

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Зінченко Олексій Сергійович

УДК 691.32:628.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**БЕТОНИ, БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ ТА КОМПОЗИЦІЙНІ ПОЛІМЕРНІ
МАТЕРІАЛИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІФРАКЦІЙНИХ
РЕЦИКЛІНГОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ ІЗ ЗАЛІЗНИЧНИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ**

Спеціальність – 192 Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань – 19 Архітектура та будівництво

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. Зінченко

Науковий керівник:

Трикоз Людмила Вікторівна,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Зінченко О.С. Бетони, будівельні розчини та композиційні полімерні матеріали з використанням поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізничних залізобетонних шпал. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю – 192 Будівництво та цивільна інженерія. – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2026.

Метою дисертації є розроблення бетонів, будівельних розчинів та полімерних композиційних матеріалів із використанням поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал шляхом встановлення закономірностей формування їх структури, властивостей та оптимізації технологічних параметрів для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик. Дисертація виконана на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку із 161 джерела, 5 додатків.

Вступ містить загальну характеристику роботи з обґрунтуванням актуальності обраної теми, показано її зв'язок з науковими темами, сформульовано мету, описано об'єкт і предмет дослідження та завдання, викладено наукову новизну, достовірність і практичне значення результатів, наведено дані про їх впровадження. У сучасних умовах, коли наслідки воєнних дій та інших катастроф спричиняють різке зростання обсягів будівельних відходів, особливо актуальною стає проблема утилізації та повторного використання залізобетонних конструкцій. Зростання потоків відходів, спричинене як природним старінням інфраструктури, так і руйнуваннями від воєн, техногенних аварій та природних катаклізмів, перевантажує існуючі системи управління та створює екологічні й економічні виклики. В Україні додатково постає питання утилізації залізобетонних шпал, термін експлуатації

яких добігає кінця, а також їх заміни у зв'язку з переходом на Євроколію. У цьому контексті розроблення будівельних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних шпал є актуальним. Про актуальність свідчить також включення досліджень до складу держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України.

Метою дослідження є розроблення бетонів, будівельних розчинів та композиційних полімерних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал. **Предмет досліджень** – бетони, будівельні розчини та композиційні полімерні матеріали на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал. **Об'єкт досліджень** – склад, структура та фізико-механічні властивості бетонів, будівельних розчинів та композиційних полімерних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал. **Завдання досліджень:** теоретично обґрунтувати можливість досягнення достатніх фізико-механічних характеристик матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал; експериментально підтвердити досягнення необхідної міцності матеріалів за рахунок попередньої обробки рециклінгових наповнювачів, формування оптимальної структури будівельних розчинів і бетонів, забезпечення електрогетерогенних взаємодій у композиційних полімерних матеріалах; розробити склади бетонів, будівельних розчинів та композиційних полімерних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал та провести фізико-механічні випробування отриманих матеріалів; провести фізико-хімічні дослідження структури і взаємодій компонентів розроблених матеріалів; виконати дослідно-промислову перевірку результатів досліджень та впровадження розроблених складів композиційних полімерних матеріалів.

Отримані **нові наукові результати** полягають у такому. Вперше встановлено залежності фізико-механічних властивостей бетонів, будівельних розчинів та полімерних композиційних матеріалів від співвідношення вмісту

в'яжучого, заповнювачів та наповнювачів, які є поліфракційними рециклінговими матеріалами із подрібнених залізобетонних залізничних шпал. Вперше встановлено знак та величина електроповерхневого потенціалу частинок поліметилметакрилату у полімерних композиційних матеріалах, який дорівнює $-0,29$ В. При цьому в полімерних наповнених матеріалах утворюються електрогетерогенні контакти між негативно зарядженими активними поверхневими центрами поліметилметакрилату $[CH_2C(CH_3)(COOCH_3)]_n$ і низькоосновних гідросилікатів кальцію (CSH) та позитивно зарядженими поверхневими центрами усіх інших продуктів гідратації цементу. Це розвинуло уявлення про формування структури полімерних композиційних матеріалів за рахунок взаємодії протилежно заряджених активних центрів полімеру і наповнювача із пилюватої фракції залишків залізобетонних залізничних шпал. Найвища міцність досягається при рівності площ різнойменно заряджених поверхонь. Набули подальшого розвитку уявлення про формування структури будівельних розчинів і бетонів на основі крупної, дрібної та пилюватої фракцій рециклінгових наповнювачів із залишків залізобетонних залізничних шпал застосуванням у розрахунках складів оптимальних величин коефіцієнтів розсушення частинок піску дрібною фракцією та частинок цементу пилюватою фракцією, які становлять 3,0 і 1,7, відповідно.

Достовірність результатів досліджень забезпечена дослідженнями забезпечена використанням у теоретичних дослідженнях фундаментальних положень і закономірностей фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів, застосуванням в експериментах комплексу стандартних фізико-механічних та фізико-хімічних методів досліджень, а також підтвердженням теоретичних і експериментальних досліджень експлуатаційними випробуваннями. Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці методу отримання рециклінгових заповнювачів із залізобетонних залізничних шпал, а також складів будівельних розчинів, бетонів та полімерних наповнених матеріалів з використанням поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал при збереженні достатньої міцності. Полімерний

композиційний матеріал було використано для ремонту опор шляхопроводу, що дозволить знизити витрати на їх утримання та продовжити міжремонтні терміни. Досягнуто рівень зменшення вуглецевого сліду матеріалів на вторинних заповнювачах 13 % на кубічний метр виготовленого бетону за рахунок зменшення витрати цементу, заміни природних заповнювачів щебню і піску на вторинні, зменшення об'ємів їх видобутку та перевезень із кар'єрів. Результати досліджень впроваджено в освітній процес для підготовки бакалаврів, магістрів і докторів філософії.

За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових праць. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у 9 наукових статтях, з яких 8 – у фахових виданнях України категорії Б, 1 – у виданні, що індексується НМБД Scopus, а також у 6 працях апробаційного характеру. Результати досліджень додатково відображені в 1-й статті в іноземному журналі, а також в 1-му патенті на корисну модель.

Розділ 1 узагальнює сучасний світовий і вітчизняний досвід переробки відходів бетонних конструкцій та їх повторного використання в будівельних матеріалах. Показано, що зростання обсягів будівельних відходів, особливо в умовах руйнувань інфраструктури в Україні, робить переробку бетону стратегічно важливою для сталого розвитку. Проаналізовано нормативні підходи різних країн, технології отримання вторинних заповнювачів і порошків, а також їхній вплив на фізико-механічні властивості бетонів. Встановлено, що оптимальні рівні заміни природних заповнювачів рециклінговими зазвичай становлять 20–30 %, хоча за певних умов можливе використання і вищих часток без суттєвого погіршення міцності. У розділі систематизовано результати досліджень щодо впливу гранулометричного складу, водопоглинання, залишкового цементного каменю та мікроструктури вторинних матеріалів на властивості бетонів. Показано, що дрібні фракції можуть проявляти пуцоланову активність і частково замішувати цемент, тоді як крупні заповнювачі забезпечують прийнятні механічні характеристики за умови корекції водоцементного відношення і поліпшення якості рециклінгових заповнювачів.

Узагальнений аналіз підтверджує перспективність широкого впровадження перероблених бетонних відходів у будівельну галузь та окреслює наявні наукові прогалини, зокрема щодо використання відходів залізобетонних шпал і оптимізації складів бетонів, будівельних розчинів і полімерних композиційних матеріалів із високим вмістом рециклінгових компонентів.

Розділ 2 описує матеріали та експериментальні методи, використані у роботі, включно з характеристиками портландцементу, поліметилметакрилату, природних та рециклінгових заповнювачів, отриманих шляхом подрібнення залізобетонних шпал. Наведено технологію подальшого помелу у барабанному млині з використанням помольних тіл різного діаметра та поділу матеріалу на фракції, що забезпечує очищення поверхні зерен і формування їх кубовидної форми. Описано стандартні методи визначення фізико-механічних властивостей заповнювачів, розчинів і бетонів, а також застосовані фізико-хімічні методи – оптичну мікроскопію та ІЧ-спектроскопію. Описано методику прискореного визначення гранулометричного складу та округлості частинок за допомогою цифрової обробки зображень у програмі ImageJ, що дозволяє оцінювати площу, периметр та еквівалентний діаметр зерен для побудови кривих розподілу. Оптичні дослідження поверхні вторинних заповнювачів та мезоструктури зразків розроблених матеріалів виконувалось за допомогою біноклярного мікроскопа МБС-2 у відбитому світлі при 87-ми кратному збільшенні.

Розділ 3 узагальнює теоретичні засади підвищення ефективності матеріалів на основі рециклінгових заповнювачів і обґрунтовує ключові механізми покращення їхньої роботи в цементних системах. Показано, що якість поверхні та структурна сумісність рециклінгових частинок із цементною матрицею визначають міцність і довговічність бетонів, тоді як необроблені заповнювачі містять дефекти та залишковий цементний камінь, що погіршує міжфазну контактну зону. Обґрунтовано ефективність механічної обробки в барабанному млині та хімічної модифікації силікатом натрію, які забезпечують очищення поверхні, формування кубовидної форми зерен і ущільнення структури. У розділі також розглянуто структурний підхід до оптимізації складів матеріалів,

який базується на багаторівневій моделі будови бетону від макроструктури до мікроструктури та наведено числові параметри, що визначають оптимальне розташування частинок. На основі цього підходу розроблено методику визначення оптимального гранулометричного складу дрібних фракцій подрібнених відходів бетону для їх ефективного використання як наповнювача в цементно-піщаних розчинах. Розрахунки показали, що оптимальна величина коефіцієнту розсування зерен піску дрібною фракцією рециклінгових відходів дорівнює $\mu = 3,0$, а оптимальна величина коефіцієнту розсування зерен цементу пилюватою фракцією рециклінгових відходів дорівнює $\lambda = 1,7$ для одного ряду частинок розміром 5 мкм між частинками 50 мкм і $\lambda = 2,5$ для двох рядів, що забезпечує найщільніше пакування на мікроструктурному рівні. Запропоновано алгоритм підбору складу матеріалів, який враховує середній розмір частинок піску, кількість шарів дрібного наповнювача між зернами крупнішої фракції та оптимальні значення коефіцієнтів розсування. Побудовано номограми та аналітичні залежності, що дозволяють визначати необхідні параметри для забезпечення найщільнішої упаковки частинок і підвищення міцності матеріалів на основі рециклінгових заповнювачів.

Показано, що важливим чинником структуроутворення полімерних композиційних матеріалів на основі поліметилметакрилату (ПММК) є електроповерхневі властивості частинок. Електроповерхневий потенціал частинок ПММК становить $-0,29$ В і $-0,58$ В при рН 7 та рН 12, відповідно. Порівняння з потенціалами мінеральних компонентів (наприклад, кварц: $-0,97$ В при рН 7; портландит: $+0,83$ В; ГСК високоосновні: $+0,33$ В; ГСК низькоосновні: $-0,12$ В) показує, що у свіжій цементній пасті полімер взаємодіє переважно з C_3S і C_2S , тоді як у рециклінгових наповнювачах – з продуктами гідратації, що мають інші знаки заряду. Розрахунок площ поверхонь позитивно та негативно заряджених частинок у подрібнених залишках бетону та глобул ПММК дозволив визначити оптимальну кількість полімеру, необхідну для досягнення електрогетерогенної взаємодії в системі. Моделювання показало, що рівність площ поверхонь із протилежними зарядами, а отже, умова формування

максимально щільної структури, досягається при масовій частці полімеру 0,3, що мінімізує дефекти структури, зменшує пористість і створює передумови для підвищення міцності та довговічності полімернаповнених ремонтних композицій на основі рециклінгових наповнювачів.

Розділ 4 містить результати експериментальних досліджень. На основі оцінювання гранулометричного складу рециклінгових заповнювачів, отриманих із подрібнених залізобетонних шпал, із застосуванням стандартного та розробленого методу цифрової обробки зображень встановлено, що фракції понад 5 мм відповідають вимогам до крупних заповнювачів, тоді як дрібні фракції з модулем крупності 0,9 не можуть бути використані як пісок. Визначено показник округлості зерен: 0,78 для вторинного щебню та 0,73 для природного, що корелює з часткою лещадних і голчастих зерен (14,6 % і 16,7 % відповідно). Досліджено ефективність очищення поверхні у барабанному млині, де за перші 2 години відбувається до 50 % втрати маси за рахунок видалення залишків цементного каменю. Результати випробувань бетонів на природних і рециклінгових заповнювачах із різними видами попередньої обробки свідчать, що бетон на необробленому щебні показав найнижчу міцність (10,4 МПа через 7 діб і 19,2 МПа через 28 діб), тоді як бетон на натуральному щебні мав 24 МПа і 32,2 МПа відповідно. Просочення вторинного щебню 3 % розчином силікату натрію забезпечило підвищення міцності на 10 % порівняно з необробленим заповнювачем, а механічне очищення – збільшення міцності у 2,3 раза на 7-му добу та до 98 % від контрольної міцності на 28-му добу.

Встановлено, що максимальні міцність і середня густина цементно-піщаних розчинів із використанням рециклінгового піску досягаються при коефіцієнті розсування зерен піску $\mu = 3,0$, що відповідає оптимальному розташуванню частинок наповнювача між зернами піску. У віці 28 діб міцність при згині таких зразків становила 6,1 МПа, а при стиску 17,9 МПа. Зі збільшенням частки вторинного піску спостерігалось зменшення середньої густини та поступове зниження міцності, що пов'язано з підвищеною пористістю та водопоглинанням дрібних рециклінгових фракцій. Дослідження впливу заміщення цементу

рециклінговими пилюватими фракціями на фізико-механічні властивості розчинів у віці 28, 90 і 270 діб показало, що максимальні значення міцності (4,7 МПа при згині та 13,6 МПа при стиску) зафіксовано при оптимальному коефіцієнті розсуву частинок цементу $\lambda_{opt} = 1,7$. Така ж закономірність простежується на 90-ту добу, з показниками 6,1 МПа та 27,2 МПа відповідно, та на 270 добу – 6,6 МПа і 32,3 МПа відповідно. Аналіз кількісних показників пористості демонструє суттєві відмінності між серіями зразків залежно від типу заміщення (пісок чи цемент) та вмісту рециклінгового наповнювача. Для контрольного складу співвідношення відкритої та закритої пористості становить 2,95, тобто відкрита пористість майже утричі перевищує закриту. У наповнених зразках це співвідношення зменшується до 2,1...0,98, що свідчить про перерозподіл порового простору на користь закритих пор. Після 270 діб витримування відкрита пористість зменшується у всіх зразках на 15–30 %, тоді як закрита пористість зростає на 20–50 %, що свідчить про подальше ущільнення структури. Показник середнього розміру відкритих капілярних пор зменшується у 2–3 рази, що підтверджує тривалу гідратацію залишкових мінералів цементу та формування додаткової кількості С–S–Н-фази за рахунок повільного вивільнення води з пористих рециклінгових частинок.

У розділі наведено фізико-хімічні дослідження розроблених матеріалів, під час яких оптична мікроскопія показала суттєві відмінності у макро- та мезоструктурі природних і рециклінгових заповнювачів: на необроблених частинках чітко фіксуються залишки старого цементно-піщаного розчину, тоді як механічне очищення забезпечує формування окатаної поверхні, а просочення силікатом натрію створює зміцнений однорідний поверхневий шар. ІЧ-спектроскопія підтвердила наявність характерних фаз гідратації цементу (С–S–Н, портландит, еtringіт) та виявила зміни у структурі силікатних гелів залежно від способу обробки заповнювачів: зсув максимуму смуги Si–O з 995 см^{-1} для бетону з необробленим щебнем до 1000 см^{-1} для зразків із природним та модифікованим заповнювачем, що свідчить про зміну ступеня полімеризації С–S–Н-фази; підвищену інтенсивність карбонатних смуг (875 і

712 см⁻¹) у зразках з необробленим та механічно очищеним щебнем; збільшення кількості карбоалюмінатів і сульфоалюмінатів у зразках із просоченим заповнювачем, що корелює з формуванням більш щільної мікроструктури.

Розділ 5 висвітлює практичне впровадження розроблених полімернаповнених композиційних матеріалів на основі пилюватої фракції відходів бетону, зокрема їх успішне застосування під час ремонту пошкоджених опор залізничного мосту, де отримані показники міцності 10,9–12,2 МПа відповідали класу бетону С8/10 та підтвердили працездатність технології в реальних умовах експлуатації. Наведено результати розрахунку вуглецевого сліду, які демонструють зменшення викидів CO₂ з 407,54 до 353,53 кг/м³ бетону (на 13 %) завдяки заміні природних компонентів переробленими заповнювачами та частковому заміщенню цементу. Також зазначено інтеграцію результатів дослідження в освітній процес для підготовки фахівців у галузі будівництва та залізничного транспорту.

У розділі загальних висновків підсумовано виконання дослідницьких завдань і ступінь досягнення поставленої мети. Додатки містять додаткову інформацію та матеріали, які доповнюють основну частину роботи.

