підручник. Рівне: НУВГП. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4741/1/V55.pdf>
 19. Дорожинський, О. (2017). Відходи будівництва та руйнації як вторинна сировина. Економіка України. № 11. С. 25-33.
 20. Доценко, К. О. (2021). Екологічні наслідки військових дій на сході України. Біологія та екологія, 7(1), 45-54.
 21. ДСТУ Б EN 197-1:2015 (EN 197-1:2011, IDT) Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів. К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 53 с.
 22. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. (2012). Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.
 23. ДСТУ Б В.2.7-32-95. (1996). Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури.
 24. ДСТУ Б В.2.7-75-98. (1999). Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України.
 25. Дрозд, О. В. (2023). Експертиза відходів руйнації на основі ознак структурної деградації матеріалів та перспективи рециклінгу. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34(73), № 4, 176-182. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/28>

26. Желібо, Є. П., Заверуха, Н. М., & Зацарний, В. В. (2001). Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації. Київ «Каравела», Львів «Новий Світ–2000», 248-252.

27. Загальна сума прямих збитків, завдана інфраструктурі України через війну, за підсумками червня 2023 року перевищила 150 млрд. Веб-сайт. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-pryamih-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-cherez-viynu-za-pidsumkami-chervnya-2023-roku-perevishhila-150-mlrd/> (дата звернення 25.07.2023)

28. Закон України "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо удосконалення механізму правового регулювання та посилення відповідальності у сфері поводження з відходами" від 18.12.2018 № 2621-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2621-19#Text> (дата звернення 10.06.2023)

29. Закон України "Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року" № 2697-VIII від 28.02.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення 05.02.2022)

30. Закон України "Про управління відходами" № 1657-IX від 20 червня 2021 р. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1657-20#Text> (дата звернення 05.02.2022)

31. Залуїн, В. Ф., & Щеглова, О. Ю. (2013). Управління розвитком та функціонуванням виробничо-економічної системи будівельних підприємств. Вісник Чернівецького торговельно-економічного інституту. Економічні науки, (2), 189-195.

32. Зварич, Р. & Зварич І. (2019). Розширена відповідальність виробника в концепції розвитку циркулярної економіки. Світ фінансів. №3 (60). С. 76-86. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/37106/1/%d0%97%d0%92%d0%90%d0%a0%d0%98%d0%a7.pdf>

33. Зигун, А. Ю. (2022). Організаційно-правові засади поводження з відходами в умовах воєнного стану. Економіка та право, (3), 52-60.

URL: <https://doi.org/10.15407/econlaw.2022.03.052>

34. Ільченко, А. В., Коцюба, І. Г., & Давидова, І. В. (2011). Математичне прогнозування об'ємів утворення твердих побутових відходів в місті Житомирі. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва, (76(2)), 118-125.

35. Кабінет Міністрів України. (2022). Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків (Постанова № 1073). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF#Text>

36. Казмиренко, Ю. О., & Дрозд, О. В. (2022). Системно-аналітичний підхід до підвищення ефективності рециклінгу виробничих скляних відходів. Вісник ЛТЕУ. Технічні науки, 29(2022), 13-20. URL: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-29-02>

37. Кірейцева, Г. В. & Палій, О. В. (2022). Аналіз найкращих світових практик впровадження системи розширеної відповідальності виробника (EPR). Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : тези доп. 7-го Міжнар. молодіж. конгресу, 10-11 лют. 2022 р. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка». С. 158.

38. Кірейцева, Г. В. & Палій, О. В. (2020) Екологічна політика як інструмент досягнення цілей сталого розвитку країни. Сталій розвиток країни в рамках Європейської інтеграції : тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 12 листоп. 2020 р. Житомир : Держ. ун-т «Житомирська політехніка». С. 16.

39. Кірейцева, Г.В., Циганенко-Дзюбенко, І.Ю., Пацева, І.Г., Демчук, Л.І. & Палій, О.В.(2023). Оцінка якісних показників поліетиленової плівки та її енвіроментологічний вплив. Екологічна безпека та технології захисту довкілля №4. С. 63-70

40. Коваленко, О. В., & Гуцал, І. А. (2022). Вплив війни на природно-

заповідний фонд України: загрози та перспективи відновлення. Екологічні науки, (2), 41-46.

41. Ковальов, В.В., Мироненко, В.П., Плуґін, А.А. & Плуґін, А.М. (2021) Екологічна безпека утилізації будівельних відходів у дорожньому будівництві України. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. № 94. С. 85-93. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.85>

42. Ковальчук, Н.В. & Павлюк, В.В. (2022). Проблеми поводження з будівельними відходами в умовах воєнного стану та шляхи їх вирішення. Екологічні науки, (5), 116-122. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2022-eco-5-40-18>

43. Коцюба, І. Г. (2016) Прогнозування сезонного морфологічного складу твердих побутових відходів м. Житомир. Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник наукових праць. Серія: Технічні науки. Маріуполь. Вип. 33. С. 213–222.

44. Коцюба, І.Г. & Ільченко, А.В. (2011). Використання програмного забезпечення з метою оптимізації системи поводження з твердими побутовими відходами міста Житомира. Екологічна безпека : наук. журн. Кременчук, 2011. Вип. № 1 (11). С. 13-16.

45. Коцюба, І. Г., Щербатюк, А. Ф., & Годовська, Т. Б. (2016). Прогнозування обсягів утворення твердих побутових відходів в місті Житомирі. Вісник національного технічного університету «ХП». Серія: механіко-технологічні системи та комплекси, (7), 95-100.

46. Коцюба, І. Г., Лефтер, Ю. О., Нонік, Л. Ю., Єльнікова, Т. О., & Герасимчук, О. Л. (2021). Аналіз сучасного досвіду та напрямів вирішення проблем управління твердими комунальними відходами. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*, (6(39)), 166-170. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.28>

47. Коцюба, І. Г., & Хрутьба, В. В. (2019). Методологія екологічного

краудсорсингу у сфері поводження з відходами. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*, (2(25)), 203-205.

48. Коцюба, І. Г. (2014). Математичне прогнозування обсягів утворення твердих побутових відходів у місті Житомирі. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, (1\72), 102-106.

49. Коцюба, І. Г., Подчашинський, Ю. О., Лико, С. М., & Лук'янова, С. М. (2017). Математичне моделювання та прогнозування обсягів накопичення твердих комунальних відходів міста. *Вісник Національного транспортного університету*, (2), 34–41.

50. Краснянський, М. Е., & Зубко, К. Ю. (2022). Управління відходами в умовах війни: екологічні та економічні аспекти. *Вісник економічної науки України*, (1), 66-73. [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.1\(42\)](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.1(42)).

51. Кривенко, П. В., & Гелевера, О. Г. (2021). Мікроскопічний аналіз порової структури заповнювачів з відходів руйнації. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, (194), 87-94.

52. Кривокульська, Н. (2022). Інформаційно-комунікативний супровід процесу екологічного управління в публічній сфері: вектори вдосконалення. *Вісник економіки*, (3), 22–37. URL:<https://doi.org/10.35774/visnyk2022.03.022>

53. Крот О.П., & Бойко Т.В. (2022). Проблеми поводження з відходами в умовах воєнного стану. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімічна технологія та екологія, (2), 74-81. URL: <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2022.02.12>

54. Крот, О. П., & Бойко, Т. В. (2022). Проблеми поводження з відходами в умовах воєнного стану. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, (2), 74-81.

55. Маковецька, Ю. М. (2022). Поводження з відходами руйнування в Україні: поточний стан та перспективи. *Економіка природокористування і сталий розвиток*, 2(1), 50-58.

56. Маковецька, Ю.М. (2021). Розширена відповідальність виробника:

сучасні принципи та досвід реалізації. Економіка природокористування і сталий розвиток, 8(29), 36-42. URL:[https://doi.org/10.37100/2616-7689/2021/8\(29\)/5](https://doi.org/10.37100/2616-7689/2021/8(29)/5)

57. Маслош, О. В., & Подкуйко, В. М. (2023). Потенціал утилізації бетонних відходів на деокупованих територіях: екологічні та економічні аспекти. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, (4 (280)), 25-36.