Ключові слова: бетон, будівельні розчини, полімерні композиційні матеріали, рециклінгові заповнювачі, крупний заповнювач, дрібний заповнювач, поліметилметакрилат, міцність, щільність, пористість, водопоглинання, технологія, залізобетонні шпали, залізниця, інфраструктурні об'єкти.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків. 2023. Вип. 206. С. 121-128. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>

2. Трикоз Л.В., Камчатна С.М., Зінченко О.С., Пустовойтова О.М., Бородін Д.Ю. Дослідження міцності і деформацій композиційних матеріалів на основі наповнених полімерів (in English). Збірник наукових праць «Сучасне будівництво та архітектура». Одеса. 2024. Вип. № 8. С.72-79. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-72-79>

3. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Калінін О.А., Никитинський А.В. Вплив виду обробки рециклінгових заповнювачів на міцність бетону. Український журнал будівництва та архітектури. 2024. № 4 (022). С.126-133. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083>

4. Зінченко О. С. Оцінювання якості крупного заповнювача, отриманого з подрібнених бетонних залізничних шпал. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків. 2024. Вип. 210. С. 43-51. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320709>

5. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. Науковий вісник будівництва. 2024. Вип. № 111. С. 135-141. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>

6. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Дослідження впливу рециркульованих дрібних наповнювачів на міцнісні та структурні характеристики цементно-піщаних розчинів. Науковий вісник будівництва. 2025. Вип. № 112. С. 258-264. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.31>

7. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Розробка полімерних наповнених композицій для ремонту штучних споруд залізничного транспорту. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : Збірник наукових праць Українського державного університету науки і технологій. Дніпро. 2025. Вип. 27. С. 53-61. <https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333792>

8. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Дослідження змін пористості наповнених цементно-піщаних зразків за кінетикою їх водопоглинання. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків. 2025. Вип. 211. С. 154-166. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327345>

9. Trykoz L., Zinchenko O., Borodin D., Kamchatna S., Pustovoitova O. Effect of treatment types of recycled concrete aggregates on the properties of concrete. *Budownictwo i Architektura*. 2024. 23(3). 129–137. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6318> (Scopus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Трикоз Л. В., Зінченко О.С. Огляд сучасних методів обстеження споруд. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 19-20 жовтня 2022 р. / за заг. ред. О. Л. Тютькіна. Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро. 2022. С. 43-46. <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/16115>

2. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Дослідження структуроутворення в системі наповнювач-полімер. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» 27-28 квітня 2023 р., ОДАБА. Одеса. 2023. С. 145-147. https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnyk_strukturoutvorennya_2023.pdf

3. Трикоз Л.В., Пустовойтова О.М., Зінченко О.С., Калінін О.А., Никитинський А.В., Романенко О.В. Вплив фракційного складу наповнювача на структуроутворення в композиційних матеріалах на основі наповнених полімерів. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» 23 квітня 2024 р.. ОДАБА, Одеса. 2024. С. 165-168. https://odaba.edu.ua/upload/files/Programa_konferentsii_Strukturoutvorennya_2024_1.pdf

4. Зінченко О.С. Використання рециклінгових заповнювачів та оцінка їх ефективності для забезпечення сталого розвитку Тези доповіді на X Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві», 15 травня 2025 року, Луцьк. С.30-32. <https://drive.google.com/file/d/1Ulk7EZmzlXZM-rmXvOB9hkAIHJp6UV9L/view>

5. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Композиційний матеріал для ремонту та відновлення бетонних споруд. Мости та

тунелі: теорія, дослідження, практика: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», присвяченої пам'яті професора В. Д. Петренка, 16-17 жовтня 2024 р. / за заг. ред. О. Л. Тютюкіна. Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро. 2024. С. 38-40.
<https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/19139>

6. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Калінін О.А., Никитинський А.В. Дослідження кінетики водопоглинання цементно-піщаних зразків з мікронаповнювачами. Тези доповідей 10-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 20-22 листопада 2024 р.: УкрДУЗТ, С.198-199.
<http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/28304/1/%D0%A2%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B7.pdf>

Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:

1. Trykoz L., Rachkovskiy A., Zinchenko O. Untersuchungen von Polymerschutzbeschichtungen für Betonkonstruktionen. Proceedings in civil engineering. 2023. 6 (6). 589-593. <https://doi.org/10.1002/cepa.2911>

2. Патент на корисну модель UA 156792. Спосіб виготовлення заповнювачів для бетону із відходів залізобетонних шпал. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Пługін А.А., Панченко С.В., Пługін Д.А., Дудін О.А., Козеняшев І.А. Заявл. 08.12.2023. Заявка № u202305944. Опубл. 07.08.2024. Бюл. № 32.
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813569>

ABSTRACT

Zinchenko O.S. Concretes, mortars, and composite polymer materials using polyfractional recycled fillers from reinforced concrete railway sleepers. – Qualification research work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 192 – Construction and Civil Engineering. – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2026.

The dissertation aims to develop concretes, mortars, and polymer composite materials using polyfractional recycled fillers from reinforced concrete railway sleepers by establishing the main regularities for the formation of their structure and properties and by optimizing technological parameters to ensure the required performance characteristics. The dissertation consists of an introduction, five chapters, general conclusions, a list of 161 references, and five appendices.

The **introduction** provides a general description of the work and substantiates the relevance of the chosen topic, outlines its connection with scientific research programs, formulates the aim, object, subject, and tasks of the study, and presents the scientific novelty, reliability, and practical significance of the results, as well as information on their implementation. Under modern conditions, when the consequences of military actions and other disasters lead to a sharp increase in the volume of construction waste, the problem of recycling and reusing reinforced concrete structures becomes particularly urgent. The growing waste streams caused by natural aging of infrastructure, as well as destruction due to wars, technological accidents, and natural disasters, overload existing waste-management systems and create environmental and economic challenges. In Ukraine, an additional issue is the disposal of reinforced concrete railway sleepers whose service life is expiring, as well as their replacement due to the transition to the European track gauge. In this context, the development of construction materials based on polyfractional recycled fillers from reinforced concrete sleepers is highly relevant. The relevance is further confirmed by the inclusion of this research in state-funded research projects of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The aim of the study is to develop concrete, mortars, and composite polymer materials based on polyfractional recycled fillers obtained from reinforced concrete railway sleepers. **The subject** of the study comprises concrete, mortars, and composite polymer materials containing polyfractional recycled fillers from reinforced concrete sleepers. **The object** of the study includes the composition, structure, and physical-mechanical properties of these materials. **The research tasks** include: theoretical justification of the possibility of achieving sufficient physical-mechanical

characteristics of materials based on polyfractional recycled fillers; experimental confirmation of the required strength through preliminary treatment of recycled fillers, optimization of the structure of mortars and concretes, and ensuring electroheterogeneous interactions in composite polymer materials; development of compositions for concretes, mortars, and polymer composites using recycled fillers and conducting physical-mechanical tests; performing physicochemical studies of the structure and interactions of the developed materials; and carrying out pilot-industrial verification and implementation of the developed polymer composite formulations.

The scientific novelty of the obtained results is as follows. For the first time, dependencies of the physical-mechanical properties of concretes, mortars, and polymer composite materials on the ratio of binder, aggregates, and fillers represented by polyfractional recycled materials from crushed reinforced concrete sleepers have been established. For the first time, the sign and magnitude of the electro-surface potential of polymethyl methacrylate (PMMA) particles in polymer composites were determined, amounting to -0.29 V. It was shown that electroheterogeneous contacts form between negatively charged active surface centers of PMMA $[\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)]_n$ and low-basic calcium hydro silicates (C–S–H), as well as positively charged surface centers of other cement hydration products. This expands the understanding of the structure formation of polymer composites due to interactions between oppositely charged active centers of the polymer and the dust-fraction filler derived from crushed reinforced concrete sleepers. Maximum strength is achieved when the areas of oppositely charged surfaces are equal. The understanding of structure formation in mortars and concrete based on coarse, fine, and dust fractions of recycled fillers from reinforced concrete sleepers has been further developed through the introduction of optimal particles spacing coefficients for sand (3.0) and cement (1.7), respectively.

The reliability of the research results is ensured using fundamental principles of physics-chemical mechanics of dispersed systems and materials, the application of standard physical-mechanical and physicochemical testing methods, and the confirmation of theoretical and experimental findings through operational testing. The

practical significance of the results lies in the development of a method for producing recycled aggregates from reinforced concrete sleepers, as well as formulations of mortars, concretes, and polymer-filled materials using polyfractional recycled fillers while maintaining sufficient strength. The polymer composite material was used for repairing bridge supports, reducing maintenance costs and extending service intervals. A reduction of the carbon footprint by 13% per cubic meter of concrete was achieved due to lower cement consumption, replacement of natural aggregates with recycled ones, and reduced extraction and transportation volumes. The results have been implemented in educational programs for bachelor's, master's, and PhD students.

A total of 17 scientific works has been published based on the dissertation. The main results are presented in 9 scientific articles, including 8 in Ukrainian professional journals (Category B) and 1 indexed in Scopus, as well as in 6 conference publications. Additional results are presented in 1 foreign journal article and 1 utility model patent.

Chapter 1 summarizes the current global and national experience in recycling concrete waste and reusing it in construction materials. It is shown that the growing volume of construction waste, especially under conditions of infrastructure destruction in Ukraine, makes concrete recycling strategically important for sustainable development. The chapter analyzes regulatory approaches in different countries, technologies for producing recycled aggregates and powders, and their influence on the physical-mechanical properties of concretes. It is established that optimal replacement levels of natural aggregates with recycled ones typically range from 20–30%, although higher replacement levels may be used under certain conditions without significant loss of strength. The chapter systematizes research results on the influence of particle size distribution, water absorption, residual cement paste, and microstructure of recycled materials on concrete properties. It is shown that fine fractions may exhibit pozzolanic activity and partially replace cement, while coarse aggregates can provide acceptable mechanical performance if the water-cement ratio is adjusted and the quality of recycled aggregates is improved. The analysis confirms the feasibility of widespread use of recycled concrete waste in construction and identifies scientific gaps, particularly regarding the use of reinforced concrete sleeper

waste and optimization of compositions for concretes, mortars, and polymer composites with high recycled content.

Chapter 2 describes the materials and experimental methods used in the study, including the characteristics of Portland cement, PMMA, natural aggregates, and recycled aggregates obtained by crushing reinforced concrete sleepers. The technology of further grinding in a drum mill using grinding bodies of different diameters and subsequent fractionation is presented, ensuring surface cleaning and the formation of cubical grain shape. Standard methods for determining the physical-mechanical properties of aggregates, mortars, and concretes are described, along with physicochemical methods such as optical microscopy and IR spectroscopy. A method for accelerated determination of particle size distribution and roundness using digital image processing in ImageJ is presented, enabling the evaluation of particle area, perimeter, and equivalent diameter for constructing distribution curves. Optical studies of recycled aggregate surfaces and the mesostructure of the developed materials were performed using an MBS-2 binocular microscope in reflected light at $\times 87$ magnification.

Chapter 3 summarizes the theoretical foundations for improving the performance of materials based on recycled aggregates and substantiates the key mechanisms of their enhanced behavior in cement systems. It is shown that the surface quality and structural compatibility of recycled particles with the cement matrix determine the strength and durability of concretes, whereas untreated aggregates contain defects and residual cement paste that weaken the interfacial transition zone. The effectiveness of mechanical treatment in a drum mill and chemical modification with sodium silicate is substantiated, as these methods ensure surface cleaning, formation of cubical grain shape, and structural densification. The chapter also discusses a structural approach to optimizing material compositions based on a multilevel model of concrete structure, from macro- to micro-scale, and provides numerical parameters that determine optimal particle arrangement. Based on this approach, a methodology for determining the optimal particle-size distribution of fine recycled fractions for their effective use as fillers in mortars was developed. Calculations showed that the optimal sand-particle

spacing coefficient is $\mu = 3.0$, while the optimal cement-particle spacing coefficient is $\lambda = 1.7$ for one row of 5 μm particles between 50 μm particles, and $\lambda = 2.5$ for two rows, ensuring the densest packing at the microstructural level. An algorithm for selecting material compositions was proposed, considering the average sand particle size, the number of filler layers between larger grains, and optimal spacing coefficients. Nomograms and analytical dependencies were constructed to determine the necessary parameters for achieving the densest packing and improving the strength of materials based on recycled aggregates.

A key factor in the structure formation of PMMA-based polymer composites is the electro-surface properties of the particles. The electro-surface potential of PMMA particles is -0.29 V at pH 7 and -0.58 V at pH 12. Comparison with the potentials of mineral components (e.g., quartz: -0.97 V at pH 7; portlandite: $+0.83\text{ V}$; high-basic C–S–H: $+0.33\text{ V}$; low-basic C–S–H: -0.12 V) shows that in fresh cement paste the polymer interacts mainly with C_3S and C_2S , whereas in recycled fillers it interacts with hydration products of different charge. Calculations of the surface areas of positively and negatively charged particles in crushed concrete residues and PMMA globules allowed determining the optimal polymer content required for electroheterogeneous interaction. Modeling showed that equality of oppositely charged surface areas, and thus the condition for forming the densest structure, is achieved at a polymer mass fraction of 0.3, which minimizes structural defects, reduces porosity, and enhances the strength and durability of polymer-filled repair composites based on recycled fillers.

Chapter 4 presents the results of experimental studies. Based on the evaluation of the particle-size distribution of recycled aggregates obtained from crushed sleepers using standard and digital image-processing methods, it was established that fractions larger than 5 mm meet the requirements for coarse aggregates, whereas fine fractions with a fineness modulus of 0.9 cannot be used as sand. The roundness index was determined to be 0.78 for recycled aggregate and 0.73 for natural aggregate, correlating with the content of flaky and elongated particles (14.6% and 16.7%, respectively). The efficiency of surface cleaning in a drum mill was investigated, showing that up to 50% mass loss occurs during the first two hours due to removal of residual cement paste.

Tests of concretes made with natural and recycled aggregates subjected to different treatments showed that concrete with untreated recycled aggregate had the lowest strength (10.4 MPa at 7 days and 19.2 MPa at 28 days), whereas concrete with natural aggregate reached 24 MPa and 32.2 MPa, respectively. Impregnation of recycled aggregate with a 3% sodium silicate solution increased strength by 10% compared to untreated aggregate, while mechanical cleaning increased strength by a factor of 2.3 at 7 days and up to 98% of the control strength at 28 days.

It was established that the maximum strength and density of mortars containing recycled sand are achieved at a sand-particle spacing coefficient $\mu_{opt} = 3.0$, corresponding to optimal placement of filler particles between sand grains. At 28 days, flexural strength reached 6.1 MPa and compressive strength 17.9 MPa. Increasing the proportion of recycled sand led to reduced density and gradual strength loss due to higher porosity and water absorption of fine recycled fractions. Studies of cement replacement with recycled dust fractions at 28, 90, and 270 days showed that maximum strength (4.7 MPa in flexure and 13.6 MPa in compression) was achieved at the optimal cement-particle spacing coefficient $\lambda_{opt} = 1.7$. Similar trends were observed at 90 days (6.1 MPa and 27.2 MPa) and 270 days (6.6 MPa and 32.3 MPa). Analysis of porosity parameters revealed significant differences between samples depending on the type of replacement and filler content. For the control composition, the ratio of open to closed porosity was 2.95, whereas in filled samples it decreased to 2.1–0.98, indicating a shift toward closed pores. After 270 days, open porosity decreased by 15–30%, while closed porosity increased by 20–50%, indicating structural densification. The average size of open capillary pores decreased by 2–3 times, confirming prolonged hydration of residual cement minerals and additional C–S–H formation due to slow water release from porous recycled particles.

The chapter presents physicochemical studies of the developed materials, during which optical microscopy revealed significant differences in the macro- and mesostructure of natural and recycled aggregates. Clear remnants of old cement–sand mortar were observed on untreated particles, whereas mechanical cleaning ensured the formation of a rounded surface, and impregnation with sodium silicate produced a

strengthened, homogeneous surface layer. IR spectroscopy confirmed the presence of characteristic cement hydration phases (C–S–H, portlandite, ettringite) and revealed changes in the structure of silicate gels depending on the aggregate treatment method: a shift of the Si–O band maximum from 995 cm^{-1} for concrete with untreated aggregate to 1000 cm^{-1} for samples with natural and modified aggregates, indicating a change in the degree of polymerization of the C–S–H phase; increased intensity of carbonate bands (875 and 712 cm^{-1}) in samples with untreated and mechanically cleaned aggregate; and an increased amount of carboaluminates and sulfoaluminates in samples with impregnated aggregate, which correlates with the formation of a denser microstructure.

Chapter 5 highlights the practical implementation of the developed polymer-filled materials based on the dust fraction of concrete waste, particularly their successful application in repairing damaged supports of a railway bridge. The obtained strength values of 10.9 – 12.2 MPa corresponded to concrete class C8/10 and confirmed the operability of the technology under real service conditions. The chapter presents the results of carbon-footprint calculations, demonstrating a reduction in CO_2 emissions from 407.54 to 353.53 kg/m^3 of concrete (by 13%) due to the replacement of natural components with recycled aggregates and partial cement substitution. It also notes the integration of the research results into the educational process for training specialists in construction and railway engineering.

The general conclusions summarize the completion of the research tasks and the degree to which the stated aim has been achieved. The appendices contain additional information and materials that complement the main body of the work.

Keywords: concrete, mortars, polymer composite materials, recycled aggregates, coarse aggregate, fine aggregate, polymethyl methacrylate, strength, density, porosity, water absorption, technology, reinforced concrete sleepers, railway, infrastructure facilities.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ЗНЕСЕННЯ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ	30
1.1 Вітчизняний та світовий досвід використання відходів бетонних конструкцій	30
1.2 Узагальнення результатів досліджень щодо впливу подрібнених відходів на властивості будівельних матеріалів	32
1.2.1 Закономірності формування властивостей бетонів із рециклінговими заповнювачами.....	32
1.2.2 Закономірності формування властивостей цементно-піщаних розчинів із рециклінговими компонентами.	36
1.2.3 Закономірності формування властивостей полімернаповнених матеріалів із рециклінговими наповнювачами.....	39
1.3 Огляд методів підвищення якості рециклінгових заповнювачів та матеріалів на їх основі.....	42
1.3.1 Технологічні підходи до покращення властивостей рециклінгових заповнювачів.....	42
1.3.2 Підходи до покращення властивостей матеріалів, виготовлених із рециклінгових заповнювачів.....	47
1.4 Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза.....	51
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1.....	52
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	53
2.1 Матеріали, які використовувалися при проведенні досліджень.....	53
2.1.1 Розробка способу отримання заповнювачів із залишків залізобетонних шпал.....	53
2.1.2 Характеристики матеріалів для проведення досліджень.....	56
2.2 Методи проведення експериментальних досліджень.....	57
2.2.1 Методи визначення фізико-механічних властивостей.....	57

2.2.2 Розробка методики визначення розмірів зерен рециклінгових заповнювачів та їх форми.....	58
2.2.3 Фізико-хімічні методи дослідження	61
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2	62
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РЕЦИКЛІНГОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ	63
3.1 Покращення властивостей попередньою обробкою крупних заповнювачів.....	63
3.2 Структурний підхід до покращення властивостей матеріалів на рециклінгових наповнювачах.....	65
3.3 Теоретичні передумови покращення властивостей полімернаповнених матеріалів на рециклінгових наповнювачах.....	74
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3.....	81
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ.....	82
4.1 Оцінювання гранулометричного складу рециклінгових заповнювачів, отриманих із відходів бетону шпал, стандартним і розробленим методом	82
4.2 Визначення міцності бетонних зразків на природних та рециклінгових заповнювачах.....	89
4.3 Визначення міцності цементно-піщаного розчину на природних та рециклінгових наповнювачах.....	93
4.4 Визначення міцності полімернаповнених композиційних матеріалів на природних та рециклінгових наповнювачах	98
4.5 Дослідження впливу кількості наповнювача на пористість зразків цементно-піщаного розчину за кінетикою їх водопоглинання.....	100
4.6 Фізико-хімічні дослідження розроблених матеріалів.....	111
4.6.1 Дослідження макро- і мезоструктури розроблених матеріалів методом оптичної мікроскопії.....	111

4.6.2 Дослідження взаємодії компонентів методом інфрачервоної спектроскопії.....	114
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4	118
РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	121
5.1 Застосування розроблених матеріалів для ремонту шляхопроводу	121
5.2 Розрахунок зменшення вуглецевого сліду матеріалів на рециклінгових заповнювачах	126
5.3 Впровадження результатів дослідження в початковий процес	129
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5	130
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123
ДОДАТКИ	154

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному світі, коли країни стикаються з наслідками військових дій та інших катастрофічних подій, проблема утилізації будівельних залишків набуває особливої актуальності. Військові дії, що тривають на території нашої країни, залишають після себе велику кількість будівельних відходів, які складаються переважно із залізобетонних конструкцій і вимагають ефективних методів утилізації та повторного використання. Згідно з Національною стратегією управління відходами в Україні [1] передбачено кілька важливих кроків для розвитку ринку використання перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт: встановлення нормативів для перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, що сприятиме повторному використанню та утилізації цих матеріалів; розробка нормативів використання вторинної сировини з відходів будівельно-ремонтних робіт як матеріалів у будівельній галузі; створення механізмів гарантування якості перероблених матеріалів та надання економічних стимулів для їх використання.

Ці заходи сприятимуть створенню більш стійкого та екологічно обізнаного будівельного сектору, який у сучасному світі стикається із значним зростанням обсягів відходів будівництва та знесення. Традиційно основним джерелом таких відходів були будівлі, що досягли кінця свого життєвого циклу, або об'єкти, які підлягали реконструкції. Проте в останні десятиліття до природного процесу оновлення інфраструктури додалися масштабні руйнування, спричинені війнами, геополітичними конфліктами, техногенними аваріями та природними катаклізмами – землетрусами, повеннями, ураганами, лісовими пожежами. У результаті багато країн стикаються з різким і нерівномірним збільшенням потоків будівельних відходів, які перевищують можливості існуючих систем управління та створюють значний екологічний, соціальний і економічний тиск. В Україні, крім руйнувань, спричинених бойовими діями, в недалекому майбутньому постане питання утилізації залізобетонних шпал у зв'язку з наближенням часу відпрацювання нормативних термінів експлуатації шпал (50

років) від початку їх масового застосування на залізницях України в 1970-х рр. Актуальна ця проблема і в світлі збільшення обсягів колійних робіт і переходу залізниць на звужену Євроколію із заміною рейко-шпальної решітки [2]. Отже, мета роботи – створення будівельних розчинів, бетонів та полімерних композиційних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал – є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана в Українському державному університеті залізничного транспорту на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд у складі держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України: «Розвиток теоретичних основ і експериментальна перевірка нових ефективних способів підвищення несучої здатності та водонепроникності ґрунтів земляного полотна залізниць» (2020-2022, ДР№ 0120U102065); «Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (2022-2023, ДР№ 0122U002125); «Теоретичні та експериментальні основи створення стійких до електричних і динамічних впливів бетонних виробів з композитною арматурою для будівництва та відновлення електрифікованих ділянок залізниць» (2026-2028, ДР№ 0126U002127).

Мета дослідження – розроблення бетонів, будівельних розчинів та композиційних полімерних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал.

Об'єкт досліджень – склад, структура та фізико-механічні властивості бетонів, будівельних розчинів та композиційних полімерних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал.

Предмет досліджень – бетони, будівельні розчини та композиційні полімерні матеріали на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал.

Завдання досліджень:

- теоретично обґрунтувати можливість досягнення достатніх фізико-механічних характеристик матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал;
- експериментально підтвердити досягнення необхідної міцності матеріалів за рахунок попередньої обробки рециклінгових наповнювачів, формування оптимальної структури будівельних розчинів і бетонів, забезпечення електрогетерогенних взаємодій у композиційних полімерних матеріалах;
- розробити склади бетонів, будівельних розчинів та композиційних полімерних матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал та провести фізико-механічні випробування отриманих матеріалів;
- провести фізико-хімічні дослідження структури і взаємодій компонентів розроблених матеріалів;
- виконати дослідно-промислову перевірку результатів досліджень та впровадження розроблених складів композиційних полімерних матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому.

Вперше встановлено залежності фізико-механічних властивостей бетонів, будівельних розчинів та полімерних композиційних матеріалів від співвідношення вмісту в'язучого, заповнювачів та наповнювачів, які є поліфракційними рециклінговими матеріалами із подрібнених залізобетонних залізничних шпал.

Вперше розраховано величину електроповерхневого потенціалу частинок поліметилметакрилату, яка дорівнює -0.29 В, і розроблено схеми електрогетерогенних контактів між негативно зарядженими активними поверхневими центрами поліметилметакрилату $[CH_2C(CH_3)(COOCH_3)]_n$ і низькоосновних гідросилікатів кальцію (CSH) та позитивно зарядженими поверхневими центрами усіх інших продуктів гідратації цементу; при цьому найвища міцність досягається при відношенні величини площі частинок з негативним зарядом поверхні до величини площі частинок з позитивним зарядом поверхні, яке дорівнює одиниці.

Отримали подальший розвиток:

- уявлення про формування структури будівельних розчинів і бетонів на основі крупної, дрібною та пилюватою фракцій рециклінгових наповнювачів із залишків залізобетонних залізничних шпал застосуванням у розрахунках складів оптимальних величин коефіцієнтів розсунення частинок піску дрібною фракцією та частинок цементу пилюватою фракцією, які становлять 3,0 і 1,7, відповідно;

- уявлення про формування структури полімерних композиційних матеріалів за рахунок взаємодії протилежно заряджених активних центрів поліметилметакрилату і наповнювача із пилюватою фракцією залишків залізобетонних залізничних шпал.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень забезпечена використанням у теоретичних дослідженнях фундаментальних положень і закономірностей фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів, застосуванням в експериментах комплексу стандартних фізико-механічних та фізико-хімічних методів досліджень, а також підтвердженням теоретичних і експериментальних досліджень експлуатаційними випробуваннями.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

- розроблено метод отримання рециклінгових заповнювачів із залізобетонних залізничних шпал, що сприятиме зменшенню накопичення старопритатних шпал на підприємствах залізничного транспорту;

- розроблено склади бетонів, будівельних розчинів та полімерних наповнених матеріалів з використанням поліфракційних рециклінгових заповнювачів і наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал при збереженні достатньої міцності;

- полімерний композиційний матеріал було використано для ремонту опор шляхопроводу, який розташований на 2 км ПК8 ділянки Основа-Харків-Пас регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Українські залізниці»; при подальшій експлуатації об'єктів прогнозований економічний ефект буде досягтися зниженням витрат на їх утримання та продовженням строків служби;

- досягнутий рівень зменшення вуглецевого сліду матеріалів на рециклінгових заповнювачах становить 13 % на кубічний метр виготовленого бетону за рахунок зменшення витрати цементу, заміни природних заповнювачів щебню і піску на рециклінгові, зменшення об'ємів їх видобутку та перевезень із кар'єрів.

Результати досліджень також використовуються в Українському державному університеті залізничного транспорту в освітньому процесі при підготовці бакалаврів, магістрів і докторів філософії спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія за освітньою програмою «Промислове та цивільне будівництво», а також спеціальності J7 Залізничний транспорт за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство».

Особистий внесок. Вивчення проблеми і постановка завдань за тематикою дослідження, отримання рециклінгових заповнювачів, їх обробка і розробка складів нових матеріалів на їх основі, отримання експериментальних залежностей і впровадження результатів досліджень виконано автором особисто. Формулювання наукової гіпотези і теоретичні обґрунтування виконано спільно з науковим керівником. Фізико-механічні та фізико-хімічні дослідження, обробка їх результатів виконано спільно із співавторами публікацій. Особистий внесок у спільні публікації згідно нумерації у Додатку А: [1, 17] – отримання рециклінгових заповнювачів, оцінка їх гранулометричного складу, патентний пошук; [2, 11, 12] – проведення та узагальнення результатів досліджень впливу меленого піску на міцність композиційних матеріалів, оптимізація їх складів; [3] – обробка рециклінгових заповнювачів, оцінка міцності бетону; [5] – проведення та узагальнення результатів досліджень впливу рециклінгового піску на середню густину і міцність будівельних розчинів, оптимізація їх складів; [6] – проведення та узагальнення результатів досліджень впливу рециклінгового пилу на середню густину і міцність будівельних розчинів, оптимізація їх складів; [7, 10, 14] – проведення обстеження об'єктів, розробка методології та виконання робіт із впровадження; [8, 15] – проведення та узагальнення результатів досліджень впливу рециклінгового піску та пилу на зміну водопоглинання і пористості

будівельних розчинів; [9, 16] – підготовка зразків, аналіз фізико-хімічних властивостей бетонів на рециклінгових заповнювачах.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження апробовані на: VIII та IX Міжнародних науково-практичних конференціях «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (19-20 жовтня 2022 р., 16-17 жовтня 2024 р., Дніпро); двох міжнародних конференціях «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (27-28 квітня 2023 р., 23 квітня 2024 р., Одеса); 21 Internationale Baustofftagung (13-15 September 2023, Weimar, Bundesrepublik Deutschland); 10-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (20-22 листопада 2024 р., Харків); X Міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві» (15 травня 2025 р., Луцьк).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових праць. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у 9 наукових статтях, з яких 8 – у фахових виданнях України категорії Б, 1 – у виданні, що індексується НМБД Scopus, а також у 6 працях апробаційного характеру. Результати досліджень додатково відображені в 1-й статті в іноземному журналі і в 1-му патенті на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Загальний обсяг роботи – 167 сторінок, з яких – 113 основного тексту. Дисертація містить 59 рисунків і 11 таблиць. Список використаних джерел складається із 161 найменування на 20 сторінках. П'ять додатків розміщено на 13 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ЗНЕСЕННЯ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Вітчизняний та світовий досвід використання відходів бетонних конструкцій

Вивчення властивостей рециклінгових заповнювачів, отриманих із бетону, розпочалося ще наприкінці 1970-х років, однак саме в останні десятиліття ця тематика набула особливої актуальності у зв'язку з глобальним переходом до принципів сталого розвитку та необхідністю зменшення техногенного навантаження на довкілля. В українських реаліях проблема переробки бетонних відходів загострилася через масштабні руйнування інфраструктури внаслідок бойових дій, що зумовлює потребу у створенні ефективних технологій повторного використання зруйнованих конструкцій. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року [1] визначає комплекс заходів, спрямованих на формування ринку перероблених матеріалів: розроблення нормативів використання вторинної сировини, встановлення вимог до якості перероблених продуктів, створення економічних стимулів для їх застосування, а також інтеграцію планів управління будівельними відходами у проектно-кошторисну документацію. Водночас сучасний стан поводження з будівельними відходами в Україні характеризується недостатнім рівнем регулювання та значним негативним впливом на довкілля [3]. Світовий досвід свідчить про стрімке зростання обсягів бетонних відходів. За даними [4], у низці країн сукупний попит на бетон досягає 3,8 т на одну особу, а близько третини цього обсягу з часом перетворюється на відходи. Це становить приблизно 1 т будівельного сміття на людину щороку [5], що створює суттєве навантаження на природні ресурси. Використання вторинного щебню дозволяє зменшити енерговитрати майже у вісім разів порівняно з видобуванням природного [6], а мобільні рециклінгові установки забезпечують переробку матеріалу

безпосередньо на місці демонтажу, скорочуючи витрати на транспортування та закупівлю нових матеріалів. Останнім часом тенденції сталого розвитку активізувалися через обмеженість ресурсів, що створює нові стратегічні й управлінські виклики. Наприклад, концепція низьковуглецевого розвитку [7] передбачає екологічну свідомість та соціальну відповідальність у застосуванні матеріалів, виготовлених із будівельних відходів, що допомагає зменшити використання невідновлюваних природних ресурсів та знизити викиди CO₂.

Якість рециклінгових заповнювачів значною мірою залежить від властивостей вихідного бетону та технології подрібнення. Як показано у [8], міцність високоміцного бетону визначається, зокрема, характеристиками крупного заповнювача, тому відмінності у структурі та міцності вихідного матеріалу впливають на властивості рециклінгового. У дослідженні [9] було продемонстровано, що подрібнення різних типів будівельних матеріалів дає частинки різного розміру: цементна паста – 5 і 60 мкм, будівельний розчин – близько 30 мкм, бетонні відходи – близько 20 мкм. Однак відсутність детального опису режимів подрібнення не дозволяє узагальнити ці результати для всіх типів відходів. Аналіз гранулометричного складу відходів із різних переробних підприємств у [10] показав значні відмінності у вмісті дрібних фракцій, що потребує додаткового сортування та ускладнює стандартизацію властивостей рециклінгових матеріалів.

Особливо гостро проблема переробки бетонних відходів стоїть на залізницях України. За даними [11], станом на 1 січня 2016 року на підприємствах накопичено понад 220 тис. непридатних залізобетонних шпал, що створює значні логістичні та екологічні труднощі. Технологія переробки, апробована під час реконструкції НСК «Олімпійський», передбачає поділ конструкцій на металеву та мінеральну складові з подальшим використанням відсортованого щебню у дорожньому будівництві або у виробництві нових бетонних виробів. Очікується, що обсяги таких відходів зростатимуть у зв'язку із завершенням нормативного терміну експлуатації шпал, масово встановлених у 1970-х роках. Попри це, у науковій літературі наявна лише одна робота [12], присвячена оцінці властивостей бетону, виготовленого з переробленого

бетонного заповнювача із старих залізничних попередньо напружених бетонних шпал, що свідчить про суттєві прогалини у дослідженнях.

Сучасні підходи до повторного використання бетонних відходів передбачають два основні напрями: отримання переробленого заповнювача як замітника природного щебню та виробництво переробленого порошку для часткової заміни піску або цементу. Обидва напрями сприяють зменшенню потреби у природних ресурсах, скороченню площ, зайнятих будівельними відходами, та зниженню екологічного навантаження. Розглянемо сучасний стан досліджень, присвячених вивченню властивостей матеріалів на рециклінгових заповнювачах.

1.2. Узагальнення результатів досліджень щодо впливу подрібнених відходів на властивості будівельних матеріалів

1.2.1. Закономірності формування властивостей бетонів із рециклінговими заповнювачами

Один із найпоширеніших способів повторного використання зруйнованого бетону полягає в отриманні з нього крупного та дрібного заповнювача для виробництва нових будівельних матеріалів. Після подрібнення властивості рециклінгового заповнювача значною мірою визначаються якістю вихідного бетону, а також розміром частинок, оскільки саме він впливає на кількість прикріпленого розчину. Зі зменшенням розміру частинок частка залишкового розчину зростає, а цей розчин характеризується підвищеною пористістю та схильністю до розшарування. Унаслідок цього бетон на таких заповнювачах має нижчу міцність на роздавлювання, удар та стирання порівняно з бетоном на природних заповнювачах [4]. У роботі [13] досліджували фізичні властивості дрібних заповнювачів та міцність бетону при частковій заміні природного піску рециклінговим і штучним піском. Встановлено, що бетон із такими заміниками демонструє вищу міцність на стиск порівняно зі стандартним бетоном, а повна заміна піску дозволяє знизити вартість суміші приблизно на 2,41 %. Це свідчить

про економічну доцільність використання дрібних фракцій відходів за умови правильного підбору складу.

Рециклінговий крупний заповнювач, як правило, менш критично впливає на властивості бетону [14], тоді як дрібний заповнювач, що містить значну кількість гідратованого цементного каменю з високою пористістю та водопоглинанням, знижує міцність бетону [15]. Пилувата фракція може бути використана як мікронаповнювач для часткової заміни цементу, що дозволяє одночасно утилізувати відходи та зменшити викиди CO₂. У дослідженні [16] за даними рентгенівського та електронно-мікроскопічного аналізів встановлено, що заміна кварцового піску в складі дрібнозернистого бетону дрібним поліфракційним переробленим бетонним заповнювачем активує пуцоланові реакції та сприяє утворенню додаткових продуктів гідратації. Вищі рівні заміни призводять до зниження міцності через недостатню гідратацію цементу. Відомо, що на 28 добу повністю гідратуються лише C₃A і C₄AF, тоді як C₃S гідратується на 70–75 %, а C₂S – на 45–50 % [17]. Тому у відходах бетону може залишатися до 25 % негідратованого C₃S і до 50 % C₂S, що визначає потенціал рециклінгової реакційної активності. Однак надмірна заміна цементу (50–100 %) призводить до утворення меншої кількості портландиту, гідросилікатного гелю та еtringіту і формування пористої, слабкої мікроструктури.

Результати [18] показали, що додавання додаткової води для компенсації водопоглинання рециклінгових заповнювачів дозволяє зберегти міцність бетону на рівні контрольних зразків. Дослідження [19] підтверджує, що заміна до 25 % крупного заповнювача практично не впливає на міцність на стиск, тоді як 100 % заміна знижує її приблизно на 27 %. Цікаво, що бетон із 25 % заміни демонструє менші деформації усадки, ніж звичайний бетон, що пов'язано з особливостями структури залишкового розчину. У роботі [20] встановлено, що бетон із 15–50 % переробленого гравію може досягати міцності 40...45 МПа на 7-му та 28-му добу, що перевищує міцність контрольних зразків. Невелике зниження міцності при 30 % заміни пов'язане з поглинанням води під час змішування. Навіть при 80 % заміни бетон демонструє прийнятні механічні властивості, хоча й нижчі за

контрольні. Часткова заміна природного піску рециклінговим не дає суттєвого приросту міцності.