58. Міндовкілля. (2021). Екологічна політика України. URL: <https://mepr.gov.ua/timeline/Ekologichna-politika-Ukraini.html>

59. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2020). Стан сфери поводження з відходами в Україні за 2020 рік. URL: https://mepr.gov.ua/files/images/news_2021/23022021.pdf

60. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2021). Базовий план адаптації екологічного законодавства України до законодавства Європейського Союзу (Базовий план апроксимації). URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/eco/PLAN_ADAPTACIJI.pdf

61. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2021). Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2019 році. URL: <https://mepr.gov.ua/files/docs/Zvit/2019.pdf>

62. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2022). Рекомендації щодо поводження з відходами будівництва, ремонту та руйнування об'єктів інфраструктури. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Rekomendacii_BRV.pdf

63. Міністерство розвитку громад та територій України. (2022). Відходи будівництва, ремонту та руйнування об'єктів: поводження в умовах воєнного стану. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/building/pricing/vidhodivnictva-remontu-ta-rujnuvannya-ob-yektiv/>

64. Міністерство розвитку громад та територій України. (2022). Оцінка обсягів будівельних відходів та розрахунок потреби в облаштуванні майданчиків для їх складування і сортування на території України (станом на 01.08.2022). URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/building/pricing/otsinka-obsyagiv->

budivelnih-vidhodiv-ta-rozrahunok-potreby-v-oblashtuvanni-majdanchyktiv-dlya-yih-skladuvannya-i-sortuvannya-na-terytoriyi-ukrayiny-stanom-na-01-08-2022/

65. Міністерство розвитку громад та територій України. (2022). Оцінка обсягів будівельних відходів та розрахунок потреби в облаштуванні майданчиків для їх складування і сортування на території України (станом на 01.08.2022). URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/building/pricing/otsinka-obsyagiv-budivelnih-vidhodiv-ta-rozrahunok-potreby-v-oblashtuvanni-majdanchyktiv-dlya-yih-skladuvannya-i-sortuvannya-na-terytoriyi-ukrayiny-stanom-na-01-08-2022/>

66. Мінприроди України. (2015). Глосарій термінів з екології. URL: <https://mepr.gov.ua/content/glosariy-terminiv-z-ekologichnoi-tematiki.html>

67. Міщенко, В.С., Виговська, Г.П., Маковецька, Ю.М. & Омеляненко Т.Л. (2004). Управління та поводження з відходами : підручник. Київ : Вид-во "Київ. ун-т". 365 с.

68. Мурасов, Р.К., Куртсеїтов, Т.Л., Чумаченко, С.М., Луньова, О.В., Пиріков, О.В., Луньов, А.О., & Чумаченко, С.В. (2022). Математична модель оцінки загроз для об'єктів критичної інфраструктури в зоні ведення бойових дій. Науковий журнал "Проблеми програмування". Вип. 3-4.. С. 446-454.

69. Національний інститут стратегічних досліджень. (2018). Аналітична записка "Сучасний стан та перспективи екологічної політики України в контексті європейської інтеграції". URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/suchasniy-stand-ta-perspektivi-ekologichnoi-politiki-ukraini-v>

70. Нонік, Л., Пацева, І., Циганенко-Дзюбенко, І., Медвідь, О. & Дасевич, І. (2023). Визначення екологічних пріоритетів управління відходами (на прикладі полігону ТПВ м. Житомир). Проблеми хімії та сталого розвитку, 1, 18–26 URL: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-3>

71. Нонік, Л.Ю., Пацева, І.Г. & Пічкур, Т.В. (2023) Розроблення стратегії управління відходами руйнацій в умовах воєнного стану. Екологічна безпека та технології захисту довкілля №4. с. 40-47. URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/handle/123456789/8292>

72. Оцінка життєвого циклу: веб-сайт. URL: <https://www.maxzosim.com/otsinka-zhittevogo-tsiklu/> (дата звернення 18.12.2023).

73. Палій, О. В. & Кірейцева, Г. В. (2021). Аналіз міжнародного досвіду в сфері управління та поводження з відходами. Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції : тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 11 листоп. 2021 р. Житомир : Держ. ун-т «Житомирська політехніка». С. 65-66.

74. Палій, О. В. & Кірейцева, Г. В. (2021) Обґрунтування вибору технології видобутку блочного каменю на гранітних кар'єрах. Сучасні проблеми екології : тези XVII Всеукр. наук. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнар. участю, 15 квіт. 2021 р. Житомир : Держ. ун-т «Житомирська політехніка». С. 110.

75. Палій, О. В. & Кірейцева Г. В.(2021) Обґрунтування ресурсозберігаючої та екологічно безпечної технології видобутку блочного каменю на гранітних кар'єрах. Геотехнології гірництва та промислова екологія : тези Всеукр. наук.-практ. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених (присвяч. Дню науки), 11-15 трав. 2021 р. Житомир : Держ. ун-т «Житомирська політехніка». С. 110.

76. Палій О.(2024) Екологічні аспекти утилізації відходів руйнувань в Україні: використання переробленого матеріалу для сталого будівництва. Екологічні науки. № 1(52), Том 1. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.12>

77. 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 URL: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-4>

78. Пацева, І., Барабаш, О., Мельник-Шамрай, В. & Пацев І.(2023) Екологічна оцінка впливу пожеж у природних екосистемах на стан екологічної безпеки Житомирської області. Проблеми хімії та сталого розвитку. № 3. С. 59-65.

79. Пацева, І. & Нонік, Л. (2023). Рециклінг відходів руйнації - крок до зменшення ризиків воєнного екоциду. Проблеми хімії та сталого розвитку, 2023. №3. с. 73–81. URL:<https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-10>
80. Пацева, І.Г., Алпатова, О.М., Демчук, Л.І., Кірейцева, Г.В. & Левицький В.Г.(2022) Сучасний стан навколишнього природного середовища в умовах впливу війни. Екологічні науки : науково-практичний журнал. Вип. 4 (43). С.19-22.
81. Пацева, І.Г., Валерко, Р.А., Пацев, І.С. & Палій О.В.(2023) Особливості логістичних процесів транспортування комунальних відходів та відходів руйнації. Екологічні науки. № 5 (50). с.187-192. URL:<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.27>
82. Пацева, І.Г., Герасимчук, Л.О., Валерко, Р.А., Пацев, І.С. & Палій О.В. (2023). Особливості логістичних процесів транспортування комунальних відходів та відходів руйнації. Екологічні науки. Вип. 5 (50). с.187-192. URL:<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.27>
83. Пацева, І.Г., Герасимчук, О.Л. & Кагукіна А.М.(2022). Системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад. Екологічні науки. Вип. 43. С. 181-184
84. Постанова від 27.09.2022 № 1073 Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1073-2022-%D0%BF>
85. Потіп, М. М. (2023). Правове регулювання використання відходів війни як ресурсу для відновлення України. Нове українське право, (3), 106-114.
86. Пушкарьова, К.К., Дворкін, Л.Й., Дворкін, О.Л. & Бамбура, А.М. (2011).Управління поводженням з відходами : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2011. 185 с.
87. Радовенчик, В. М., & Гомеля, М. Д. (2021). Азбест у будівельних відходах: екологічні ризики та шляхи мінімізації. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря

Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 1(20), 50-58.

88. Рихліцька, О. В. (2023) Бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2023/radaphd/23182/disertaciya-rihlicka-ov.pdf>

89. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р "Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>

90. Рудько, Г.І., & Литвинюк, С.Ф. (2017). Стратегія розвитку мінерально-сировинної бази України. Мінеральні ресурси України, (2), 3-7. URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2017.2.3-7>

91. Сайт "Rubryka". (2022). Екологічна відбудова України: як має відновлюватись країна після війни. URL: <https://rubryka.com/article/ekologichna-vidbudova-ukrayiny/>

92. Сайт "Екологія - право - людина". (2024). Екологізація відбудови України: зарубіжний досвід та вітчизняні реалії. URL: <http://epl.org.ua/eco-analytics/ekologizatsiya-vidbudovy-ukrayiny-zarubizhnyj-dosvid-ta-vitchyznyani-realiyi/>

93. Сайт "Хмарочос". (2023). Руїни знову стануть будинками: як ресайклінг будівельного сміття може змінити відбудову. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2023/11/28/ruyiny-znovu-stanut-budynkamy-yak-resajkling-budivelnogo-smitty-mozhe-zminyty-vidbudovu/>

94. Сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. (2023). Відходи руйнації в Україні вже можна порівняти з кількістю твердих побутових відходів, що в середньому утворюються в країні за рік. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-vidkhody-ruinatsii-v-ukraini-vzhe-mozhna-porivniaty-z-kilkistiu-tverdykh-pobutovykh-vidkhodiv-shcho-v-serednomu-utvoriuiutsia-v-kraini-za-rik>

95. Сігал, О. І., & Павлюк, Н. Ю. (2022). Поводження з побутовими

відходами відповідно до європейського зеленого курсу. Дорожня карта реалізації Закону України «Про управління відходами»: збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Київ, 24–25 листопада 2022 р.). – К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2022. – 248 с., 12.