Попри значні обсяги будівельних відходів, 100 % заміна заповнювачів у бетоні досі не дозволена більшістю технічних норм. У роботі [21] показано, що бетон із 100 % рециклінгового крупного заповнювача має нижчу міцність (20,4 МПа проти 28,99 МПа), але може бути використаний у некритичних конструкціях. Дослідження [22] виявило підвищену вогнестійкість і термостійкість бетону при використанні переробленого піску у співвідношенні 3:1 із цементом. У [5] зроблено висновок, що заміна 20 % крупного заповнювача знижує міцність на стиск лише на 2,13 %, модуль пружності – на 2,55 %, міцність на розрив – на 1,94 %, а міцність на згин – на 2,08 %. Такі характеристики відповідають вимогам до тротуарів, дорожніх покриттів із низькою інтенсивністю руху та неконструкційного бетону. У роботі [23] показано, що оптимізація водоцементного відношення дозволяє отримати бетон із переробленими заповнювачами, міцність якого перевищує контрольну. Наприклад, при 30 % заміні міцність досягала 62,7 МПа проти 51,4 МПа у контрольного бетону. Це пояснюється тим, що рециклінговий заповнювач поглинає частину води, зменшуючи ефективно В/Ц та обмежуючи утворення капілярних пор.

Національні стандарти різних країн встановлюють різні допустимі рівні заміни [24]. Так, стандарти Австралії обмежують кількість крупного заповнювача в бетоні на рівні 30 %, стандарти Бразилії, Великої Британії – 20 %, стандарти Німеччини – 25%...35% залежно від кінцевої міцності бетону. В національних стандартах Китаю кількість заміненого заповнювача залежить від його якості – класу, для визначення якого розроблені відповідні нормативні документи. Для будівель з переробленого бетону заміна щебню класу I може становити 50–100%. Заміна заповнювачів класів II і III мають відповідати таким співвідношенням: 30–50% для багатоповерхових і висотних будівель; 50–100% для малоповерхових будівель. Аналогічний підхід і в рекомендаціях RILEM – кількість заповнювачів може складати від 5% до 100% залежно від їх якості.

Стандарти США регламентують, що кількість крупного рециклінгового заповнювача може становити до 100%, дрібного – на рівні 10%...25% [24].

Багато дослідників спостерігають нелінійну залежність міцності бетону від кількості рециклінгового заповнювача. У роботі [25] встановлено нелінійну залежність міцності на розтяг і згин від кількості рециклінгового заповнювача: при збільшенні частки міцність спочатку зростає, потім зменшується, а далі знову зростає. Міцність на стиск при цьому знижується лінійно. У [26] показано, що зниження міцності становить 15–30 %, але бетон із 50 % рециклінгового щебню демонструє аналогічну довготривалу міцність із контрольним. Навіть при 100% заміні дрібного заповнювача на подрібнені залишки зниження міцності становить лише 10%. Як показали результати [27], використання 40 % заміни дрібного заповнювача не впливає на міцність на стиск і розколювання, а 30 % заміни забезпечує оптимальну міцність на вигин. У [28] показано, що 30 % заміни покращує міцність на стиск і розрив (на 27,95...23,23%) та знижує водопоглинання (на 57,14...69,64 %). У [29] підтверджено, що низькі рівні заміни зберігають механічні властивості, а високі – знижують їх.

У роботах [30, 31] досліджено вплив якості вихідного бетону на властивості рециклінгових заповнювачів. Встановлено у [30], що міцність вихідного бетону не має вирішального впливу на властивості нового бетону, тоді як основним фактором є кількість залишкового розчину на поверхні зерен. Запропоновано в методі розрахунку складу важкого бетону застосувати поправки на походження крупного заповнювача. У дисертаційному дослідженні [31] із подрібненого бетону класу С20/25 були отримані зразки нового бетону з переробленого заповнювача, які показали міцність 29,74...32,45 МПа в зразках бетону з Ц/В на верхньому рівні варіювання і 24,14...26,77 МПа в зразках бетону з Ц/В на нижньому рівні варіювання. Цей ефект спостерігався незалежно від складу сумішей, з яких виготовлялися зразки.

На основі огляду джерел, можна зробити висновок, що основною проблемою рециклінгових заповнювачів є наявність прикріпленого розчину, який погіршує їхні властивості та обмежує можливість використання у

високоякісних бетонах. Традиційні методи дроблення не забезпечують ефективного відокремлення розчину, тому перероблені заповнювачі найчастіше застосовують у дорожньому будівництві. Це зумовлює необхідність розроблення ефективних методів обробки для підвищення якості рециклінгових матеріалів.

1.2.2. Закономірності формування властивостей цементно-піщаних розчинів із рециклінговими компонентами

Упродовж останніх років значна увага приділяється можливості використання дрібнодисперсних відходів різного походження як часткової заміни цементу в цементно-піщаних розчинах. Такий підхід дозволяє не лише зменшити викиди CO₂ та економити природні ресурси, але й у ряді випадків покращити окремі експлуатаційні властивості матеріалу. У дослідженні [32] оцінювали застосовність дрібноподрібнених відходів будівництва та знесення як заміника портландцементу у кількостях 5 і 10 %. Випробування включали визначення міцності на стиск у віці 7, 28 і 90 діб, а також оцінку довговічності за показниками капілярного водопоглинання, дифузії хлоридів, прискореної карбонізації, стійкості до лужно-кремнеземної реакції та сульфатної корозії. Розчини з 5 % заміни продемонстрували покращення лише щодо лужно-кремнеземної реакції, тоді як за іншими показниками поступалися контрольним. Водночас консистенція розчинів із 5 % заміни практично не погіршувалася, що дозволяє розглядати таке дозування як прийнятне для часткової заміни цементу. Заміна 10 % може бути застосована у матеріалах із нижчими вимогами до експлуатаційних характеристик. У роботі [33] досліджували фізико-хімічні властивості порошоків, отриманих у результаті повторної переробки бетонних відходів, та їх придатність як часткової заміни цементу за рахунок наявності оксидів, аналогічних цементним: Встановлено, що міцність на стиск і вигин розчинів зменшується майже вдвічі зі збільшенням частки заміни, що пояснюється нижчою реакційною здатністю рециклінгового порошку порівняно з портландцементом. У дослідженні [34] вивчали вплив трьох типів порошкоподібних відходів – цегляних, бетонних та змішаних – у

кількостях до 15 %. Показано, що така заміна не погіршує механічні властивості розчинів, а максимальна міцність досягала 52,9 МПа. Мікроструктурний аналіз засвідчив, що розчини з цегляними та змішаними порошками мають щільнішу порову структуру порівняно з контрольними.

Використання переробленого дрібного заповнювача у цементно-піщаних розчинах також є перспективним напрямом. Дослідження [9] показало, що заміна піску меленими бетонними відходами знижує міцність на 20 % і збільшує проникність хлоридів. Проте введення мікронаповнювачів (золи-винесення, метакаоліну, кремнезему) дозволило підвищити міцність до 33 МПа та суттєво зменшити проникність. У дослідженні [10] дрібні фракції бетонних відходів використовували як заміну природному піску при двох водоцементних відношеннях. Розчини з перероблених заповнювачів мали нижчу міцність і більшу проникність, однак оптимізація В/Ц дозволила компенсувати втрату міцності: значення 47 МПа, отримане при В/Ц = 0,6 на природному піску, досягалося при В/Ц = 0,56 за 30 % заміни та при В/Ц = 0,45 за 100 % заміни. У роботі [35] досліджували можливість використання відходів цементно-піщаного розчину у самоущільнювальних розчинах. Заміна природного піску у кількості 5–40 % показала, що найбільшу міцність (63,8 МПа) забезпечує 10 % заміни після твердіння у вапняковій воді. Рентгенофазовий аналіз підтвердив збільшення кількості новоутворень гідратації.

Річковий пісок може бути замінений дробильним пилом або гранітним порошком. Дослідження [36] показали, що при співвідношенні 1:3 (цемент: пісок) заміна 100 % піску дробильним пилом забезпечує міцність 9,02 МПа, що близько до контрольної (10,71 МПа). При співвідношенні 1:6 міцність зменшується вдвічі. Підвищення міцності пояснюється авторами [36] шорсткою поверхнею частинок, що покращує зчеплення. У [37] показано, що заміна природного піску переробленим заповнювачем спочатку підвищує, а потім знижує міцність цементно-піщаних розчинів. Максимальні значення (5,8 МПа на стиск і 2,6 МПа на вигин) досягалися при 40 % заміни. Електронно-мікроскопічний аналіз засвідчив, що шорстка поверхня рециклінгових

частинок сприяє гідратації та ущільненню контактної зони. Причина найбільшого приросту міцності саме при 40% заміщенні залишилася непоясненою.

У роботі [38] встановлено, що розчини з модулем крупності $M_k < 2,20$ мають найгірші властивості, тоді як $M_k = 2,20-3,50$ забезпечує характеристики, подібні до натурального піску. Автори [39] вважають, що це може бути через краще ущільнення частинок та кількість води, доступної для суміші, проте кількісну оцінку вони не надали. У [40] показано, що оптимальна насипна густина досягається при співвідношенні 25 % дрібного переробленого заповнювача та 75 % природного піску, що забезпечує найкращі механічні та мікроструктурні властивості. Автори [39] встановили залежності між розташуванням частинок і міцністю на стиск, але не запропонували математичних функцій для урахування щільного розташування частинок у розрахунках складів бетону.

У [40] досліджували вплив переробленого дрібного заповнювача та золи-винесення на текучість цементного розчину. Встановлено, що частинки з великою кількістю гострих граней погіршують рухливість і збільшують потребу у воді. Зі збільшенням кількості домішок розплив конуса зменшується на 5–15 %. У роботі [41] показано, що додавання 10 % переробленого порошку цементної пасти зменшує пластичну усадку на 28 % і знижує появу тріщин на 33,3 %. При 30 % заміни усадка збільшується на 35,1 %. Механізм дії пов'язаний із пористою природою порошку, який регулює вологість у порах. У [42] проведено багатокритеріальний аналіз стійкості виробництва розчинів із переробленим піском. Встановлено, що оптимальна частка заміни становить 40–60 %, що забезпечує прийнятну міцність, зменшує вуглецевий слід і вартість. У [43] показано, що додавання відходів бетону не змінює капілярного водопоглинання та часу схоплювання, але знижує міцність на стиск. Через 28 діб міцність становила 58–65 МПа, що відповідає вимогам європейського стандарту (52,5 МПа). Результати дослідження довговічності у [44] показують, що 10 % дрібнодисперсного порошку зменшує глибину карбонізації на 13,3 % і коефіцієнт дифузії хлоридів на 28,19 %. При вмісті понад 10 % утворюються взаємопов'язані пори, що прискорюють проникнення CO_2 і Cl^- . При заміні

менше 50 % коефіцієнт корозійної стійкості становив 0,84–1,05 після 90 днів сульфатної дії. Мікроструктурний аналіз підтвердив, що 10 % порошку сприяє формуванню щільної мікроструктури в цементному розчині.

Огляд попередніх досліджень демонструє, що використання дрібної фракції відходів руйнування бетонних конструкцій зазвичай призводить до погіршення фізико-механічних властивостей цементно-піщаних розчинів. Для уникнення цього ефекту дослідники застосовують методи ущільнення структури матеріалу, такі як введення мікронаповнювачів або регулювання гранулометричного складу шляхом експериментального перебору варіантів [45, 46]. В Україні для розрахунку складу таких матеріалів використовується нормативні параметри – коефіцієнти заповнення пустот і розсунення зерен щебню розчином і зерен піску цементним тістом, які визначаються на основі емпіричних номограм [47] без урахування специфічних особливостей гранулометричного складу компонентів суміші. Отже актуальними становляться дослідження, спрямовані на покращення міцнісних характеристик цементно-піщаних розчинів з рециклінговим заповнювачем через підбір складу матеріалів на основі їх структурних характеристик.

1.2.3. Закономірності формування властивостей полімернаповнених матеріалів із рециклінговими наповнювачами

Полімерні композиційні матеріали широко застосовуються для захисту та ремонту будівельних конструкцій, зокрема мостів, трубопроводів і тунелів, які зазнають впливу циклів зволоження-висихання, заморожування-відтавання та агресивних середовищ. Полімерні покриття забезпечують гідроізоляцію, корозійну стійкість і високу еластичність, що робить їх ефективними для підвищення довговічності конструкцій. Для зниження вартості та регулювання властивостей полімерної матриці до складу композитів вводять різні мінеральні наповнювачі – крейду, діатоміт, базальт, каолін, золу-винесення, мікрокремнезем, мікрокальцит, технічний вуглець, оксид цинку, метакаолін, воластоніт, тальк, доменний гранульований шлак та мелений пісок [48÷57]. Їх

використання дозволяє змінювати модуль пружності, міцність, теплопровідність, електропровідність та стійкість до абразивного зносу. Вплив вказаних наповнювачів на властивості полімерних композитів є нелінійним. Невеликі кількості наповнювача здатні зміцнювати полімерну матрицю, тоді як надмірне наповнення може спричиняти дефекти, пов'язані з недостатнім змочуванням частинок полімером, різницею в пружності та термічних властивостях компонентів, а також утворенням пор через дефіцит зв'язуючого. Зі збільшенням питомої поверхні наповнювача ці ефекти посилюються, і для кожної системи існує оптимальна концентрація, за якої міцність композиту максимальна. На характеристики матеріалу впливають ступінь наповнення, гранулометричний склад і морфологія поверхні частинок.

Збільшення частки наповнювача підвищує в'язкість полімерних сумішей, що ускладнює нанесення покриттів. Під час твердіння полімерів проявляється їхній характерний недолік – значна усадка. У дослідженні [54] встановлено, що введення кварцового піску фракції 0,14 мм у кількості 150 масових частин на 100 частин акрилового полімеру зменшує усадкові деформації у 5 разів порівняно з ненаповненими композиціями та на 10 % порівняно з портландцементом. Оптимальна товщина покриття становить 5 мм, оскільки при більшій товщині когезійні сили полімерної матриці стають недостатніми для протидії розтягувальним напруженням, що призводить до утворення тріщин. Поверхня наповнювача орієнтує молекулярні шари полімеру, підвищуючи міцність прилеглих зон. Функціональні групи на поверхні частинок відіграють важливу роль у формуванні міжфазових зв'язків, що визначають структуру та властивості композитів [58]. Було встановлено, що зі збільшенням взаємодії між полімером і наповнювачем та підвищенням концентрації наповнювача деформація системи зменшується. У системах зі слабкою взаємодією полімер-наповнювач деформація, навпаки, зростала зі збільшенням об'ємної частки наповнення та навіть перевищувала рівень деформації чистої полімерної матриці. У роботі [59] обґрунтовано математичну залежність між розмірами частинок піску та наповнювача для досягнення максимальної щільності та міцності бетону, однак

для полімерних композитів подібні закономірності досліджені недостатньо. У [54] показано, що фракції піску 0,315 і 0,63 мм знижують міцність поліметилметакрилатних композитів, тоді як фракція 0,14 мм забезпечує найкращі результати за умови достатньої товщини полімерної плівки, яка покриває частинки без надмірного збільшення деформацій повзучості.

Полімери широко застосовуються у ремонтних матеріалах для підвищення адгезії свіжого бетону до старого, що є критично важливим під час відновлення конструкцій. Вони використовуються для створення захисних шарів на арматурі, заповнення тріщин, формування бар'єрних покриттів, що перешкоджають проникненню агресивних середовищ, а також для з'єднання окремих елементів конструкцій [60÷62]. Проте полімерні матеріали можуть мати високу усадку, значне теплове розширення, повзучість, обмежений термічний опір і схильність до старіння, що потребує ретельного вибору матеріалу за принципом сумісності. Синергічний ефект полімерів у композиційних матеріалах часто перевищує очікуваний на основі їх масової частки. При вмісті полімеру 5 % від маси цементу він утворює безперервну сітку, яка функціонує як спільне зв'язуюче разом із портландцементом [63]. Умови твердіння мають вирішальний вплив на властивості композитів: цемент потребує вологих умов для гідратації, тоді як полімери – сухих умов для формування плівки. Це зумовлює складність оптимізації технологічних режимів. У роботі [64] досліджували полімерні нанокompозити на основі силану та метилметакрилату з наноглиною та нанокремнеземом. Силанові нанокompозити покращували бар'єрні властивості бетону, зменшуючи сольовий наліт, тоді як метилметакрилатні нанокompозити у дозуванні 5 % запобігали проникненню солей, але не витримували тривалого впливу агресивного середовища. У [65] показано, що взаємодія полімерів із цементом формує щільну структуру, яка підвищує гідроізоляційні властивості, довговічність і міцність.

Полімери, введені у цементну матрицю, можуть знижувати міцність на стиск, але підвищувати міцність на вигин і довговічність. У [66] встановлено, що полімерне зв'язуюче впливає на кінетику гідратації цементу: утворюється $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, гель C–S–H, зменшується концентрація та ступінь орієнтації

портландиту. Це покращує мікроструктуру та підвищує міцність на розрив на 19 % і 16 % через 7 і 28 днів відповідно. У [67] показано, що полібутилакрилат пригнічує ранню гідратацію C_3S і C_3A , збільшує пористість до 36 % і знижує міцність майже вдвічі. Це пов'язано з утворенням агрегатів через взаємодію полімерів із частинками цементу. Протилежні результати отримано у [68], де введення 40 % стирол-акрилової емульсії збільшило міцність на розтяг і вигин у 1,38 та 1,34 рази. ІЧ-спектроскопія та рентгенофазовий аналіз показали утворення комплексів Ca^{2+} -карбоксил, а мікроструктурний аналіз – зменшення товщини межі зв'язку, але не змінює тип продуктів гідратації на границі частинок. У роботі [69] досліджували взаємодію карбонатних і алюмосилікатних наповнювачів із поліакриловою кислотою та стирол-акриловим полімером. Встановлено, що функціональні групи C–O, C–C, Si–H та OH сприяють утворенню поверхневого шару метилсиліконату, який забезпечує гідрофобізацію наповнювачів. Це відкриває перспективи створення полімерних композитів із використанням дрібних відходів бетону як активного наповнювача.

Узагальнюючи, можна зазначити, що властивості полімерних композиційних матеріалів визначаються хімічною природою наповнювача, його розміром, формою та інтенсивністю поверхневих реакцій. Оскільки пісок є найбільш доступним наповнювачем, значна частина якого утворюється під час переробки бетонних конструкцій [15], актуальним є дослідження полімерних композитів із використанням піску різних фракцій. Водночас практично відсутні дослідження полімерних композицій із дрібними відходами бетону як наповнювачем, що становить важливу наукову проблему в контексті утилізації будівельних відходів.