96. Склад бетону: веб-сайт. URL: <https://pl2t.com/uk/blog/post/sklad-betonu/>. (дата звернення 23.10.2023).

97. Смирнов, А. С. (2021). Огляд досліджень властивостей бетонів з використанням продуктів рециклінгу будівельних відходів.

98. Тверда, О. Я., Репін, М. В., Ткачук, К. К., & Горбачова, К. Ю. (2020). Впровадження моделі циркулярної або кругової економіки у гірничовидобувній галузі. Екологічні науки, 2(29), Том 1, 54-57. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.1.8>

99. Тверда, О. Я., Ткачук, К. К., Кофанов, О. Є., Кофанова, О. В., Вовк, О. О., & Бондаренко, А. О. (2022). Інтенсифікація видобутку будівельної сировини та виробництва будівельних матеріалів для відновлення порушеної інфраструктури України. Вісник НУВГП. Технічні науки, 1(97), 65-73. URL: <https://doi.org/10.31713/vt120227>

100. Токарчук, Д. М. (2022). Особливості утворення і поводження з відходами під час воєнних дій: досвід України. Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2022. № 2 (60). С. 109–122. DOI: 10.37128/2411-4413-2022-2-8.

101. Удовенко, І. О., & Харламова, О. В. (2022). Особливості поводження з відходами знищеної інфраструктури. Державне управління: теорія та практика, (1), 134-142. <https://doi.org/10.36030/2664-3618-2022-1-134-142>

102. Фролов, С. М., & Білопільська, О. О. (2013). Перспективи використання методу оцінки життєвого циклу в системі управлінні відходами в Україні. Ефективна економіка, (2).

103. Шевченко, О. В. (2019). Еколого-економічні аспекти використання

відходів гірничодобувної промисловості в контексті сталого розвитку регіонів. Ефективна економіка, (7). URL:<https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.7.46>

104. Шпаков, А. В., & Шпакова, Г. В. (2020). Актуалізація засад трансформації взаємовідносин інституціональних учасників будівельно-інвестиційного процесу. II Міжнародна науково-практична конференція «Spatial development of territories: traditions and innovations»(26-27 листопада 2020 р., м. Київ). К.: ДКС Центр, 200-202.

105. Abeysundara, Y., Babel, S. & Gheewala, S. (2009), A matrix in life cycle perspective for selecting sustainable materials for buildings in Sri Lanka, *Building and Environment*, 44, 997-1004.

106. Aïtcin, P. C. (2016). Portland cement. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 27-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>

107. Ajayi, S. O., & Oyedele, L. O. (2017). Policy imperatives for diverting construction waste from landfill: Experts' recommendations for UK policy expansion. *Journal of Cleaner Production*, 147, 57-65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.075>

108. Ali, M. M., Agarwal, S. K., & Pahuja, A. (2013). Feasibility of waste limestone as partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 3(3), 50-53.

109. Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymers in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.

110. Alsadey, S. (2015). Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete. *Journal of Agricultural Science and Engineering*, 1(2), 70-74. <https://doi.org/10.12691/jase-1-2-4>

111. Al-Saleh, S. A. (2015). Analysis of total chloride content in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 3, 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.06.001>

112. Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method.

Journal of Cleaner Production, 144, 192-202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>

113. Anastaselos, D., Giama, E. & Papadopoulos, A.M. (2009), 'An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions', *Energy and Buildings*, 41, 1165-1171.

114. Anastasiades K., Blom J., Buyle M., Audenaert A. Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020;117:109522. doi: 10.1016/j.rser.2019.109522.

115. Archtoolbox. Concrete Ingredients. URL: <https://www.archtoolbox.com>. (дата звернення 30.01.2024).

116. Azapagic, A. (1999), 'Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization', *Chemical Engineering Journal*, 37, 1-21

117. Baltakys, K., Sarapajevaite, G., & Dambrauskas, T. (2018). The influence of different additives on the early-stage hydration of calcium aluminate cement. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 134, 89-99.

118. Bayne, K. & Taylor, S. (2006) 'Attitudes to the use of wood as a structural material in nonresidential building application: Opportunities for growth', *Forest & Wood Products Australia*, Australia.

119. Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516.

120. Benachio, G. L. F., Freitas, M. D. C. D., Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046.

121. Bentur, A., Mindess, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 2nd Edition. CRC Press, 2007.

122. Berge, B. (2009) *The ecology of building materials*, 2nd Edition, Architectural Press, Elsevier, Oxford, UK.

123. Bond D. (2005) - "Technical and cost benefits of recycled and secondary aggregates: Supply chain case studies (Infrastructure)". DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF 13/09C, 54 p.
124. Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529-543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>
125. Bribian, I.Z., Capilla, A.V. & Uson, A.A. (2011) 'Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the ecoefficiency improvement potential', *Building and Environment*, 46, 1133-1140.
126. Brown, M. A., et al. (2016). The impact of construction and demolition waste on ecosystem services. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 1-12.
127. Browning Day: веб-сайт. URL: <https://browningday.com/news/lca-stages-matter-when-tracking-embodied-carbon/> (дата звернення 29.01.2022).
128. Cangialosi, F., Intini, G., Liberti, L., Notarnicola, M., & Stellacci, P. (2008). Health risk assessment of air emissions from a municipal solid waste incineration plant--a case study.. *Waste management*, 28 5, 885-95.
129. Carvalho, J., Fontes, W., Azevedo, C., Brigolini, G., Schmidt, W., & Peixoto, R. (2020). Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120530.
130. Cementing the European Green Deal. Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050.
131. Chini, A. R., Mbwambo, W. J. (1996). Environmentally friendly solutions for the disposal of concrete wash water from ready mixed concrete operations. *Proceedings of CIB W89 Beijing International Conference*, 21-24 October, Beijing, China.
132. Choudhary, B. S., Kumar, M., Gupta, M. K., & Nagar, R. (2020). Effect of waste marble dust on mechanical and durability properties of concrete. *Materials Today*:

Proceedings, 27, 1817-1821. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.766>

133. CML 2001 "Life Cycle Assessment, An operational guide to the ISO standards"; Van Oers L., de Koning A., Guinée J.B., Huppes G. (2002). Abiotic resource depletion in LCA

134. Coelho A.; de Brito J. (2013) - "Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part I: Energy consumption and CO₂ emissions". Waste Management, 33(5), pp. 1258-1267.

135. Coelho A.; de Brito J. (2013) - "Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part II: Environmental sensitivity analysis". Waste Management, 33(1), pp. 147-161.

136. Colangelo, F., Gómez Navarro, T., Farina, I., & Petrillo, A. (2020). Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: A circular economy mindset in Europe. The International Journal of Life Cycle Assessment, 25(9), 1790-1804.

137. Construction waste in Ukraine: What's the solution? URL: <https://property-forum.eu/news/construction-waste-in-ukraine-whats-the-solution/> (дата звернення 21.11.2023)

138. Cuenca-Moyano, G. M., Zanni, S., Bonoli, A., & Valverde-Palacios, I. (2014). Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates. Journal of Cleaner Production, 84, 691-700. URL:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.029>

139. Das, B. B., & Kondraivendhan, B. (2012). Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete. Construction and Building Materials, 28(1), 382-386.

140. Derwent R.G. et al. (1998). Global environmental impacts of the hydrogen economy. International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications, 1(1), 57-67.

141. Derwent R.G. et al. (1998). Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in northwest Europe calculated with a master chemical mechanism. Atmospheric Environment, 32(14-15), 2429-2441

142. Deshpande, N., Londhe, S., & Kumar, S. (2014). Evaluating recycled aggregate concrete on the basis of their mechanical and fresh properties. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(7), 14345-14354.
143. DETR (2000) - "Controlling the environmental effects of recycled and secondary aggregates production - Good practice guidance". Rotherham, UK, DETR, 143 p.
144. Dhir R. K., Henderson N. A., Limbachiya M. C. (ed.). *Sustainable Construction: Use of recycled concrete aggregate*. – London : Thomas Telford, 1998. – C. 525.
145. Dhir R. K.; Dyer T. D.; Whyte A. (2006) - "A guide to determining best practical environmental options for recycling demolition waste". Technical Report CTU/3806, RMC Environmental Project Fund 556, Scotland, UK, Concrete Technology Unit (CTU), 193 p.
146. Ding, T., & Xiao, J. (2014). Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai. *Waste management*, 34(11), 2327-2334.
147. Discrete Construction. Role of Water in Concrete Mix. Веб-сайт. URL: <https://discreteconstruction.com>. (дата звернення 30.01.2024).
148. Domone, P. (1998). The slump flow test for high-workability concrete. *Cement and Concrete Research*, 28, 177-182.
149. Drew, L., Sachs, J., & Langer, W. (2004). *Aggregate and the environment*, Environmental awareness series 8. Alexandria: American Geological Institute.
150. Drew, L., Sachs, J., & Langer, W. (2004). *Aggregate and the environment*, Environmental awareness series 8. Alexandria: American Geological Institute.
151. Du Plessis, C. (2007) 'A strategic framework for sustainable construction in developing countries', *Construction Management and Economics*, 25, 67-76.
152. Duan, H., Wang, J., & Huang, Q. (2015). Encouraging the environmentally sound management of C&D waste in China: An integrative review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 611-620. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.069>

153. Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*, 58, 19-29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>

154. Ekanayake, L.L. & Ofori, G. (2004) 'Building waste assessment score: design-based tool', *Building and Environment*, 39(7), pp. 851-861.

155. EN 1008:2002 - Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. Веб-сайт. URL: <https://www.intertekinform.com>. (дата звернення 04.06.2024).

156. EN 12350-2:2019, Testing fresh concrete - Part 2: Slump test, (2019).

157. EN 12390-11:2015 - Testing hardened concrete. Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. European Committee for Standardization (CEN).

158. EN 12390-3:2019, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2019).

159. EN 12390-5:2019. (2019). Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens. European Committee for Standardization.

160. EN 12620:2002, Aggregates for concrete. European Committee for Standardization, Brussels (2002).

161. EN 15804:2012 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardization.

162. EN 15978 "Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method"

163. EN 197-1:2011 - Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. European Committee for Standardization (CEN). (2024, January 30).

164. EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1:

General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium (2004).

165. Ericsson, M., & Löf, O. (2019). Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, 32(2), 223-250. URL:<https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>

166. Esa, M. R., Halog, A., Rigamonti, L. (2017). Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 219-229. URL:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.014>

167. Esin, T. (2007) 'A study regarding the environmental impact analysis of the building materials production (in Turkey)', *Building and Environment*, 42, 3860-3871.

168. Etxeberria, M. (2004). The durability of hardened concrete containing recycled aggregates (Doctoral dissertation, University of the Basque Country).

169. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, 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.

170. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

171. European Commission. "EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines." https://single-market-economy.ec.europa.eu/index_en?prefLang=uk

172. European Commission. (2021). EU Construction & Demolition Waste Management Protocol. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/45101/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>

173. European Commission. (n.d.). Waste Framework Directive. Environment. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en

174. European Commission. EU Construction & Demolition Waste Protocol. 2016.

175. European Environment Agency (EEA). "Construction and demolition waste:

challenges and opportunities in a circular economy." URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges>

176. Evangelista, L., & De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: A review. In *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (Vol. 18, Issue 2, pp. 129–172). URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>

177. Evangelista, L., & De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: A review. In *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (Vol. 18, Issue 2, pp. 129–172). URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>

178. Fay, R. & Treloar, G. (1998) ‘Life-cycle energy analysis - A measure of the environmental impact of buildings’, *Environment Design Guide*, Gen 22, Royal Australian Institute of Architects, NSW, 1-7.

179. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). (n.d.). *Waste Management in Germany 2018. Facts, data, diagrams*. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/abfallwirtschaft_2018_en_bf.pdf

180. Florez, L. & Castro-Lacouture, D. (2013) ‘Optimization model for sustainable materials selection using objective and subjective factors’, *Materials and Design*, 46, 310-321.

181. Flower, D., & Sanjayan, J. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 282–288.

182. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *The State of the World's Forests 2020. In brief*. URL: <https://doi.org/10.4060/ca8985en>

183. Forsberg, A. & von Malmberg, F. (2004) ‘Tools for environmental of the built environment’, *Building and Environment*, 39, 223-228.

184. Franzoni, E. (2011) ‘Materials selection for green buildings: which tools for engineers and architects?’, *Procedia Engineering*, 21, 883-890.

185. Frontczak, M. & Wargocki, P. (2011) ‘Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments’, *Building and Environment*, 46, 922-937.

186. Funtowicz S., Ravetz J. (1990). "Uncertainty and Quality in Science for Policy". Kluwer Academic Publishers
187. Gao, W., Ariyama, T., Ojima, T., & Meier, A. (2001), 'Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings', *Energy and Buildings*, 33(6), 553-562.
188. Gaur, V., Sharma, P., Sirohi, R., Awasthi, M., Dussap, C., & Pandey, A. (2020). Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review.. *Journal of hazardous materials*, 398, 123019 .
189. Gelardi, G., & Flatt, R. J. (2016). Working mechanisms of water reducers and superplasticizers. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 257-278. URL:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00011-4>
190. Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618-643. URL:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
191. Ghisellini, P., Ripa, M., Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618-643.
192. Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., & Hisada, M. (2016). Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research*, 79, 199-206. URL:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.007>
193. Group S. (1999) - "Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts". Report to DGXI, European Commission, 215 p.
194. Guggemos, A.A. & Horvath, A. (2005) 'Comparison of environmental effects of steel-and concrete-framed buildings', *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2), 93-101.
195. Guinée J.B. et al. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*; WMO (1999). *Scientific Assessment of Ozone Depletion:*

1998. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44, ISBN 92-807-1722-7, Geneva

196. Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T. C., Zhang, H., & Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251–259. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>

197. Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T. C., Zhang, H., & Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251–259. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>

198. Gupta, R.C., Thomas, B.S., Pandey, S. (2018). Utilization of recycled aggregate as an alternate construction material. *Journal of Building Engineering*, 19, 82-90.

199. Guthrie P. (1997) - "Waste minimisation and recycling in construction and demolition - A CIRIA project". Presented at Aggregates Advisory Service Seminar, Barbican, London, UK, 7 p.

200. Halliday, S. (2008), *Sustainable construction*, Butterworth-Heinemann, Sydney, Australia

201. Hamilton's Concrete. *The Basics of Concrete: Understanding Composition and Properties*. Веб-сайт. URL: <https://www.hamiltonsconcrete.com>. (дата звернення 30.01.2024).

202. Hammond, C.P. (2000) 'Energy, environment and sustainable development: a UK perspective', in *Institution of Chemical Engineers*, 78(B), 304-323.

203. Hansen, T. C. (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry* (Vol. 6). CRC Press.

204. Hansen, TC., 1986. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Mat. Constr.* 19 (3), 201–246. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02472036>.

205. Harmon, S. (2015). The Toxicity of Persistent Organic Pollutants to Aquatic Organisms. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 67, 587-613.

206. Hasan, M. S., Kayali, O., & Haque, M. N. (2020). Comparative study on the

properties of concretes incorporating different types of superplasticizer and microsilica. *Construction and Building Materials*, 237, 117707. URL:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117707>

207. Hassan, K. E., Cabrera, J. G., & Maliehe, R. S. (2000). The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. *Cement and concrete composites*, 22(4), 267-271.

208. Hauschild M.Z., Wenzel H. (1998). *Environmental Assessment of Products*. Vol. 2: Scientific background, Chapman & Hall, London;

209. Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer.

210. Heijungs R. et al. (1992). *Environmental life cycle assessment of products. Guide and Backgrounds*

211. Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London.

212. Hossain, M. U., Ng, S. T. (2018). Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, 205, 763-780.

213. Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P., & Amor, B. (2020). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948. URL:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>

214. Houssein, A. F., Wu, Z. (2022). A life cycle assessment framework for recycled aggregate concrete: Methods and case study. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129810.

215. Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y., Bleischwitz, R., & Ren, J. (2018). Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 36-44. URL:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>

216. Huberman, N. & Pearlmutter, D. (2008) 'A life-cycle energy analysis of

building materials in the Negev desert', *Energy and Buildings*, 40, 837-848

217. Huijbregts M.A.J. (1999). Life-cycle impact assessment of acidifying and eutrophying air pollutants. Calculation of characterisation factors with RAINS-LCA

218. International Energy Agency. (2019). Ukraine Energy Profile. URL:<https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>

219. Ip, K. & Miller, K. (2012) 'Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK, Resources', *Conservation and Recycling*, 69, 1-9.

220. IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

221. ISO (2006a) ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Geneva, International Standards Organization.

222. ISO 14040:2006. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization.

223. ISO 14044 "Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines";

224. ISO 14046 "Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines"

225. ISO 9001:2015. (2015). Quality management systems – Requirements.

226. ISO14040:2006, Environmental management – life cycle assessment – principles and framework,2006.

227. ISO14044:2006, Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines,2006.

228. Jang, Y., & Townsend, T. (2001). Occurrence of organic pollutants in recovered soil fines from construction and demolition waste.. *Waste management*, 21 8, 703-15 .

229. JCI-S-001-2003 - Method of Test for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure. Japan Concrete Institute (JCI).

230. Jenkin M.E., Hayman G.D. (1999). Photochemical ozone creation potentials

for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters. *Atmospheric Environment*, 33(8), 1275-1293;

231. Jin, R., Yuan, H., & Chen, Q. (2019). Science mapping approach to assisting the review of construction and demolition waste management research published between 2009 and 2018. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 175-188. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.029>

232. Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>

233. Khrutba V., Morozova T., Kotsiuba I., Shamrai V. Simulation Modeling for Predicting the Formation of Municipal Waste. In: Shkarlet S., Morozov A., Palagin A. (eds) *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. MODS 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1265. Springer, Cham. 2021. P. 24–35. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_3

234. Kireitseva H., Demchyk L., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80. pp. 267-276. URL: <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2170582>

235. Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. In *Construction and Building Materials* (Vol. 131, pp. 721–740). Elsevier Ltd. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>

236. Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. In *Construction and Building Materials* (Vol. 131, pp. 721–740). Elsevier Ltd. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>

237. Klopffer, W. (2006) ‘The role of SETAC in the development of LCA’, *International Journal of Life Cycle Analysis*, 11(1), 116-122.

238. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., & Althaus, H.-J. (2013). Comparative LCA

of recycled and conventional concrete for structural applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 909-918.

239. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, H.-J. (2013). Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 909-918.

240. Kohler, N. & Moffatt, S. (2003) Life-cycle analysis of the built environment, UNEP Industry and environment, sustainable building and construction, UNEP, April/September, 17-21.

241. Korniyko, Y., Osypenko, V. (2022). Recycling construction waste: challenges and perspectives. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1122, No. 1, p. 012010). IOP Publishing. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1122/1/012010>

242. Korpa, A., Kowalik, D. (2022). Recycling of construction and demolition waste as a pillar of the circular economy and sustainable development concept. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012008.

243. Kosmatka, S. H., Wilson, M. L. *Design and Control of Concrete Mixtures*, 16th Edition. Portland Cement Association, 2016.

244. Kucche, K. J., Jamkar, S. S., Sadgir, P. A. (2015). Quality of water for making concrete: A review of literature. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), 1-10.

245. Kucche, K. J., Jamkar, S. S., Sadgir, P. A. (2015). Utilization of industrial waste water for making concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(6), 51-54.

246. Kumar, A., & Singha Roy, D. K. (2018). Effect of partial replacement of cement with marble dust powder on the properties of concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 8(6), 1-5.

247. Kumar, D. S., Kalidas, N., & Ravikumar, S. (2019). Experimental study on partial replacement of cement with granite powder in concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(3S), 126-130.

248. Lamond, J., Pielert, J. (2006). *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*. ASTM International.
249. Landscape Supply. *All About Concrete: The Components, Functions, and Properties*. Веб-сайт. URL: <https://landscape-supply.com.au>. (дата звернення 30.01.2024).
250. Lauritzen, E. K. (2019). *Construction, Demolition and Disaster Waste Management: An Integrated and Sustainable Approach*. CRC Press.
251. Lemieux, P. M., et al. (2004). Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review. *Progress in energy and combustion science*, 30(1), 1-32.
252. Li, V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 2003, pp. 215-230.
253. Llatas, C., & Osmani, M. (2016). Development and validation of a building design waste reduction model. *Waste management*, 56, 318-36.
254. Lotfy, A., Al-Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 61, 36-43.
255. Lysychenko, G. V., & Khmil, H. A. (2021). Prospects for construction waste management in Ukraine during the post-war reconstruction period. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (1), 100-107. URL:[https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1\(50\)-100-107](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1(50)-100-107)
256. Mahpour, A. (2018). Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 216-227. URL:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.026>
257. Makovskaya, J. (2021). Determining the criteria of environmentally safe management of granite waste. *Environmental Problems*, 6(2), 80-86. URL:<https://doi.org/10.23939/ep2021.02.080>
258. Malumbela, G, Moyo, P, & Alexander, M. (2012). A step towards

standardising accelerated corrosion tests on laboratory reinforced concrete specimens. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 54(2), 78-85.

259. Mapei. (2021). DYNAMON END W202 R. Technical Data Sheet. URL:https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider47/products-documents/2121-dynamonendw202r-gb.pdf?sfvrsn=46c5a4f9_0.

260. Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Mechanisms of cement hydration. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 129-145. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>

261. Mbadike, E. M., Elinwa, A. U. (2011). Effect of salt water in the production of concrete. *Nigerian Journal of Technology*, 30(2), 105-110.

262. MDPI. Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/7/1700>. (дата звернення 30.01.2024).

263. MDPI. Recycled Aggregates Produced from Construction and Demolition Waste for Structural Concrete: Constituents, Properties and Production. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/19/5748>. (дата звернення 30.01.2024).

264. Mefteh, H., Kebaili, O., Oucief, H., Berredjem, L., & Arabi, N. (2013). Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 54, 282-288.

265. Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th Edition. McGraw-Hill Education, 2013.

266. Menegaki, M., & Damigos, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>

267. Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. *Concrete*, 2nd Edition. Prentice Hall, 2003.

268. Mmereki, D., et al. (2016). Hazardous and toxic waste management in developing world: A review of challenges and sustainable solutions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 51(14), 1175-1183.

269. Monier, V., Hestin, M., Cavé, J., Laureysens, I., Watkins, E., Reisinger, H., & Porsch, L. (2014). Development of Guidance on Extended Producer Responsibility (EPR). Deloitte, Copenhagen Resource Institute (CRI), IEEP, Ecologic Institute. URL: https://ec.europa.eu/environment/system/files/202110/final_report_epr_guidance_en.pdf
270. Nanthagopalan, P., & Haist, M. (2020). Influence of chemical admixtures on the rheological properties and early strength development of concrete. *Frontiers in Materials*, 7, 160. URL: <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00160>
271. Neville, A. M. *Properties of Concrete*, 5th Edition. Pearson Education Limited, 2011.
272. Neville, A. M., Brooks, J. J. *Concrete Technology*, 2nd Edition. Pearson, 2010.
273. Ng, L. S., Tan, L. W., & Seow, T. W. (2017). Current practices of construction waste reduction through 3R practice among contractors in Malaysia: Case study in Penang. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271(1), 012039. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012039>
274. Nixon, P.J., 1978. Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review. *Mat. Constr.* 11 (5), 371–378.
275. Noruzman, A. H., Muhammad, B., Ismail, M., Abdul-Majid, Z. (2012). Characteristics of treated effluents and their potential applications for producing concrete. *Journal of Environmental Management*, 110, 27-32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.019>
276. Nzihou, A., Themelis, N., Kemiha, M., & Benhamou, Y. (2012). Dioxin emissions from municipal solid waste incinerators (MSWIs) in France.. *Waste management*, 32 12, 2273-7 .
277. O. Ortiz, F. Castells, G. Sonnemann, Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 28–39.
278. OECD. (2016). *Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management*. URL: <https://doi.org/10.1787/9789264256385-en>

279. OECD. (n.d.). Country profiles on Extended Producer Responsibility. URL:<https://www.oecd.org/environment/waste/extended-producer-responsibility.htm>
280. Originally published on January 29, 2021 by BNP Media through the Building Enclosure Blog: веб-сайт URL: <https://www.buildingenclosureonline.com/blogs/14-the-be-blog/post/89547-lca-stages-matter-when-tracking-embodied-carbon> (дата звернення 02.02.2024).
281. Ortiz, O., Castells, F. & Sonnemann, G. (2009) 'Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA', *Construction and Building Materials*, 23, 28-39.
282. Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. Reusing waste materials in construction: Recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2010, pp. 201-209.
283. Page, I. (2006) *Timber in government buildings - cost and environmental impact analysis*, BRANZ Publication.
284. Pali O., Sirico A., Belletti B., Bernardi P. Building a Sustainable Future: Database of Concrete with Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024. p. 167-174. 16. URL:<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.025>
285. Pastor, J., & Hernández, A. (2012). Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: determinants for restoring their impact.. *Journal of environmental management*, 95 Suppl, S42-9 .
286. Perez-Garcia, J., Lippke, B., Briggs, D., Wilson, J.B., Bowyer, J. & Meil, J. (2005) 'The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction', *Wood and Fibre Science*, 37, 3-17.
287. Petruk R., Lunova O., Garkushevsky V. Improvement of the methodology of safe routes in the transport of dangerous substances and cargo *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 5. pp. 112-120.
288. Pfister S., Koehler A., Hellweg S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098-4104.