1.3. Огляд методів підвищення якості рециклінгових заповнювачів та матеріалів на їх основі

1.3.1. Технологічні підходи до покращення властивостей рециклінгових заповнювачів

Рециклінгові заповнювачі, отримані з будівельних відходів, зазвичай характеризуються підвищеною пористістю, значним водопоглинанням та

наявністю залишкового цементно-піщаного розчину, що знижує їхню міцність порівняно з природними матеріалами. Дослідження [20, 70, 71] підтверджують, що між ступенем заміщення природного заповнювача та фізико-механічними властивостями бетону існує чітка кореляція, що зумовлює необхідність удосконалення властивостей перероблених матеріалів перед їх повторним використанням. У роботі [72] узагальнено основні підходи до модифікації рециклінгових заповнювачів, які охоплюють фізичні, хімічні та мікробіологічні методи. Фізичні методи спрямовані на відшаровування залишкового розчину та покращення форми зерен і включають механічне подрібнення, термічну обробку, мікрохвильове нагрівання та електроімпульсну дію. Хімічні методи ґрунтуються на реакціях між залишковим розчином і активними речовинами, що дозволяє зменшити пористість і підвищити щільність поверхневого шару. Мікробіологічні методи базуються на біомінералізації, тобто утворенні карбонату кальцію внаслідок метаболічної активності мікроорганізмів, що сприяє ущільненню структури заповнювача. Результати показують, що посилена технологія переробленого заповнювача досягла певного прогресу в покращенні характеристик переробленого заповнювача, але все ще існують деякі проблеми, такі як непостійний ефект зміцнення та нестабільна сумісність композитних матеріалів.

Механічна обробка, яка може включати подрібнення у кульових млинах або інтенсивне стирання, дозволяє частково видалити залишковий розчин і покращити окатаність зерен. Тривалість такої обробки може становити від кількох хвилин до кількох годин [73, 74], що впливає на ступінь очищення та форму частинок. Покращення окатаності позитивно позначається на рухливості бетонної суміші та міцності бетону. У дослідженні [75] порівнювали замочування у воді, механічну та термомеханічну обробку, і встановили, що термомеханічний метод забезпечує найефективніше видалення залишкового розчину, зменшуючи його кількість на 40–60 %. Нагрівання до температур 300–900 °C сприяє відокремленню старого розчину, однак потребує тривалого витримування та подальшого механічного стирання [73]. У роботі [76] бетонні відходи нагрівали до 200–800 °C протягом двох годин, після чого отриманим

порошком замінювали цемент у кількостях 10–30 %. Порошки, активовані при 600 і 800 °С, забезпечили підвищення міцності на стиск і вигин на 19 % і 16 % відповідно, а також підвищили опір усадці. Заповнювач, активований при 800 °С, забезпечив механічні властивості, порівнянні зі стандартним розчином при 10 % заміни. У роботі [70] підтверджено, що нагрівання до 800 °С підвищує реакційну здатність відходів порівняно з 600 °С, хоча надмірне нагрівання може спричинити пошкодження структури заповнювача. Мікрохвильове нагрівання перед дробленням [77] знижує енерговитрати та підвищує крихкість бетону, що полегшує відокремлення залишкового розчину.

Хімічні методи модифікації передбачають обробку кислотами, рідким склом, неорганічними суспензіями або полімерними розчинами. Кислотна обробка (HCl, H₂SO₄) ефективно розчиняє лужні компоненти старого розчину, що дозволяє значно зменшити його кількість. У роботі [78] встановлено, що концентрація кислоти має більший вплив на ефективність очищення, ніж тривалість замочування. Недоліками цього методу є необхідність ретельного промивання та ризик корозії арматури та бетону у випадку залишкової кислотності. У дослідженні [79] порівнювали необроблені, кислотно оброблені та кислотно-механічно оброблені заповнювачі. Подвійна обробка забезпечила суттєве підвищення міцності бетону на стиск, розрив і вигин (на 33,88%, 5,87%, 55,07%, 28,84% відповідно), а також значне покращення стійкості до стирання. Це пояснюється зменшенням пористості та мікротріщин у залишковому розчині та формуванням щільної поверхневої структури. У роботі [80] запропоновано метод кислотного помелу, який поєднує механічне подрібнення та кислотне замочування в одному процесі. Він забезпечив покращення водопоглинання та щільності на 57 %, а також підвищення міцності бетону на 10 %.

Карбонізація є одним із найефективніших методів зміцнення залишкового розчину. Під час карбонізації гідроксид кальцію, гідрати силікату кальцію та інші продукти гідратації реагують із CO₂ з утворенням кальциту, що ущільнює структуру та зменшує пористість. У роботі [81] показано, що карбонізований заповнювач забезпечує вищу міцність бетону порівняно з необробленим. При

100 % заміні природного щебню карбонізованим міцність становила 38,1 МПа проти 33,8 МПа для необробленого заповнювача. У роботі [82] встановлено, що тривалість карбонізації, концентрація CO_2 , вологість і тиск суттєво впливають на ефективність процесу. Поглинання CO_2 різко зростає до тиску 0,01 МПа, а подальше підвищення тиску має незначний ефект. Але надмірний тиск може спричинити розширення пор і мікротріщин. Мікробіологічні методи базуються на мікробно-індукованому карбонатному осадженні. У роботах [83, 84] показано, що біомінералізація знижує водопоглинання заповнювачів на 15 % і підвищує міцність бетону на стиск на 25 %. Це відбувається завдяки утворенню карбонату кальцію, який заповнює пори та мікротріщини на поверхні частинок.

Просочення заповнювачів різними речовинами також дозволяє покращити їх властивості. У роботі [85] встановлено, що обробка HCl з подальшим просоченням метасилікатом кальцію підвищує щільність, знижує водопоглинання та забезпечує міцність бетону, близьку до бетону на природному щебні. У дослідженні [86] вивчали обробку полівініловим спиртом, силікатом натрію та силаном. Полівініловий спирт знизив водопоглинання на 64,56 %, а силікат натрію та силан підвищили міцність на стиск, розколювання та вигин на 9,8 %, 26,53 %, 21,70 % і 14,72 % відповідно. Хімічна реакція утворює кристали C-S-H , які заповнюють пори і мікротріщини, зменшують пористість і підвищують щільність структури заповнювача.

У роботах [73, 87] порівнюється ефективність методів очищення рециклінгових заповнювачів від залишків цементного розчину. Кількість залишків після кислотної, механічної та термічної обробок становить 2 %, 5 % та 11 % відповідно [87]. Всі методи обробки підвищують міцність бетону до понад 95 % від міцності бетону на природних заповнювачах. Сірчана кислота (0,1 моль/л) виявилася найефективнішою серед кислот [88]. У роботах [89÷95] показано, що карбонізація знижує водопоглинання, підвищує щільність, формує кальцит і монокарбонат у контактній зоні, покращує адгезію між заповнювачем і цементною матрицею та підвищує корозійну стійкість арматури. При карбонізації добре гідратованого, висушеного та подрібненого цементного тесту

у водному розчині виявлено [90], що портландит спочатку реагує з розчиненим CO_2 , а в міру його виснаження інші гідрати поступово декальцинуються. Основними продуктами карбонізації є кальцит і алюмосилікатний гель, багатий на луги. Полярizaційний опір бетону з некарбонізованим заповнювачем був більше, ніж у карбонізованого [91]. Ймовірно, це пов'язано з тим, що старий цементний розчин збільшив лужність бетону. У той час як лужність бетону зменшилася після карбонізації, тому що карбонізація може знизити концентрацію вільного лужного металу та гідроксильних іонів, і, таким чином, також може знизити рН у новому бетоні, що послабило пасивацію сталеві арматури. Результати [92] показали, що попередня обробка рециклінгових заповнювачів за допомогою стічних вод, багатих Ca^{2+} може ще більше посилити ефект проточної карбонізації. Це дослідження продемонструвало підхід до об'єднання трьох ресурсів відходів (залишки бетону, стічні води та відходи CO_2) для виробництва зеленого бетону. При дослідженні двоетапного процесу карбонізації у [93] шляхом вивчення впливу ряду експериментальних змінних, включаючи розмір частинок, концентрацію Na_2CO_3 , час і температуру реакції, швидкість потоку CO_2 та концентрацію CO_2 було виявлено, що зміни в основному вплинули на кількість нових продуктів, що утворюються, але лише незначно змінили хімічну структуру нових продуктів. Метод рідко-твердої карбонізації [94] виявився ефективнішим за традиційний газо-твердий: десятихвилинна обробка забезпечила кращі результати, ніж 24-годинна карбонізація під тиском. Аналогічні результати були отримані в [95], де було виявлено, що обробка карбонізацією призводила до масивного осадження кальциту на поверхні заповнювача, який надалі реагував з алюмінатними видами нового цементу з утворенням монокарбонату і служив місцем зародка для зростання C-S-H на поверхні щебню.

Узагальнюючи результати численних досліджень, можна зазначити, що універсального методу підготовки рециклінгових заповнювачів не існує. Кожен метод має свої переваги та обмеження. Термічна обробка потребує високих температур, кислотна – ретельного промивання та контролю корозійної

небезпеки, карбонізація – спеціального обладнання для створення підвищеного тиску. Механічна обробка є найбільш доступною, екологічною та економічною, однак не завжди забезпечує достатнє видалення залишкового розчину. Найкращі результати зазвичай досягаються при комбінуванні кількох методів, що дозволяє одночасно зменшити пористість, підвищити щільність та покращити адгезію між заповнювачем і цементною матрицею.

1.3.2. Підходи до покращення властивостей матеріалів, виготовлених із рециклінгових заповнювачів

Рециклінговий бетон, на відміну від натурального, має складнішу мікроструктуру, що зумовлено наявністю додаткових міжфазних перехідних зон, сформованих унаслідок контакту нового цементного каменю з залишковим розчином на поверхні перероблених заповнювачів. Якість цих зон значною мірою залежить від вологості заповнювачів, яка визначає умови гідратації та формування структури нового бетону. Через високу поглинаючу здатність перероблених заповнювачів виникає потреба у методах, здатних зменшити негативний вплив цього чинника на властивості матеріалу. Однак, як показано у дослідженні [96], просте попереднє замочування заповнювачів не забезпечує суттєвого покращення характеристик бетону, що свідчить про необхідність більш комплексних підходів. Загалом механічна міцність і довговічність бетону знижуються зі збільшенням частки рециклінгових заповнювачів, що стимулює пошук методів підвищення щільності та однорідності структури матеріалу. Одним із підходів є метод еквівалентного об'єму [12, 32], який передбачає врахування об'єму залишкового розчину як частини крупного заповнювача у свіжому бетоні та як частини нового розчину після твердіння. Проте через неможливість точного визначення об'єму залишкового розчину цей метод забезпечує лише наближені результати і не гарантує стабільності властивостей.

Найбільш поширеним напрямом є введення дрібнодисперсних порошоків, які здатні заповнювати пори перероблених заповнювачів і зменшувати їх водопоглинання. До таких матеріалів належать гранульований доменний шлак

[97], цеоліти [98], зола-винесення, шлак, метакнолін [7, 99, 100, 101]. У роботі [97] показано, що додавання 25 % шлаку до цементу підвищує міцність бетону на стиск на 25–30 % через 28 днів і знижує капілярне водопоглинання до рівня бетону на природному заповнювачі. У дослідженні [98] для активації шлаку застосовували рідке скло та сульфат натрію, що забезпечило підвищення міцності на стиск на 26,5 %. Однак одночасне використання обох активаторів негативно вплинуло на морозостійкість, що свідчить про складність оптимізації складу. У роботі [99] встановлено, що комбіноване використання золи-винесення, шлаку та метакноліну забезпечує кращі результати, ніж застосування одного наповнювача, оскільки різні добавки компенсують недоліки одна одної. При використанні модифікованих заповнювачів пористість і водопоглинання зменшувалися на 18,97 % і 25,33 % відповідно, а середня густина наближалася до показників натуральних матеріалів. У дослідженні [100] показано, що збільшення частки рециклінгових заповнювачів призводить до поступового зниження міцності бетону на стиск, розтяг і вигин, а також модуля пружності та ударної в'язкості. Найбільше знижується модуль пружності, тоді як міцність на розтяг зменшується найменше. Підвищений вміст рециклінгових заповнювачів також пов'язаний зі збільшенням водопоглинання та зниженням стійкості до проникнення хлоридів, сульфатної корозії, кислотного впливу, морозу та карбонізації. Для зменшення цих негативних ефектів у роботі запропоновано спільне використання золи-винесення та шлаку, що дозволило частково компенсувати зниження міцності.

У низці досліджень підтверджено, що введення дрібних мінеральних добавок значно покращує структуру бетону [7]. У роботі [102] встановлено, що додавання золи-винесення, кремнезему та нанокремнезему підвищує 28-денну міцність бетону на 39,4 %, 55,2 % та 17,6 % відповідно. У дослідженні [103] поверхню перероблених заповнювачів обробляли розчинами на основі сульфоалюмінатного цементу та базальтового порошку, що забезпечило зниження роздавлюваності на 23 %, водопоглинання на 19 % та підвищення механічних властивостей на 33 %. У роботі [104] обробка портландцементом,

метакаоліном і нанокремнеземом збільшила міцність бетону на стиск на 25 %, зменшила водопоглинання на 7 %, капілярний підйом на 53 % і проникнення хлоридів на 67 %, що свідчить про суттєве ущільнення структури.

Довговічність бетону на рециклінгових заповнювачах у агресивних середовищах є одним із ключових аспектів досліджень. У роботі [105] встановлено, що повна заміна природних заповнювачів рециклінговими значно збільшує капілярне водопоглинання та відкриту пористість, що пов'язано з підвищеною кількістю капілярних пор. Відкрита пористість зростає для сумішей з крупним та дрібним рециклінговими заповнювачами на 42 % і 64 %, відповідно, у порівнянні зі стандартним бетоном. У дослідженні [106] кількісно визначено пористість цементно-піщаних розчинів: для натурального піску вона становила 27,96 %, тоді як для рециклінгового – 38,84 %. Гелева пористість C–S–H у бетоні з переробленим заповнювачем досягала 56 % загальної пористості, що вимагає її зменшення для покращення властивостей матеріалу. У роботах [9, 107] показано, що додавання мінеральних добавок, таких як подрібнена цегла, зола-винесення, метакаолін і кремнезем, дозволяє зменшити пористість і середній діаметр пор, причому найбільший ефект забезпечує кремнезем (зменшення пористості до 27,3% і середнього діаметру пор до 16,5 нм) завдяки високій пуцолановій активності. Аналогічні результати отримано у [108], де введення 12 % нанокремнезему підвищило щільність гідросилікатного гелю на 30,8 % і знизило загальну пористість на 24,4 %.

У роботі [109] досліджували вплив різних методів обробки рециклінгових заповнювачів на властивості бетону, використовуючи метод двоетапного змішування. Суміші з метакаоліном і нанокремнеземом продемонстрували значно кращі механічні властивості та довговічність порівняно з контрольними. У дослідженні [110] порівнювали чотири методи змішування – двоетапне змішування, змішування будівельного розчину, змішування в піску та подвійне змішування. Встановлено, що бетон, виготовлений із 100 % рециклінгового заповнювача, може досягати цільової міцності через 90 днів за умови використання певного методу змішування будівельного розчину. У роботі [111] дослід-

жували ефективність вапняного порошку та метакаоліну у бетоні, що містить перероблений заповнювач, оброблений кислотою. Оптимальні дозування дрібної фракції (15 %), вапняного порошку (17 %) і метакаоліну (22 %) забезпечили покращення фізичних властивостей бетону. Дрібна фракція та метакаолін знижували здатність до самоцементування рециклінгового бетону, але забезпечували більш пластичну поведінку та низьку проникність. У роботі [112] показано, що пасти, виготовлені зі 100 % переробленого цементу або бетонного порошку, можуть досягати міцності, порівнянної з пастами на портландцементі, за умови використання відповідних мінеральних або хімічних добавок. Викиди CO_2 при виробництві переробленого цементу становили лише 0,05–0,40 т CO_2 на тону, що значно нижче за 0,75–0,82 т CO_2 для портландцементу.

У роботі [113] описано хімічну реактивацію рециклінгових матеріалів за допомогою Na_2SiO_3 , NaOH та Na_2CO_3 . Оптимальне співвідношення компонентів забезпечило подвоєння міцності на стиск порівняно з неоптимальними сумішами. У дослідженні [45] встановлено, що введення змішаної пуцоланової добавки золи-винесення та мікрокремнезему разом із полікарбосилатним суперпластифікатором забезпечує приріст міцності дрібнозернистих бетонів до 125,7 МПа на 28 добу завдяки формуванню щільної ультрамікроструктури та зміцненню контактної зони між заповнювачем і цементною матрицею. У роботі [46] показано, що використання рециклінгового щебню та піску у дорожніх бетонах знижує міцність на стиск на 20–26 %, але майже не впливає на міцність на розтяг при згині, що пояснюється високою адгезією пористого заповнювача до цементно-піщаної матриці.

У дослідженні [31] встановлено, що склад, міцність та вік подрібненого бетону не мають вирішального впливу на властивості рециклінгового крупного заповнювача. Основним чинником є кількість залишкового розчину на поверхні зерен, яка може значно варіювати навіть у межах однієї фракції. Зменшення розміру зерен збільшує частку залишкового розчину, що знижує передбачуваність властивостей бетону. Для двофракційної суміші максимальна насипна густина досягається при співвідношенні фракцій 5–10 мм та 10–20 мм у

пропорції 20:80. Зразки бетону з таким заповнювачем демонстрували вищу міцність порівняно з бетоном на натуральному щебні за однакового вмісту цементу та води, що пояснюється поглинанням води пористим залишковим розчином і ущільненням цементного тіста у контактних зонах.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

На підставі численних досліджень можна зробити висновок, що використання рециклінгових заповнювачів у цементно-піщаних розчинах та бетонах, а також у полімернаповнених композитних матеріалах дозволяє досягати значних переваг не тільки з точки зору економії і екологічності матеріалів, але й покращення механічних і фізичних властивостей бетонів. Однак для того, щоб досягти оптимальних результатів, необхідно ретельно контролювати склад суміші, рівень заміщення природних заповнювачів, а також умови їх обробки та затвердіння. Врахування цих факторів дозволяє отримати матеріали, що поєднують високу міцність, низьку пористість і довговічність, а також мають позитивний екологічний ефект завдяки використанню перероблених матеріалів. При цьому важливо розвивати методи визначення оптимальних пропорцій різних компонентів у складі сумішей з рециклінговими заповнювачами, а також більш детально вивчати механізми гідратації і ущільнення матеріалу, що сприяють покращенню його характеристик в умовах тривалої експлуатації.

Огляд попередніх досліджень показав суперечливі дані щодо заміни цементу, піску і щебню подрібненими наповнювачами у матеріалах без погіршення властивостей. Аналіз відомих закономірностей в області будівельного матеріалознавства, заснованих на наукових засадах харківської школи професора Плугіна А.М., дозволяє висунути наукову гіпотезу щодо забезпечення достатньої щільності і міцності бетону, будівельного розчину і полімеркомпозиційного матеріалу з використанням рециклінгових наповнювачів за рахунок забезпечення оптимальних коефіцієнтів розсунення зерен на мікро- і мезорівнях структури та з врахуванням електроповерхневих властивостей компонентів полімеркомпозиційних матеріалів.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1

1. Зростаюча увага до зменшення використання природних ресурсів, зниження викидів парникових газів та повторного використання будівельних залишків, які утворюються під час знесення або руйнування різноманітних об'єктів, роблять актуальною науково-технічну задачу розширення можливостей утилізації залишків бетону, у тому числі на залізничному транспорті, де планується масова заміна залізобетонних шпал у зв'язку з закінченням їх нормативного терміну експлуатації та переходу на звужену євроколію.

2. На основі аналізу наукових джерел встановлено, що використання подрібнених залишків бетону як крупних та дрібних заповнювачів при виробництві рециклінгового бетону погіршує його фізико-механічні характеристики через залишки прикріпленого цементно-піщаного розчину, який має більшу пористість і меншу міцність порівняно з натуральними заповнювачами.

3. Аналіз методів покращення властивостей рециклінгових заповнювачів виявив три основних шляхи – фізичний (видалення прикріпленого шару розчину), хімічний (зміцнення прикріпленого шару розчину), мікробіологічний (використання метаболічної активності бактерій). Найбільш ефективними і економічно доцільними є методи просочення рециклінгових заповнювачів хімічними речовинами для ущільнення старого розчину і створення умов для кращої адгезії нового цементно-піщаного розчину.

4. Аналіз методів покращення властивостей бетонів та будівельних розчинів на рециклінгових заповнювачах встановив один основний метод, а саме додавання мікронаповнювачів для компенсації збільшення пористості і зменшення щільності і міцності готових виробів з використанням рециклінгових заповнювачів.

5. Узагальнення існуючих методів утилізації подрібнених відходів бетонних конструкцій виявило відсутність загального підходу до розрахунків кінцевих складів бетону на рециклінгових заповнювачах з урахуванням їх гранулометричного складу, а також незначну кількість робіт стосовно використання дрібної фракції як наповнювачів у полімеркомпозиційних матеріалах. Дослідження цих питань становить актуальність даної роботи.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріали, які використовувалися при проведенні досліджень

2.1.1. Розробка способу отримання заповнювачів із залишків залізобетонних шпал

Дослідження проводилися з використанням уламків залізобетонних шпал, частини яких представляють собою монолітні утворення, сформовані зернами щебню, скріпленими цементно-піщаною сумішшю з залишків старого бетону (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Загальний вигляд залишків залізничних залізобетонних шпал

Метою розробки методу виготовлення заповнювачів для бетону шляхом подрібнення відходів залізобетонних шпал було покращення очищення поверхні гранітного щебню та кварцового піску від залишків цементного каменю, збереження їх кубоподібної форми для подальшого застосування у бетонних сумішах, виробках і конструкціях. Залізобетонні шпали після вилучення металевої арматури (рис. 2.2) дробляться за допомогою щоквої дробарки з зазором між робочими пластинами у 20 мм. Такий розмір відповідає максимальним розмірам зерен гранітного щебню, що використовується у бетоні шпал. Якщо використовуються дробарки іншого типу або збільшується зазор між пластинами щоквої

дробарки понад 20 мм, значна частина отриманих зерен утворює агрегати, які включають зерна щебню, цементно-піщану суміш і цементний камінь (рис. 2.3). В таких утвореннях граніт займає 50...70 % об'єму та 30...50 % поверхні, що обумовлює зниження міцності бетону на стиск до 40...60 % порівняно з бетоном аналогічного складу з первинним гранітним заповнювачем.



Рис. 2.2. Відходи залізобетонних шпал Рис. 2.3. Зерна фракцій більше 20 мм

Подрібнений матеріал поміщають у барабанний млин, де використовуються сталеві помольні тіла діаметром 50 мм, 40 мм та 25 мм у пропорції 1 : (0,9–1,1) : (0,9–1,1) (рис. 2.4). Під час роботи барабанного млина з відходами шпал і помольними тілами спостерігається водоспадне та каскадне переміщення помольних тіл. У водоспадному режимі точковий контакт між помольними тілами та фрагментами відходів шпал є мінімальним, що створює високі контактні напруження, які перевищують міцність матеріалу і призводять до його руйнування. У каскадному режимі відбувається абразивне видалення цементного каменю з поверхонь щебню та піску. Використання помольних тіл різного діаметру у заданих пропорціях дозволяє забезпечити більш щільну укладку, що збільшує площу подрібнення та насипну густину, підвищуючи ефективність очищення поверхонь щебню та піску від цементного каменю і формування зерен обкатаної або кубовидної форми. Процес помелу триває 30 хвилин, після чого суміш вивантажують, видаляють помольні тіла і розділяють подрібнений матеріал за допомогою сит із отворами розміром 20 мм, 10 мм, 5 мм, 2,5 мм, 1,25 мм для крупної фракції та 0,63 мм, 0,315 мм і 0,14 мм для дрібної

фракції (рис. 2.5). На розроблений спосіб отримання заповнювачів із залишків залізобетонних шпал було отримано патент на корисну модель (Додаток Б).



Рис.2.4. Помольні тіла



Рис.2.5 Сита з розміром комірок 20, 10 і 5 мм

У результаті процесу отримують щебінь фракції 5...20 мм (рис. 2.6) та пісок фракції 0,315...5 мм (рис. 2.7). Це забезпечує такий технічний ефект: зерна щебню та піску набувають кубовидної або обкатаної форми, а їхні поверхні очищуються від залишків старого цементного каменю. Додатково крупний заповнювач промивають проточною водою. У зернах фракції 5...20 мм частка граніту складає 90...95 % за об'ємом, а на поверхні – 50...70 %, що сприяє підвищенню міцності бетону на стиск до 70...90 % порівняно з бетоном аналогічного складу, виготовленим з первинного гранітного заповнювача. У зернах фракції 0,315...5 мм частка оксиду кремнію складає 25...35 %, оксиду кальцію – 45...50 % [32].



Рис.2.6. Отримані розробленим способом зерна фракції 5-20 мм



Рис.2.7. Отримані розробленим способом зерна фракції 0,315-5 мм

2.1.2. Характеристики матеріалів для проведення досліджень

Для досліджень використовувалися в'яжучі матеріали – портландцемент, поліметилметакрилат; мінеральні наповнювачі – дрібна фракція після помелу залізобетонних шпал за п.2.1.1; заповнювачі – пісок кварцовий, щебінь гранітний; рециклінгові заповнювачі за п.2.1.1.

Портландцемент ПЦ П/Б-Ш-400 за ДСТУ Б В.2.7-46 [114]. Питома поверхня 350 м²/кг ; початок тужавіння 190 хв; кінець тужавіння 210 хв; істинна густина 3200 кг/м³; насипна густина 1200 кг/м³; активність 40 МПа.

Пісок кварцовий Безлюдівського кар'єру Харківської області згідно з ДСТУ Б В.2.7-32 [115]. Властивості за ДСТУ Б В.2.7-232 [116]: модуль крупності – $M_k = 1,2$; істинна густина 2650 кг/м³; насипна густина 1200 кг/м³; порожнистість = 0,46; гранулометричний склад – часткові залишки в % на ситах з розмірами вічка: 2,5 мм – 0,3; 1,25 мм – 0,3; 0,63 мм – 2,4; 0,315 мм – 27,2; 0,14 мм – 56,6; пройшло через 0,14 мм – 13,2.

Щебінь Новоукраїнського кар'єру суміші фракцій 5-20 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-75 [117]. Властивості за ДСТУ Б В.2.7-71 [118]: істинна густина 2650 кг/м³; насипна густина 1420 кг/м³; порожнистість 0,46; гранулометричний склад - часткові залишки в % на ситах з розмірами вічка: 20 мм - 7,7; 10 мм – 59,2; 5 мм – 29,4; пройшло через 5 мм – 3,7.

Рециклінговий наповнювач, отриманий за п.2.1.1: модуль крупності – $M_k = 2,0$; істинна густина 2650 кг/м^3 ; насипна густина 1500 кг/м^3 ; порожнистість = $0,38$; гранулометричний склад – часткові залишки в % на ситах з розмірами вічка: $2,5 \text{ мм} - 3,25$; $1,25 \text{ мм} - 4,99$; $0,63 \text{ мм} - 5,72$; $0,315 \text{ мм} - 9,79$; $0,14 \text{ мм} - 35,25$; пройшло через $0,14 \text{ мм} - 41,0$.

Пластмаса акрилова самотвердуюча АСТ-Т за ТУ 64-2-226-83 [119] виробництва ПАТ "СТОМА" (м. Харків) – це компаунд холодного твердіння, що складається з двох компонентів. Порошок – суспензійний полімер на основі метилметакрилату з ініціатором. Рідина – метиловий ефір метакрилової кислоти з активатором та інгібітором. Ударна в'язкість – не менше 3 кДж ; руйнівне напруження при вигині – не менше $69,0 \text{ МПа}$; час набухання при температурі $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ – $10 \dots 50 \text{ хв}$.

2.2. Методи проведення експериментальних досліджень

2.2.1. Методи визначення фізико-механічних властивостей

Визначення зернового складу крупного заповнювача проводилося згідно з ДСТУ Б В.2.7-71 [118], зернового складу дрібного заповнювача згідно з ДСТУ Б В.2.7-232 [116]. Встановлення відповідності властивостей заповнювачів вимогам для застосування у бетонних сумішах здійснювалося за ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [47]. Гранулометричний склад і розподіл частинок за розмірами визначали за допомогою просіювання суміші крупного та дрібного заповнювачів, відповідно до вимог ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [47], за частковими залишками на ситах. Форму зерен щебню для крупного заповнювача, а саме вміст пластинчастих (лещадних) і голчастих зерен, встановлювали шляхом вимірювання сторін кожного зерна, визначаючи кількість частинок, товщина яких утричі й більше менша за довжину, згідно з ДСТУ Б В.2.7-71 [118]. Показник стирання (зносу) щебню визначали як втрату маси зерен після обертання проби в барабані з металевими кулями, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-71 [118]. Для цього підготовлену пробу поміщали у поличковий барабан разом зі сталевими кулями й обертали зі швидкістю 33 об/хв . Після завершення

випробувань вміст барабана просіювали через сито з отворами діаметром 5 мм і контрольне сито з сіткою № 1,25, а з'єднані залишки зважували.

Зразки цементно-піщаного розчину формувалися у вигляді балочок розміром 16×4×4см, ущільнювалися на стандартному лабораторному вібромайданчику, зберігалися у нормальних умовах 7 і 28 діб, у повітряно-сухих умовах – 90 і 270 діб. Визначення міцності на згин і стиск, а також середньої густини визначали згідно з ДСТУ Б В 2.7-187 [120] і ДСТУ Б В 2.7-239 [121].

Зразки бетонів формувалися у вигляді кубів розміром 10×10×10 см, ущільнювалися на стандартному лабораторному вібромайданчику, зберігалися у нормальних умовах 7 і 28 діб. Склад бетону розраховували згідно з ДСТУ Б В.2.7-215:2009 [122], міцність і середню густину зразків визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [123] і ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [124].

2.2.2. Розробка методики визначення розмірів зерен рециклінгових заповнювачів та їх форми

Якість природних заповнювачів для бетону, таких як пісок і щебінь, оцінюється відповідно до чинних стандартів [115, 117]. Водночас передбачено використання як крупних, так і дрібних заповнювачів, отриманих з промислових відходів [125, 126], зокрема матеріалів із супутньо видобутих гірських порід та відходів збагачення підприємств вугільної, металургійної та інших галузей. У ролі дрібного заповнювача можуть застосовуватися золошлакові суміші від теплових електростанцій або крупнозерниста зола виносу. В умовах воєнних дій в Україні значно зросла кількість бетонних конструкцій, які потребують належного зберігання, що актуалізує їх переробку для повторного використання у відновленні житлових будинків та інфраструктури. Оцінювання якості рециклінгових заповнювачів повинно базуватися на стандартних методах, але через особливості походження рециклінгових піску і щебню виникла потреба у розробці нових, сучасних і швидких способів перевірки їх відповідності стандартам. Це зумовлює необхідність удосконалення існуючих методів аналізу їх властивостей, зокрема гранулометричного складу.

Згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-75 [117], якість крупного заповнювача для бетону оцінюється за такими показниками: зерновий склад, форма зерен, міцність, стирання, наявність слабких порід, морозостійкість, вміст пилоподібних і глинистих частинок (зокрема глини у грудках), шкідливі домішки, радіаційні властивості та стабільність фізико-механічних характеристик. Для дрібного заповнювача оцінка проводиться згідно з ДСТУ Б В.27-32 [115] і включає аналіз зернового складу, вмісту пилоподібних і глинистих частинок (включаючи глину у грудках), органічних домішок, міцності (у випадку подрібнених пісків) і сумарної питомої активності природних радіонуклідів. Найважливішими критеріями для складання бетонної суміші є зерновий склад і форма обох видів заповнювачів. Зерновий склад визначається методом просіювання проби через стандартний набір сит, а для встановлення вмісту зерен пластинчастої та голчастої форми, а також показника стирання, використовується поличний барабан відповідно до ДСТУ Б В.2.7-71 [118]. Під час визначення складу бетону чи цементно-піщаного розчину розміри зерен впливають на витрати цементу, а їхня форма визначає водопотребу та рухливість сумішей. Однак стандартний метод аналізу зернового складу має недоліки, адже не дозволяє точно визначити розміри зерен у найбільш характерній фракції, що призводить до похибок у розрахунках та перевитрат цементу. Оцінка форми зерен за загальноприйнятою процедурою потребує значних зусиль і може спричиняти помилки, які впливають на кількість води, необхідної для приготування сумішей. У зв'язку з цим дослідники пропонують альтернативні методи визначення розмірів та форми частинок піску і щебню.

У роботах [127, 128] процес визначення округлості форми C включав початкове обчислення площі та периметра кожної частинки за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, після чого застосовувалося відповідне рівняння

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}, \quad (2.1)$$

де A – площа частинки заповнювача (мм^2); P – периметр частинки заповнювача (мм).

Округлість форми може змінюватися в діапазоні від 0,0 до 1,0, де 1,0 відповідає ідеально круглій формі. Значення ближче до 0,0 свідчать про більш витяг-

нугу форму частинок. Наприклад, у дослідженні [127] округлість становила 0,66 до механічної обробки в барабанному млині і зростає до 0,79 після обробки. Таким чином, завдяки стиранню в млині форма частинок стала більш округлою, збільшившись на 13 %.

У роботі для швидкого визначення розмірів зерен щебню застосували альтернативний метод, що передбачав наступні етапи: отримання цифрових зображень заповнювачів за допомогою фотокамери, обробку цих зображень у програмному забезпеченні ImageJ, доступному для використання безкоштовно. Після перетворення зображень програма обчислювала площу кожної частинки, її периметр і округлість за формулою (2.1). На основі визначеної площі розраховували еквівалентний діаметр кожної частинки, встановлювали інтервали діаметрів, визначали кількість частинок у кожному інтервалі та будували криву розподілу частинок за розмірами. У дослідженні розміри частинок визначали шляхом аналізу фотографій рециклінгових заповнювачів, які пройшли механічну очистку від залишків цементно-піщаного розчину в барабанному млині. Етапи процесу представлені на рис. 2.8.

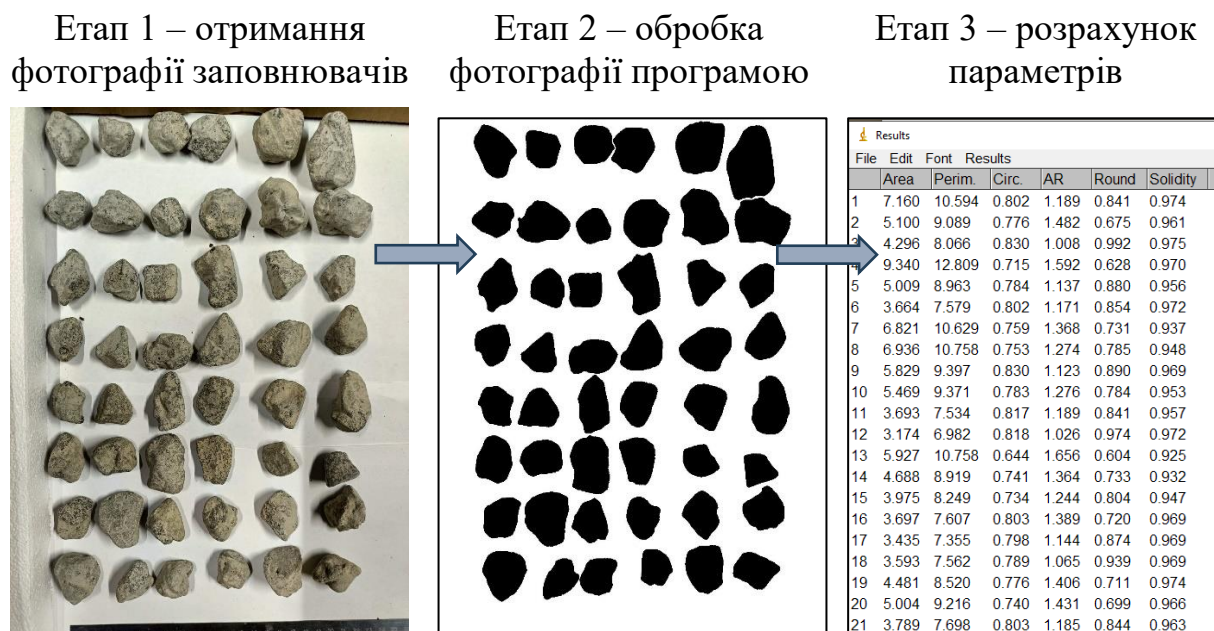


Рис. 2.8. Обробка зображень програмою ImageJ

На третьому етапі результати розрахунків подаються у форматі таблиці: у першому стовпці зазначається номер частинки, у другому й третьому – площа та периметр частинки відповідно, а в четвертому – округлість, обчислена за формулою (2.1). Аналогічну процедуру виконали і для обробки фотографій природних заповнювачів. На основі отриманих даних можна обчислити еквівалентний діаметр частинок, використовуючи їх площу (вказану у стовпці 2 таблиці на рис. 2.8), а також створити діаграму розподілу частинок за розмірами. Результати наведено у відповідних розділах нижче.