289. Plank, J., Schroefl, C., Gruber, M., Lesti, M., & Sieber, R. (2009). Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: The importance of PCE compatibility with silica fume. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(1), 5-12. URL:<https://doi.org/10.3151/jact.7.5>

290. Plaza P., Sirico A., Pali O., Belletti B., Bernardi P., Medina C., Sánchez J. Chloride migration for concrete containing recycled aggregate and supplementary cementitious material. *ELETTRONICO*. 2023. P. 1-4. URL: <https://air.unipr.it/handle/11381/2970132> (дата звернення: 14.04.2024).

291. PRO Europe. (n.d.). Best practices: the map of extended producer responsibility (EPR) for packaging in Europe. URL: <https://www.pro-e.org/best-practices>

292. Pushkar, A., & Bobalo, T. (2022). Municipal solid waste management strategies as a response to circular economy challenges. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(3), 63-68. URL:<https://doi.org/10.36930/40320310>

293. Pushkar, V., & Tymoshenko, O. (2022). Prospects for the disposal of war destruction waste. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1080, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. URL:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1080/1/012011>

294. Pushkar, V., & Tymoshenko, O. (2022). Prospects for the disposal of war destruction waste. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1080, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1080/1/012011>

295. R. V. Silva, J de Brito, R K Dhir “Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste” *Construction and Building Materials*, 65, 2014, pp 201-217.

296. Ramesh, T., Prakash, R. & Shukla, K.K. (2010) ‘Life cycle energy analysis of buildings: an overview’, *Energy and Buildings*, 42(10), 1592-1600.

297. Ramezani-pour, A. A., & Riahi Dehkordi, E. (2017). Effect of combined sulfate-chloride attack on concrete durability-A review. *AUT Journal of Civil Engineering*, 1(2), 103-110.

298. Recovery rate of construction and demolition waste (CDW) in the European Union (EU-27) in 2020, by country: веб-сайт. URL: <https://www.statista.com/statistics/1316268/recovery-rate-of-construction-and-demolition-waste-eu-by-country/> (дата звернення 01.08.2023).

299. Recycled Aggregates from Construction Demolition Wastes - Types, Classification and Uses. Веб-сайт. URL: <https://theconstructor.org/concrete/recycled-aggregates-construction-demolition-wastes-classification/15845/>. (дата звернення 04.06.2024).

300. RILEM RC6: 1983. Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. RILEM Recommendation RC6. Materials and Structures, 2nd final edn.

301. RILEM Technical Committee 121-DRG. (1995). Specification for concrete with recycled aggregates. Materials and Structures, 28(176), 559-562. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02473172>

302. RILEM Technical Committee 127-CSC. (1994). Cracking and deformations. Materials and Structures, 27(172), 505-507. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02473040>

303. RILEM Technical Committee. (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates. Materials and Structures, 27(173), 557-559.

304. RILEM Technical Committee. (2014). Criteria for the use of coarse recycled concrete aggregates in new concrete production. Materials and Structures, 47(10), 1737-1745. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0415-4>

305. Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2020). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. Construction and Building Materials.

306. Rosenbaum R.K. et al. (2008). USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment; ISO 14046 "Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines"

307. Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: A review. Journal of Civil

- Engineering and Management, 19(6), 796–810.
URL:<https://doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>
308. Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: A review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 796–810.
URL:<https://doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>
309. Saghafi, M.D. & Teshnizi, Z.S.H. (2011) ‘Recycling value of building materials in building assessment systems’, *Energy and Buildings*, 43, 3181-3188.
310. Savytskyi, M., Bendak, A., & Voloshynova, H. (2021). Recycled materials for sustainable construction: A state-of-the-art review. *Journal of Engineering Science*, 8(2), D8-D14. URL:[https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(2\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).d2)
311. Schaffartzik, A., Mayer, A., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Loy, C., & Krausmann, F. (2014). The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010. *Global Environmental Change*, 26, 87-97.
URL:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.013>
312. Schwarzböck, T., et al. (2022). A review on environmental impacts of (construction) waste incineration residues: Leaching, treatments, and utilization. *Chemosphere*, 287, 132209.
313. Seramco - Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products. Inforegio - EU Regional and Urban Development. URL:
https://ec.europa.eu/regional_policy/fr/projects/Luxembourg/five-countries-combine-efforts-to-recycle-construction-and-demolition-waste
314. Serdiuk, L., Ryzhakova, G. (2022). Economic aspects of the use of recycled construction waste in the restoration of destroyed infrastructure in Ukraine. *Economics, Finance and Management Review*, (3), 58-64. URL: <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2022-3-58>
315. Serres, N., Braymand, S., & Feugeas, F. (2016). Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 5, 24-33.

316. SETAC (1993) Guidelines for life cycle assessment: a code of practice, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Washington DC, US.

317. Shekhovtsova, I., Voloshynova, H., & Bendak, A. (2021). Analysis of the current state of construction waste management in Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 628(1), 012024. URL:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/628/1/012024>

318. Sika Limited. Concrete Components. URL: <https://gbr.sika.com>. (дата звернення 30.01.2024).

319. Sika. Concrete Admixtures: A Comprehensive Guide. Веб-сайт. URL: <https://www.sika.com>. (дата звернення 30.01.2024).

320. Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19(7), 825–849. URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>

321. Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19(7), 825–849. URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>

322. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2018). Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. In Construction and Building Materials (Vol. 178, pp. 19–31). Elsevier Ltd. URL:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>

323. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2018). Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. In Construction and Building Materials (Vol. 178, pp. 19–31). Elsevier Ltd. URL:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>

324. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. Journal of Cleaner Production, 236, 117629. URL:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>

325. Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste

aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31.

326. Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31. URL:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>

327. Solomon S. (1999). Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 37(3), 275-316;

328. Sterner, E. (2002) 'Green procurement of buildings: A study of Swedish clients' considerations', *Construction Management and Economics*, 20, 21-30.

329. Structural Guide. Concrete Ingredients and Important Aspects. Веб-сайт. URL: <https://www.structuralguide.com>. (дата звернення 30.01.2024).

330. Sturges, J. (1999) 'Towards sustainable construction materials selection for the new millennium', *Proceedings of COBRA 1999, The challenge of change: Construction and building for the new millennium*, 1-2 September, University of Salford, Salford

331. Swedish Environmental Protection Agency. (2018). Waste management in Sweden. <http://www.naturvardsverket.se/en/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Avfall/Avfallshantering-i-Sverige/>

332. Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163-1167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>

333. Tam, V. W. (2007). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 821-828. URL:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.004>

334. Tam, V. W. Y., Soomro, M., Evangelista, A. C. J . (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272-292.

335. Tam, V. W. Y., Wattage, H., Le, K. N., Buteraa, A., & Soomro, M. (2021). Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical

review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 270). Elsevier Ltd. URL:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121490>

336. Tam, V. W. Y., Wattage, H., Le, K. N., Buteraa, A., & Soomro, M. (2021). Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 270). Elsevier Ltd. URL:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121490>

337. Tam, V., & Lu, W. (2016). Construction Waste Management Profiles, Practices, and Performance: A Cross-Jurisdictional Analysis in Four Countries. *Sustainability*, 8, 190.

338. The Constructor. Applications of Reinforced Concrete. Веб-сайт. URL: <https://theconstructor.org>. (дата звернення 30.01.2024).

339. The Constructor. Recycled Aggregates from Construction Demolition Wastes - Types, Classification and Uses. Веб-сайт. URL: <https://theconstructor.org/concrete/recycled-aggregates-construction-demolition-wastes-classification/15845/>. (дата звернення 30.01.2024).

340. This Ukrainian company is hoping to rebuild from the ground up - with recycled concrete. URL: <https://www.euronews.com/green/2023/04/05/this-ukrainian-company-is-hoping-to-rebuild-from-the-ground-up-with-recycled-concrete> (дата звернення 05.05.2023)

341. Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19, 349–365. URL:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.007>

342. Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19, 349–365. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.007>

343. Thormark, C. (2000) 'Environmental analysis of a building with reused building materials', *Building Research & Information*, 28(3), 176-183.

344. Toutanji, H. A., Delatte, N. J. *Ultra-high Performance Concrete (UHPC)*. CRC Press, 2016.

345. Treloar, G. J., Love, P.E.D. & Faniran, O.O. (2001) 'Improving the reliability of embodied energy methods for project life-cycle decision making', *Logistics Information Management*, 14(5/6), 303-317.

346. Ukraine looks to rebuild with C&D waste • Recycling International. URL: <https://www.recyclinginternational.com/construction-demolition/ukraine-looks-to-rebuild-with-cd-waste/> (дата звернення 15.04.2023)

347. UNEP (2022). Waste Management Outlook for Ukraine: Building a Sustainable Future from the Rubble of War. URL: <https://www.unep.org/resources/report/waste-management-outlook-ukraine-building-sustainable-future-rubble-war>

348. UNESCO. (n.d.). Biodiversity & Genetic Erosion. URL: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/special-themes/biodiversity/biodiversity-and-genetic-erosion/>

349. United Nations Environment Programme. (2015). Disaster Waste Management. URL: https://postconflict.unep.ch/publications/UNEP_DWM.pdf

350. United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>

351. USAID. (2020). Ukraine Country Development Cooperation Strategy (CDCS). URL: https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/USAID_Ukraine_CDCS_External_clean_November_2020.pdf

352. Vaidevi, C. (2013). Study on marble dust as partial replacement of cement in concrete. *Indian journal of engineering*, 4(9), 14-16.

353. Van Zelm R. et al. (2008). European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment*, 42(3), 441-453

354. Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 133, pp. 30–49). Elsevier B.V. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>

355. Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 133, pp. 30–49). Elsevier B.V. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>

356. Vijayalakshmi, M., Sekar, A. S. S., & Ganesh prabhu, G. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, 46, 1-7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>

357. Wang, J., et al. (2019). Water pollution from construction and demolition waste and its treatment: a review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1029-1044.

358. Watkins, E., Gionfra, S., Schweitzer, J.-P., Pantzar, M., Janssens, C., ten Brink, P. (2017). *EPR in the EU Plastics Strategy and the Circular Economy: A focus on plastic packaging*. Institute for European Environmental Policy (IEEP). URL: <https://ieep.eu/uploads/articles/attachments/95369718-a733-473b-aa6b-153c1341f581/EPR%20and%20plastics%20report%20IEEP%209%20Nov%202017%20final.pdf>

359. Weil, M., Jeske, U., Schebek, L. (2006). Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. *Waste Management & Research*, 24(3), 197-206.

360. Wendling, Z. A., Emerson, J. W., de Sherbinin, A., Esty, D. C., et al. (2020). *2020 Environmental Performance Index*. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. Retrieved from URL: <https://epi.yale.edu/downloads/epi2020report20210112.pdf>

361. WHO (2022). *Environmental health in emergencies: Ukraine crisis*. URL: <https://www.who.int/emergencies/situations/ukraine-crisis/environmental-health>

362. Wijayasundara, M., Mendis, P., Crawford, R. H. (2017). Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 321-334.

363. WMO (2018). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*. Global

Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 58. Geneva, Switzerland;

364. Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2006). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187-1194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.020>

365. Xiao, W., Yang, J., Fang, H., Zhuang, J., Ku, Y., & Zhang, X. (2020). Development of an automatic sorting robot for construction and demolition waste. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 1829 - 1841.

366. Yousuf, S., Shafiqh, P., Alsubari, B., Aslam, M., & Jhatial, A. A. (2019). Effects of high volume fly ash on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Sustainability*, 11(16), 4342. URL: <https://doi.org/10.3390/su11164342>

367. Yusof, N., Abidin, N., Zailani, S., Govindan, M., & Iranmanesh, M. (2016). Linking the environmental practice of construction firms and the environmental behaviour of practitioners in construction projects. *Journal of Cleaner Production*, 121, 64-71.

368. Zakaria, M. (1990). Properties of concrete containing recycled concrete aggregate. Department of Civil Engineering, University of Leeds, UK.

ДОДАТКИ

Викопіювання з бази даних Excel щодо основних властивостей заповнювачів з рециклінгу бетону за якими проводився відбір матеріалу

1				
2	The main properties of RA			
3	SSA density (kg/m3)	Oven-Dried density (kg/m3)	Water absorption of recycled aggregates (%)	Dimension of recycled aggregate, mm
4	2300-2750	2100-2640	2,4-7,55	4-30
5				
6				
7				
8				
9	Fresh Density of the mix, kg/m ³	2017-2478		
10	Density of the mix after 28 days, kg/mm	2110-2530		
11	Workability/slump test, mm	25-220		
12	28 days Compressive strength, MPa	13,9-74,90		
13	Tensile splitting strength, MPa	1,3-5,7		
14	Flexural strength, MPa	2,62-7,3		
15	Elastic modulus, MPa	11300-43500		
16	Shrinkage, μm/m	85-700		
17	Water absorption, %	1,2-11,8		
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

1. Палій О., Пацева І., Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І. Використання відходів гірничо-видобувної галузі, як альтернативної сировини у будівництві. Проблеми хімії та сталого розвитку, 2023. № 1. С. 27–35. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-4> (заг. обсяг 0,74 друк. арк., особисто автору належить 0,19 друк. арк.)

2. Пацева І.Г., Валерко Р.А., Пацев І.С., Палій О.В. Особливості логістичних процесів транспортування комунальних відходів та відходів руйнації. Екологічні науки. 2023. № 5 (50). с.187-192. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.27> (заг. обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,19 друк. арк.)

3. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Пацева І.Г., Демчук Л.І., Палій О.В. Оцінка якісних показників поліетиленової плівки та її енвайроментологічний вплив. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2023. №4. С. 63-70 https://ecocorptzd.com.ua/gallery/%D0%95%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0%20%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D0%B0%204_2023.pdf (заг. обсяг 0,74 друк. арк., особисто автору належить 0,28 друк. арк.)

4. Палій О. Екологічні аспекти утилізації відходів руйнувань в Україні: використання переробленого матеріалу для сталого будівництва. Екологічні науки. 2024. № 1(52), Том 1. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.12> (заг. обсяг 0,56 друк. арк., особисто автору належить 0,56 друк. арк.)

2. Статті та публікації у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Kireitseva H., Demchyk L., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. International Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 80. pp. 267-276.

<https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2170582> (заг. обсяг 1,0 друк. арк., особисто автору належить 0,25 друк. арк.)

2. Palii O., Sirico A., Belletti B., Bernardi P. Building a Sustainable Future: Database of Concrete with Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024. p. 167-174. 16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.025> (заг. обсяг 0,69 друк. арк., особисто автору належить 0,3 друк. арк.)

3. Plaza P., Sirico A., Palii O., Belletti B., Bernardi P., Medina C., Sánchez J. Chloride migration for concrete containing recycled aggregate and supplementary cementitious material. *ELETTRONICO*. 2023. P. 1-4. URL: <https://air.unipr.it/handle/11381/2970132> (заг. обсяг 0,32 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.).

3. Публікації за доповідями та матеріалами міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій:

1. Коцюба І.Г., Кірейцева Г.В., Палій О.В. Екологічна політика як інструмент досягнення цілей сталого розвитку країни. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 12 листопада 2020 р., Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. С.16 (заг. обсяг 0,23 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.)

2. Коцюба І.Г., Палій О.В., Кірейцева Г.В. Обґрунтування ресурсозберігаючої та екологічно безпечної технології видобутку блочного каменю на гранітних кар'єрах. Тези XVII Всеукраїнська наукова on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю «Сучасні проблеми екології». 15 березня 2021 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021, С. 110. (заг. обсяг 0,12 друк. арк., особисто автору належить 0,06 друк. арк.)

3. Коцюба І.Г., Палій О.В., Кірейцева Г.В. Аналіз міжнародного досвіду в сфері управління та поводження з відходами. Тези Всеукраїнської науково-

практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 11 листопада 2021 р., Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. С. 65 (заг. обсяг 0,17 друк. арк., особисто автору належить 0,07 друк. арк.)