2.2.3. Фізико-хімічні методи дослідження

Для дослідження були використані оптична мікроскопія і інфрачервона спектроскопія. Підготовку зразків до дослідження здійснювали в такій послідовності: зразок висушували до постійної маси при температурі 70 ± 3 °C, подрібнювали до розміру $0,5 \div 1,0$ мм, видаляли великі частинки і розтирали в агатовій ступці до повного проходження через сито з розмірами отворів $0,063$ мм.

Інфрачервоні спектри (ІЧ) поглинання отримували за допомогою інфрачервоного Фур'є-спектрометра Bruker Alpha. Діапазон довжин інфрачервоних хвиль $400 \div 4000$ cm^{-1} . Зразки для даного дослідження, відібрані та оброблені за описаною вище методикою, у вигляді порошку засипали в прес-форму і під тиском $8 \div 8,5$ МПа запресовували в таблетки з додаванням KBr. ІЧ-спектри ідентифікували за [129].

Оптична світлова мікроскопія застосовувалася для вивчення поверхні рециклінгових заповнювачів та мезоструктури зразків розроблених матеріалів. Дослідження проводилися за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-2 у відбитому світлі при 87-ми кратному збільшенні, що дає змогу розрізняти структурні елементи розміром до $5 \div 10$ мкм. Фото отримували шляхом зйомки зображення в окуляр мікроскопа цифровим фотоапаратом з роздільною здатністю не менше 3 мегапікселів.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2

1. Надано характеристики матеріалів, які використовуються при проведенні досліджень – в'язучих (портландцемент, поліметилметакрилат), заповнювачів (пісок, щебінь), зокрема рециклінгових, наповнювачів (дрібна фракція помелу залізобетонних шпал).

2. Відповідно до завдань дослідження визначено основні стандартні методи випробувань фізико-механічних властивостей матеріалів і фізико-хімічні методи вивчення їх структурних особливостей.

3. Розроблено та описано спосіб отримання рециклінгових заповнювачів із подрібнених шпал сухим помелом із застосуванням певного співвідношення сталевих помольних тіл визначених розмірів, який дозволяє збільшити ступінь очищення поверхні крупного заповнювача до 95 % із збереженням його кубовидної форми.

4. Розроблено методику прискореного визначення геометричних характеристик рециклінгових заповнювачів, а саме гранулометричного складу і ступеня окатаності, обробкою цифрових зображень програмою ImageJ, яка дозволяє за короткий час визначати розміри, кількість і форму частинок розмірами від 1 мкм і більше.

РОЗДІЛ 3

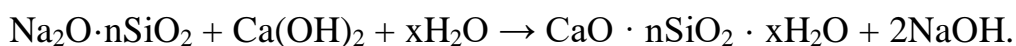
ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РЕЦИКЛІНГОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ

3.1 Покращення властивостей попередньою обробкою крупних заповнювачів

Отримані в розділі 1 результати огляду джерел свідчать, що використання 100% великого заповнювача з необробленого щебню в бетоні негативно впливає на його міцність на стиск і середню густину. Це пов'язано з тим, що залишковий розчин на поверхні щебню має гіршу якість у порівнянні з природними заповнювачами. Тріщини й пухкі залишки розчину заважають утворенню міцного зв'язку між щебнем і цементним тістом, що створює слабкі місця в бетонній структурі. Натомість, використання механічно обробленого або просоченого щебню дає протилежні результати. Видалення слабких частинок розчину або їх обробка силікатом натрію сприяють покращенню фізико-механічних властивостей бетону. Поліпшена поверхня забезпечує більш надійний зв'язок у зоні контакту між цементним тістом і заповнювачем, що підвищує загальну міцність бетону. В роботі розроблено метод виготовлення заповнювачів для бетону шляхом подрібнення відходів залізобетонних залізничних шпал (п. 2.1.1). Це дозволяє покращити очищення поверхні гранітного щебню та кварцового піску від залишків цементного каменю та зберегти кубовидну форму для подальшого використання у виробництві бетонних сумішей, виробів і конструкцій. Теоретичне обґрунтування цього методу полягає у дії помольних тіл різного діаметру, які забезпечують повне очищення щебню від залишків цементно-піщаного розчину із збереженням кубовидної форми частинок. Використання помольних тіл різних діаметрів у певному співвідношенні забезпечує більш щільне пакування помольних тіл, збільшуючи їх подрібнюючу поверхню та насипну густину. Це підвищує продуктивність млина з точки зору очищення поверхонь щебню та піску від

залишків цементного каменю та отримання зерен обкатаної або кубовидної форми (рис. 2.6). Крім того, використання рециклінгової сировини під час виготовлення бетону вирішує проблему утилізації відходів залізобетонних шпал залізниць та зменшує потребу в природних заповнювачах.

Метод посилення поверхні силікатом натрію заснований на хімічній реакції та цементуючій дії між силікатом натрію та переробленими заповнювачами. Під час процесу обробки розчин силікату натрію може проникати всередину частинок переробленого заповнювача, хімічно реагувати з цементними матеріалами всередині, утворювати продукти гідратації цементних матеріалів і створювати зв'язки з цементною матрицею, таким чином покращуючи рециклінгові заповнювачі. Основна схема цього процесу може бути описана таким чином



Розчин силікату натрію здатний вступати в реакцію з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в міжконтактній зоні з утворенням гелю C-S-H. Гель C-S-H не тільки заповнить пори в міжконтактній зоні, але й збільшить міцність рециклінгових заповнювачів, що, у свою чергу, збільшує міцність бетону на рециклінгових заповнювачах. Кілька досліджень підтверджує такий підхід [72, 130 ÷ 132]. Дослідження [130] показує, що додавання силікату натрію до цементного розчину може значно зменшити капілярне всмоктування. Автори [133] виявили, що після занурення в силікат натрію з модулем 2,8 міцність переробленого грубого заповнювача збільшилася, водопоглинання зменшилося, а міцність бетону збільшилася більш ніж на 50%, що свідчить про значний ефект модифікації. Силікат натрію також може синергізувати з іншими наноматеріалами для модифікації перероблених агрегатів. Наприклад, у дослідженні [134] виявили, що порівняно з контрольними зразками, міцність на стиск і міцність на розтяг бетону з переробленого заповнювача, модифікованого комбінацією силікату натрію та нанокремнезему, зросла на 25,3% і 21,1% відповідно через 56 днів. Порівняно з бетоном на необроблених заповнювачах, рухливість, міцність на стиск, міцність на розколювання та вигин бетону з переробленого заповнювача, приготовленого за допомогою просочення силікату

натрію та силану, збільшуються на 9,8%, 26,53%, 21,70% та 14, 72% відповідно [131]. Аналіз мікроструктури показує, що композиційна просочувальна обробка силікатом натрію і силаном найбільше сприяє заповненню тріщин і отворів на поверхні рециклінгової сировини крупного заповнювача, що робить міжфазну перехідну зону рециклінгового бетону більш компактною, а структуру стабільнішою. Це пояснюється тим, що коли рециклінговий заповнювач вступає в контакт із новим цементним розчином, продукти гідролізу силікату натрію на поверхні заповнювача та в порах можуть реагувати з Ca^{2+} та Al^{3+} у продуктах гідратації цементу, утворюючи гідрат силікату кальцію та гідрат алюмінату кальцію, таким чином прискорюючи гідратацію та захоплення цементу. Попереднє покриття переробленого бетонного заповнювача суспензією силікату натрію на п'ять-десять хвилин призвело до збільшення міцності на стиск кінцевого бетону з обробленим рециклінговим заповнювачем на 32,4% порівняно з необробленим бетоном. Однак обробка силікатом натрію має свої обмеження. Оскільки гідросилікатний гель утворюється в результаті реакції лугу з реактивними фазами кремнезему, включення додаткового лугу (наприклад, NaOH) може збільшити ймовірність зниження стійкості до лужно-кремнеземної реакції, яка відбувається між лужними катіонами та гідроксильними іонами в поровому розчині гідратованого цементного тіста та певними реакційноздатними фазами кремнезему, присутніми в заповнювачах, що використовуються в бетоні [135, 136]. Таке обмеження не дозволяє широке застосування такого методу для покращення властивостей бетону на рециклінгових заповнювачах.

3.2 Структурний підхід до покращення властивостей матеріалів на рециклінгових наповнювачах

У будівельному матеріалознавстві загальноприйнятим є виділення кількох рівнів структури матеріалу в залежності від розмірів структуроутворюючих елементів, оточених матрицею із елементів меншого рівня. Макроструктура як структуроутворюючий елемент містить щебінь, мезоструктура – пісок,

мікроструктура – цемент. Роботами школи Плугіна А.М. [137] виділено субмікрорівень, в якому структуроутворюючі частинки кристалогідратів оточені матрицею із гелевих частинок новоутворень. У роботі [7] цей рівень позначено як наноструктурний рівень. Для полімернаповнених матеріалів запропоновано виділяти надмолекулярний рівень, пов'язаний з розмірами глобул макромолекул полімерів. Схожий підхід викладено у дослідженні [106], де у субмікроструктурі цементного гелю розрізняється С–S–Н низької щільності, С–S–Н високої щільності та С–S–Н надвисокої щільності із значеннями щільності твердої упаковки для трьох С–S–Н фаз відповідно 0,64, 0,74 і 0,84.

Оскільки частинки заповнювачів не є сферичної форми, то неможливо до розрахунку таких систем застосовувати підхід, викладений у [138], де найбільша щільність досягається при певній кількості частинок різних розмірів, але моделювання виконується з врахуванням їх порожнистості, а не розмірів частинок, які приймаються ідеально сферичної форми. У дослідженні [75] фактичний ступінь упаковки розраховувався беручи до уваги розмір частинок найбільш представницької фракції і її порожнистість без врахування розміру частинок нижчого рівня. Це призвело лише до 5% покращення міцнісних властивостей бетону на перероблених заповнювачах. Але врахування розмірів частинок із застосуванням методів упаковки у роботі [139] призвело до збільшення міцності бетону на стиск тільки для сумішей на природних заповнювачах і не дало ефекту для переробленого бетону.

Огляд попередніх досліджень у розділі 1 показує, що використання дрібних фракцій відходів зруйнованих бетонних конструкцій здебільшого негативно впливає на фізико-механічні властивості цементно-піщаних розчинів. Щоб уникнути таких наслідків, дослідники застосовують методи ущільнення структури, такі як введення мікронаповнювачів або регулювання гранулометричного складу шляхом емпіричного перебору варіантів, як це було зроблено у роботі [140]. Але результати були задовільними тільки стосовно рухливості та електричного опору готових сумішей. Не було досягнуто збільшення міцності та покращення інших показників. В Україні для визначення

складу таких матеріалів використовується параметр – коефіцієнт розсуву зерен щебню цементно-піщаним розчином $\alpha_{ц.т.}$, який визначається за емпіричними номограмами [47], проте без врахування специфіки гранулометричного складу компонентів. Отже, покращення міцності цементно-піщаних розчинів на основі рециклінгового заповнювача можна зробити шляхом оптимізації їх складу з урахуванням структурних характеристик.

Згідно з численними дослідженнями харківської наукової школи професора Плугіна А. М., для досягнення максимальної щільності й міцності матеріалів важливо дотримуватися принципу, за яким відстань між частинками заповнювача (умовна товщина шару) повинна відповідати розміру зерен заповнювача на нижчому рівні структури (рис. 3.1).

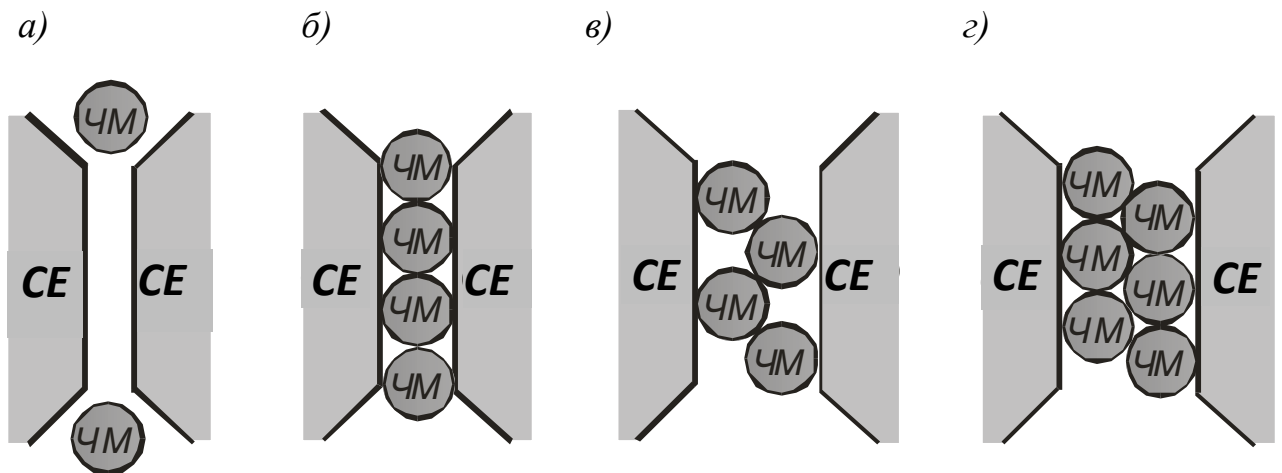


Рис. 3.1. Схеми розташування частинок матриці (ЧМ) у прошарках між структуроутворюючими елементами (СЕ) при неоптимальному (а, в) і оптимальному (б, з) розміщенні

При розрахунках складу бетонів, окрім нормованого коефіцієнта розсунення зерен щебню α , доцільно враховувати коефіцієнти розсунення зерен піску μ і цементу λ [141]. Оптимальні значення цих параметрів визначаються співвідношенням середніх діаметрів заповнювачів на відповідних рівнях структури бетону для забезпечення його максимальної щільності. Наприклад, коефіцієнт розсунення зерен піску μ визначається із співвідношення

$$\mu_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{n \cdot d^H}{d^П}\right)^3 - 1,1, \quad (3.1)$$

де d^H – розмір частинок наповнювача, мм; $d^П$ – розмір частинок піску, мм; n – кількість рядів частинок наповнювача між зернами піску.

У досліджуваному цементно-піщаному розчині як крупний заповнювач використовувався кварцовий пісок із модулем крупності 2,0 і середнім розміром частинок 0,47 мм відповідно до характеристик, викладених у ДСТУ Б В.2.7-189 [142]. У ролі наповнювача застосовувалися дрібні частинки подрібнених залізобетонних шпал із середнім розміром частинок 0,115 мм, визначеним шляхом розсіювання через стандартний набір сит. Для цих умов значення оптимального коефіцієнта розсування зерен піску μ буде дорівнювати

$$\mu_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{n \cdot d^H}{d^П}\right)^3 - 1,1 = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{1 \cdot 0,115}{0,47}\right)^3 - 1,1 = 2,95 \approx 3,0.$$

Розрахунок складу цементно-піщаного розчину для оцінки впливу гранулометричного складу наповнювача проводився наступним чином. Кількість піску з урахуванням коефіцієнта розсування зерен піску $\mu_{\text{опт}}$ обчислювалася за формулою із [141]

$$\Pi = \frac{V_0}{\mu_{\text{опт}} \cdot \frac{\Pi_{\text{ус}}^П}{\rho_{\text{нас}}^П} + \frac{1}{\rho^П}}, \quad (3.2)$$

де V_0 – загальний об'єм цементно-піщаного розчину, м³; $\Pi_{\text{ус}}^П$ – пустотність піску, част.од.; $\rho_{\text{нас}}^П$ – насипна густина піску, кг/м³; $\rho^П$ – істинна густина піску, кг/м³.

Кількість води розраховувалася за формулою із [141], беручи до уваги водопоглинання дрібного наповнювача W^H

$$B = Ц \cdot \frac{B}{Ц} + H \cdot W^H, \quad (3.3)$$

де $Ц$ – витрата цементу, кг/м³; H – витрата наповнювача, кг/м³; $B/Ц$ – водоцементне відношення, част.од.

При фіксованій витраті цементу (500 кг/м^3) і співвідношенні В/Ц=0,4 були виконані розрахунки складів цементно-піщаного розчину для різних значень коефіцієнта розсування зерен піску μ . Розраховані склади представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1– Витрата компонентів зразків цементно-піщаного розчину

μ	Витрата компонентів, кг/м ³				В/Ц
	П	Н	Ц	В	
контроль	1500	0	500	200	0,4
1,0	1450	50	500	205	0,4
2,0	1000	500	500	250	0,4
3,0	750	750	500	270	0,4
4,0	600	900	500	285	0,4
5,0	550	950	500	295	0,4
6,0	500	1000	500	300	0,4

Для визначення співвідношення частинок піску до частинок наповнювача використовується формула із [139]:

$$d^H = \left(\left(\frac{\mu_{\text{опт}} + 1,1}{2,1} \right)^{0,333} - 1 \right) \cdot \frac{d^П}{n}, \quad (3.4)$$

де d^H – розмір частинок наповнювача, мм; $d^П$ – розмір частинок піску, мм; n – кількість рядів частинок наповнювача між зернами піску.

Ця формула дозволяє розрахувати середній розмір частинок наповнювача, враховуючи оптимальне розсування зерен та різну кількість шарів дрібного наповнювача. Результати цих розрахунків наведені на рис. 3.2.