4. Кірейцева Г.В., Палій О.В. Аналіз найкращих світових практик впровадження системи розширеної відповідальності виробника (EPR). Тези доповідей 7-го Міжнародного молодіжного конгресу «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 10-11 лютого 2022, Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2022. С.158. (заг. обсяг 0,11 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.)

5. Пацева І.Г., Палій О.В., Кірейцева Г.В. Аналіз шляхів використання відходів, отриманих внаслідок видобування блочної сировини, як основних компонентів бетонних сумішей. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 30 листопада 2022 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. С. 39 (заг. обсяг 0,2 друк. арк., особисто автору належить 0,1 друк. арк.)

6. Кірейцева Г.В., Палій О.В., Кірейцев В.О. Характеристика відходів, отриманих внаслідок видобування блочної сировини. Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів», 17 листопада 2022 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. С. 43 (заг. обсяг 0,07 друк. арк., особисто автору належить 0,03 друк. арк.)

7. Палій О.В., Кірейцева Г.В., Кірейцев В.О. Значення оцінки життєвого циклу (LCA) для сталого будівництва. Тези Всеукраїнської науково-практичної online конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія» (присвячена Дню науки)». 15 травня 2024 року, Житомир:

Державний університет «Житомирська політехніка». С. 220-221. (заг. обсяг 0,21 друк. арк., особисто автору належить 0,11 друк. арк.)

8. Палій О.В., Кірейцев В.О. Етапи оцінки життєвого циклу будівельних матеріалів. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія» (присвячена Дню науки)». 15 травня 2024 року, Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». С. 222-223. (заг. обсяг 0,09 друк. арк., особисто автору належить 0,06 друк. арк.).



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
 Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005
 103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005
 Phone/fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015
 QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015

Від 13.03.2024 № 44-23.07/356
 На № _____ від _____

ДОВІДКА

*про впровадження результатів наукового дослідження
 ПАПІЙ Ольги Вікторівни в навчальний процес
 Державного університету «Житомирська політехніка»*

Засвідчую, що наукові та науково-практичні результати й рекомендації щодо їх впровадження здобувача кафедри екології та природоохоронних технологій О.В.Палій щодо підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону використовуються в навчальному процесі денної та заочної форм навчання факультету гірничої справи, природокористування та будівництва Державного університету «Житомирська політехніка».

Пропозиції з удосконалення навчальних дисциплін "Стратегічне управління для сталої реконструкції та реставрації в природоохоронній сфері", "Ресурсозберігаючі технології та рециклінг", "Інтегроване управління відходами" впроваджені у навчальний процес університету при підготовці фахівців за освітньо-професійними рівнями бакалавр і магістр за спеціальностями 101 «Екологія, 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

На основі пропозицій та висновків, наведених в дисертації О.В.Палій, підготовлений навчально-методичний комплекс у складі навчальних програм дисциплін, навчально-методичного забезпечення до семінарських і практичних занять і самостійної підготовки студентів, що забезпечують високий рівень навчального процесу та підготовку висококваліфікованих фахівців.

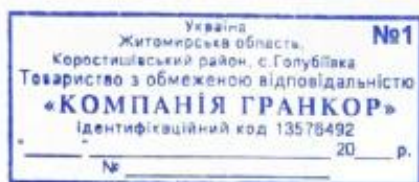
Аналіз результатів впровадження пропозицій свідчить про підвищення якісних критеріїв оцінки знань студентів відповідних дисциплін, формування у студентів компетентностей щодо інноваційних підходів до управління відходами, еколого-економічних аспектів рециклінгу, застосування принципів циркулярної економіки в процесах відновлення зруйнованої інфраструктури.

Використання результатів дослідження О.В.Палій свідчить про їх завершеність, реальність і можливість впровадження у навчальний процес закладів вищої освіти.

Перший проректор



Оксана ОЛІЙНИК



ДОВІДКА

про використання результатів наукового дослідження в діяльності ТОВ "Компанія Гранкор"

Засвідчую, що в рамках наукового дослідження Палій Ольги Вікторівни на тему "Підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону" запропоновано та розроблено рекомендації, які можуть бути використані в діяльності ТОВ "Компанія Гранкор".

Зокрема, розроблено рекомендації щодо створення пілотного проєкту з використання відходів руйнації як сировини для виробництва будівельних матеріалів, таких як: використання подрібнених відходів руйнації як основної сировини для виробництва щебеню, який може бути використаний у дорожньому будівництві та інших інфраструктурних проєктах; впровадження технологій виготовлення бетонних блоків з використанням матеріалів з відходів рециклінгу, що сприятиме зменшенню витрат на сировину та підвищенню екологічної безпеки виробництва; використання відходів руйнації для виробництва тротуарної плитки, що дозволить створювати міцні та екологічно безпечні будівельні матеріали.

Реалізація запропонованих рекомендацій дозволить ТОВ "Компанія Гранкор" не лише оптимізувати виробничі процеси, але й сприятиме розвитку циркулярної економіки та підвищенню екологічної безпеки в регіоні.

Директор



Худяков О.І.

ТОВ «ЦЕНТР БІОПАЛИВА»
04073, м. Київ, пр. Степана Бандери, будинок 11,
Код ЄДРПОУ: 40220010 Витяг ПДВ № 1726544501156,
ПІН 402200126541, Е-mail: 3adocuments@ukr.net

Вих. № 090624 від 09 червня 2024р

ДОВІДКА

про використання результатів наукового дослідження в діяльності
ТОВ "Центр біопалива"

Засвідчую, що в рамках наукового дослідження Палій Ольги Вікторівни на тему "Підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону" розроблено методичні рекомендації, які можуть бути використані в діяльності ТОВ "Центр біопалива".

Зокрема, розроблено методичні рекомендації щодо можливостей виробництва альтернативного палива з органічної складової відходів руйнації (деревини, паперу, текстилю тощо) шляхом їх подрібнення, сушки та гранулювання.

Реалізація запропонованих методичних рекомендацій дозволить ТОВ "Центр біопалива" не лише підвищити ефективність своїх виробничих процесів, але й сприятиме покращенню екологічної ситуації в регіоні за рахунок зменшення обсягів відходів та їх ефективного використання у виробництві альтернативного палива.

Директор ТОВ Центр біопалива
Вовк Вадим





ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА ІНСПЕКЦІЯ УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА ІНСПЕКЦІЯ
ПОЛІСЬКОГО ОКРУГУ**

вул. Л.Качинського, 12а, м. Житомир, 10014, тел./факс: (0412) 42-24-38

e-mail: polissya@dei.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 42163803

від 09.06.2024 р. № 9086/02 на № _____ від _____ 20__ р.

ДОВІДКА

**про використання результатів наукового дослідження в діяльності
Державної екологічної інспекції Поліського округу**

Засвідчую, що в рамках наукового дослідження Палій Ольги Вікторівни на тему "Підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону" розроблено рекомендації, які можуть бути використані в діяльності Державної екологічної інспекції Поліського округу.

Рекомендації передбачають включення в регіональну програму управління відходами руйнації в Житомирській області наступних заходів: створення інфраструктури для збору, сортування та переробки будівельних відходів та механізмів економічного стимулювання рециклінгу, включаючи пільгові тарифи на переробку відходів, субсидії для підприємств, що використовують перероблені матеріали у виробництві бетону, та встановлення обов'язкових вимог щодо мінімального вмісту рециклінгових матеріалів у бетонних сумішах для будівельних проектів.

У своїй діяльності Державна екологічна інспекція Поліського округу планує використовувати рекомендації за результатами даного дослідження для:

- моніторингу та контролю процесів збору, сортування та переробки будівельних відходів;
- розробки та впровадження нормативних документів для стимулювання рециклінгу відходів у будівельній галузі;
- інформування та навчання підприємств та організацій щодо переваг використання рециклінгових матеріалів у виробництві бетону;
- сприяння розвитку циркулярної економіки в регіоні шляхом зменшення обсягів видобутку природних заповнювачів для бетону.

Реалізація запропонованих рекомендацій дозволить максимально залучити відходи руйнації як вторинні ресурси у процеси відновлення зруйнованих територій та об'єктів у Житомирській області, зменшити навантаження на полігони та звалища, а також підвищити екологічну безпеку

за рахунок зменшення обсягів видобутку природних заповнювачів для бетону.

Результати дослідження рекомендовано використати при розробці та впровадженні регіональної програми управління відходами руйнації в Житомирській області.

Начальник



Євгеній МЕДВЕДОВСЬКИЙ