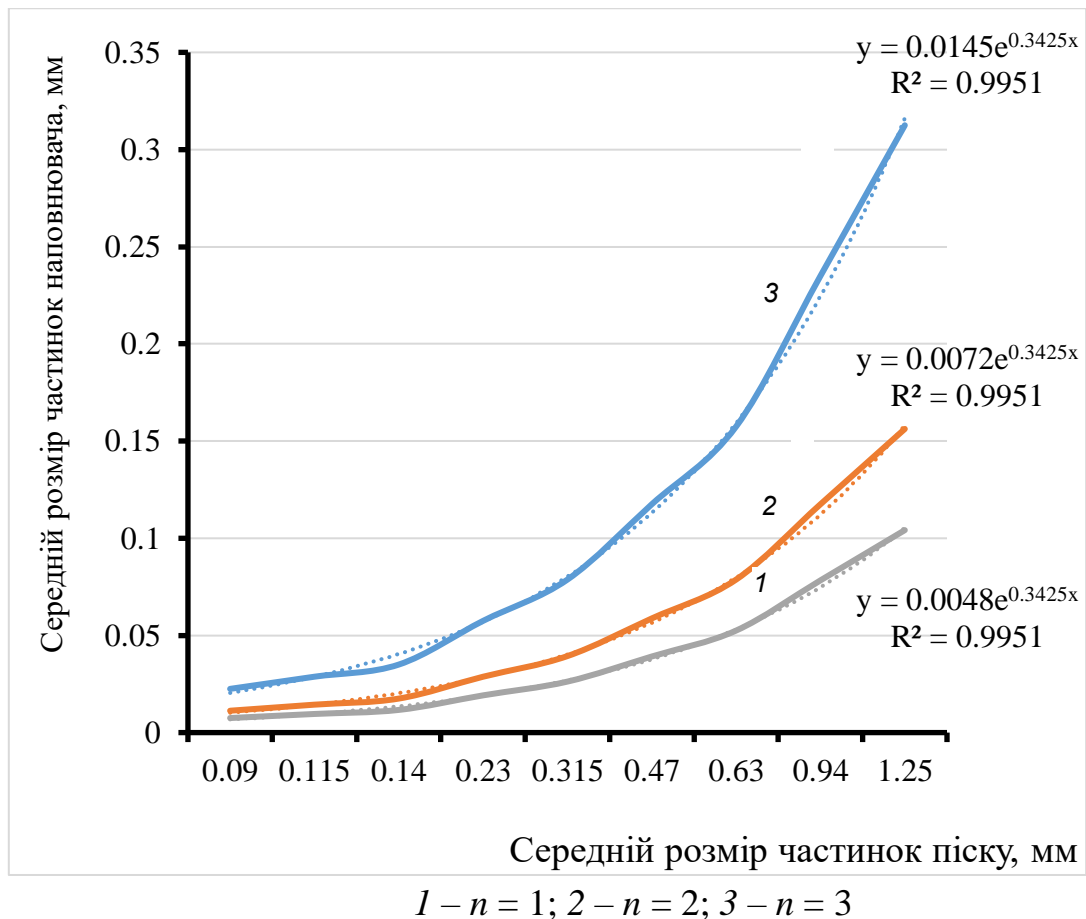


Рис. 3.2. Залежність середнього розміру частинок наповнювача від середнього розміру частинок піску при різній кількості рядів n (суцільна лінія – експериментальні дані, пунктирна лінія – лінія апроксимації)

Отримані криві на рис. 3.2 апроксимуються рівнянням експоненціальної функції загального виду

$$y = \frac{0,0145}{n} \cdot e^{0,3425x}, \quad (3.5)$$

де n – кількість рядів дрібного наповнювача між зернами піску.

Ці результати можуть слугувати номограмою для визначення середнього розміру частинок наповнювача залежно від початкового розміру частинок піску. Наприклад, у випадку середнього розміру частинок піску 0,43 мм, для досягнення оптимального розсування зерен і формування шару з частинок в один ряд (рис. 3.3), середній розмір частинок наповнювача має становити 0,117 мм, що майже збігається з експериментально визначеним значенням 0,115 мм для подрібнених відходів бетонних шпал.

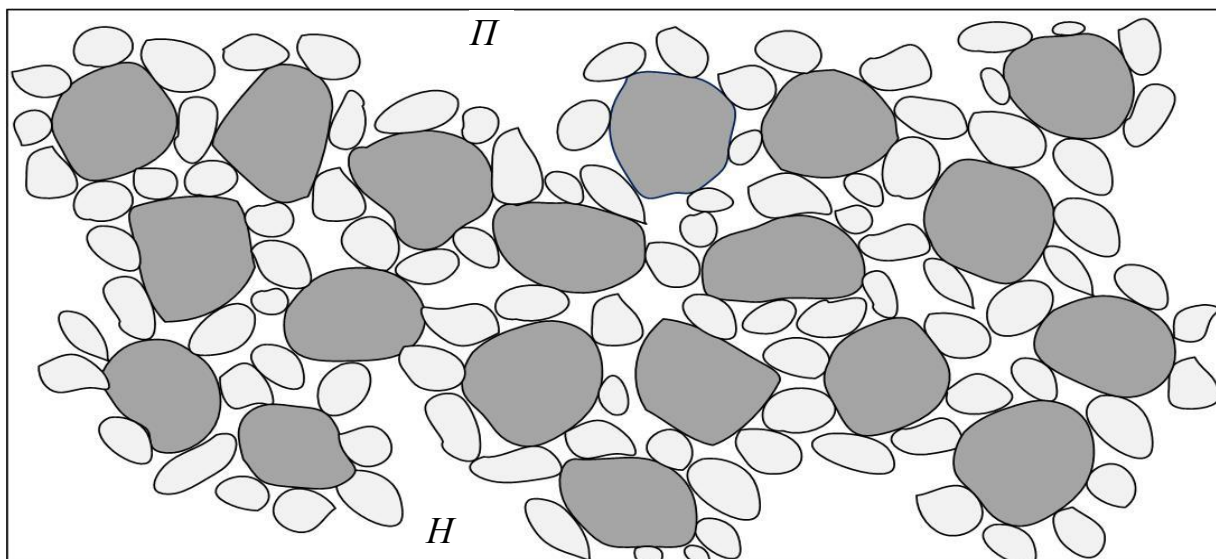


Рис. 3.3. Умовне розташування частинок піску (П) і наповнювача (Н) при $\mu_{\text{опт}}$

Як свідчать результати розрахунків, збільшення кількості шарів наповнювача потребує використання його частинок із меншим діаметром, і навпаки. Ці результати можуть бути основою для створення наукових підходів до розробки складів розчинів, у яких використовуються подрібнені відходи бетонних конструкцій із різним гранулометричним складом. Запропонований метод передбачає наступний алгоритм: спершу визначається середній розмір частинок піску; далі за номограмою (рис. 3.2) або формулою (3.5) визначають оптимальний середній розмір меленого наповнювача для забезпечення максимальної щільності пакування частинок; на завершення розраховується кількість цементу, враховуючи необхідну консистенцію й підвищене водопоглинання меленого наповнювача.

Оскільки гранулометричний склад подрібнених відходів бетону суттєво залежить від способу їх дроблення, для практичного використання доцільніше застосувати зворотний підхід: за результатами розсіву подрібнених залишків бетонних конструкцій визначити необхідну фракцію піску з конкретним середнім розміром частинок, використовуючи номограму. Наприклад, якщо використовується найменша фракція подрібнених відходів бетонних шпал, яка проходить крізь сито з отворами 0,09 мм, то середній розмір її частинок становитиме 0,005 мм. Згідно з номограмою (рис. 3.2), у цьому випадку можна

застосовувати пісок із середнім розміром частинок 0,23 мм при розташуванні частинок наповнювача між частинками піску в один шар (крива 1, рис. 3.2) або пісок із середнім розміром 0,63 мм при розташуванні пилюватих частинок у три шари (крива 3, рис. 3.2).

Як зазначено у [141], для забезпечення максимальної міцності й щільності при розрахунках складу бетонів, окрім коефіцієнта розсунення зерен щебню α , доцільно враховувати коефіцієнти розсунення зерен піску μ і цементу λ . Для досягнення найщільнішої структури бетону слід використовувати оптимальні значення цих коефіцієнтів, які визначаються співвідношенням середніх діаметрів заповнювачів на різних рівнях структури. Визначимо оптимальну величину коефіцієнта розсунення зерен цементу для найщільнішого пакування частинок меншого розміру, використовуючи формулу із [141]

$$\lambda_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{n \cdot d_{\text{min}}^{\text{II}}}{d_{\text{max}}^{\text{II}}} \right)^3 - 1,1, \quad (3.6)$$

де n – кількість рядків цементних частинок розміром $d_{\text{min}}^{\text{II}}$, мм, у прошарку між частинками цементу розміром $d_{\text{max}}^{\text{II}}$, мм (рис. 3.4).

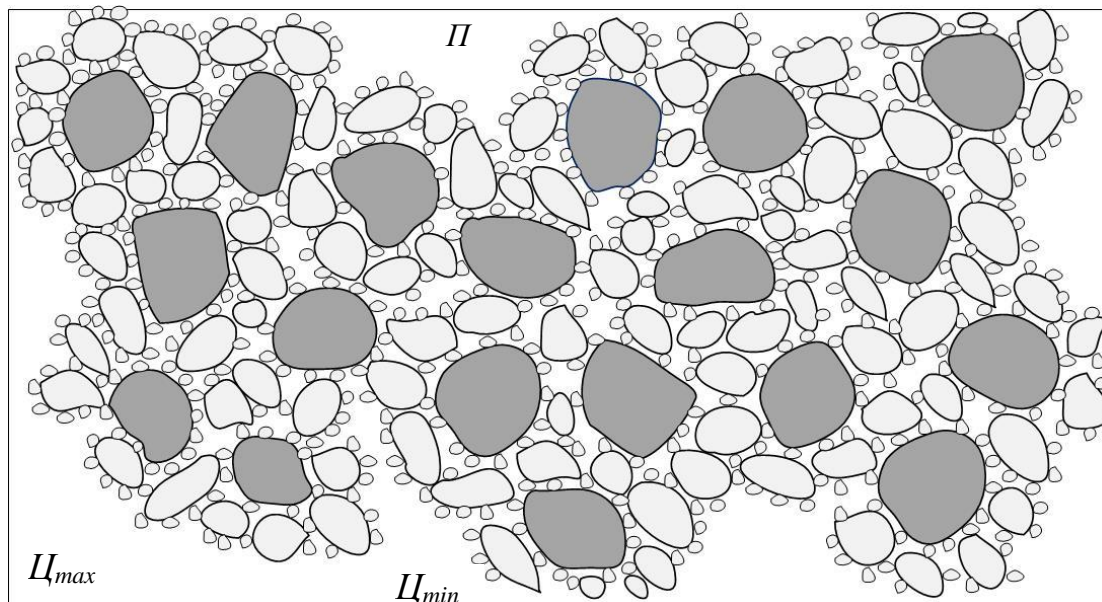


Рис. 3.4. Умовне розташування частинок цементу розміром $d_{\text{min}}^{\text{II}}$ (Ц_{min}) і розміром $d_{\text{max}}^{\text{II}}$ (Ц_{max}) у прошарках між частинками піску (П)

Таким чином, у розрахунках припустимо, що частинки найбільш поширеної фракції цементу будуть оточені частинками цементу та наповнювача найменшого розміру, які мають фракцію 5 мкм. Оптимальне значення коефіцієнта розсунення зерен цементу для одного шару частинок наповнювача, розраховане за формулою (3.6), складе

$$\lambda_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{1 \cdot 0,005}{0,05}\right)^3 - 1,1 = 1,7,$$

а для двох рядів

$$\lambda_{\text{опт}} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,005}{0,05}\right)^3 - 1,1 = 2,5.$$

Для визначення складу цементно-піщаного розчину з урахуванням впливу кількості наповнювача виконувались наступні розрахунки. Кількість піску, скориговану за коефіцієнтом розсунення зерен піску μ , розраховували за формулою із [141]

$$\Pi = \frac{1}{\mu_{\text{опт}} \cdot \frac{\Pi_{\text{ус}}^{\Pi}}{\rho_{\text{нас}}^{\Pi}} + \frac{1}{\rho^{\Pi}}}, \quad (3.7)$$

де $\Pi_{\text{ус}}^{\Pi}$ – пустотність піску, част.од.; $\rho_{\text{нас}}^{\Pi}$ – насипна густина піску, кг/м³; ρ^{Π} – істинна густина піску, кг/м³.

Об'єм цементного тіста, насиченого наповнювачем, визначали за формулою із [141]

$$V_{\text{цнв}} = 1000 - \frac{\Pi}{\rho^{\Pi}}. \quad (3.8)$$

Кількість необхідної води обчислювалась за формулою із [141], враховуючи водопоглинання дрібного наповнювача W^{H}

$$B = \text{Ц} \cdot \frac{B}{\text{Ц}} + \text{H} \cdot W^{\text{H}}, \quad (3.9)$$

де Ц – витрата цементу, кг/м³; Н – витрата наповнювача, кг/м³; В/Ц – водоцементне відношення, част.од.

Виходячи з фіксованої витрати піску (800 кг/м^3) та співвідношення В/Ц = 0,67, було визначено склади цементно-піщаного розчину з різним процентним вмістом наповнювача відносно маси цементу. Результати проведених розрахунків наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Витрата складових зразків цементно-піщаного розчину

Відсотковий вміст наповнювача, %	Витрата компонентів, кг/м ³				В/Ц
	П	Ц	Н	В	
Контроль	800	400	0	270	0,67
10	800	360	40	247	0,67
20	800	320	80	226	0,67
30	800	280	120	206	0,67
40	800	240	160	185	0,67
50	800	200	200	164	0,67

3.3. Теоретичні передумови покращення властивостей полімернаповнених матеріалів на рециклінгових наповнювачах

Огляд попередніх досліджень у розділі 1 показує, що полімерні зв'язуючі на основі поліметилметакрилату (ПММК) широко застосовуються для створення композиційних матеріалів з наповнювачами, що сприяє формуванню сітчастої структури, яка покращує щільність цементних матеріалів, їхні гідроізоляційні властивості, довговічність і механічну міцність [64 ÷ 69, 143]. Усі дослідження відмічають можливість взаємодії карбоксильної групи акрилатного полімеру з продуктами гідратації цементу, підвищуючи когезію і зміцнюючи структуру матеріалів. Однак полімери в процесі гідратації цементу уповільнюють цей процес, що знижує міцність на стиск, водночас вони істотно покращують міцність на вигин і довговічність матеріалу. Використовуючи інфрачервону спектроскопію та рентгенофазовий аналіз, дослідження [66, 68] підтвердили утворення металоорганічного продукту $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, гідросилікатного гелю С–

S–H, а також зниження концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і ступеня орієнтації портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при змішуванні цементу з поліметилметакрилатом. Використання інфрачервоної спектроскопії та рентгенофазового аналізу підтвердило, що карбоксильні групи в стирол-акриловій емульсії взаємодіють із іонами Ca^{2+} , утвореними під час гідратації цементу, формуючи комплекси Ca^{2+} -карбоксил. Електронно-мікроскопічні дослідження демонструють, що полімер здатний змінювати розподіл і розміри кристалів у зоні контакту та значно зменшувати товщину цього шару, хоча не впливає на тип гідратаційних продуктів на межі частинок. Дослідження [67] показали, що полімер гальмував ранню гідратацію C_3S і C_3A , зокрема мав потужніший інгібуючий вплив на C_3A . Крім того, він запобігав формуванню портландиту й карбонату кальцію. Це пояснили великою молекулярною масою полімерів і сильними міжмолекулярними взаємодіями, які спричиняли утворення агломератів. Неправильне розподілення цих агломератів у цементному розчині послаблювало зв'язки між частинками цементу, утворювало більше дефектів і збільшувало пористість. Загальний аналіз літератури вказує на значний потенціал у створенні композиційних полімерних матеріалів, які завдяки ретельно підбраному складу та забезпеченню хімічної взаємодії з поверхнею наповнювача можуть забезпечити довговічність і високу міцність ремонтних матеріалів, використовуючи відходи зруйнованого бетону. Усі існуючі дослідження зосереджені на поясненні механізму взаємодії функціональних груп з вільними іонами Ca^{2+} у розчині, які присутні у свіжоприготованій цементній пасті. Але дослідження механізму структуроутворення в композиційних матеріалах, де використовуються відходи зруйнованого бетону з частками вже гідратованого цементу, відсутні.

Теоретичною передумовою створення полімернаповнених ремонтних композицій є врахування поверхневого електричного потенціалу частинок, які входять до складу розроблюваної композиції. За літературними даними [144, 145] поверхнева щільність заряду колоїдних частинок поліметилметакрилату при рН 7 дорівнює мінус 85 мкекв/г, а при рН 12 мінус 160 мкекв/г. Розрахуємо величину поверхневого потенціалу частинок поліметилметакрилату за

формулою

$$V = \frac{Q}{C}, \quad (3.10)$$

де Q – заряд колоїдних частинок поліметилметакрилату, Кл;

C – ємність, Ф.

Заряд може бути знайдений за формулою

$$Q = \frac{q \cdot F}{M}, \quad (3.11)$$

де q – еквівалентний заряд моля речовини, екв/г;

F – число Фарадея, Кл;

M – молярна маса речовини, г/моль.

Ємність розраховуємо за формулою плоского конденсатора для подвійного електричного шару

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{d}, \quad (3.12)$$

де d – товщина щільної частини подвійного електричного шару, м;

ε – діелектрична проникність;

ε_0 – електрична стала, Ф/м;

A – площа питомої поверхні частинок поліметилметакрилату, м².

Проведемо відповідні розрахунки для рН = 7.

$$Q = \frac{85 \cdot 96485}{100} = 0,082 \text{ Кл/г}$$

$$C = \frac{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10}{1 \cdot 10^{-9}} = 0,266 \text{ Ф/г}$$

$$V = \frac{0,082}{0,266} = 0,29 \text{ В}$$

Проведемо відповідні розрахунки для рН = 12.

$$Q = \frac{160 \cdot 96485}{100} = 0,154 \text{ Кл/г}$$

$$C = \frac{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10}{1 \cdot 10^{-9}} = 0,266 \text{ Ф/г}$$

$$V = \frac{0,154}{0,266} = 0,58 \text{ В}$$

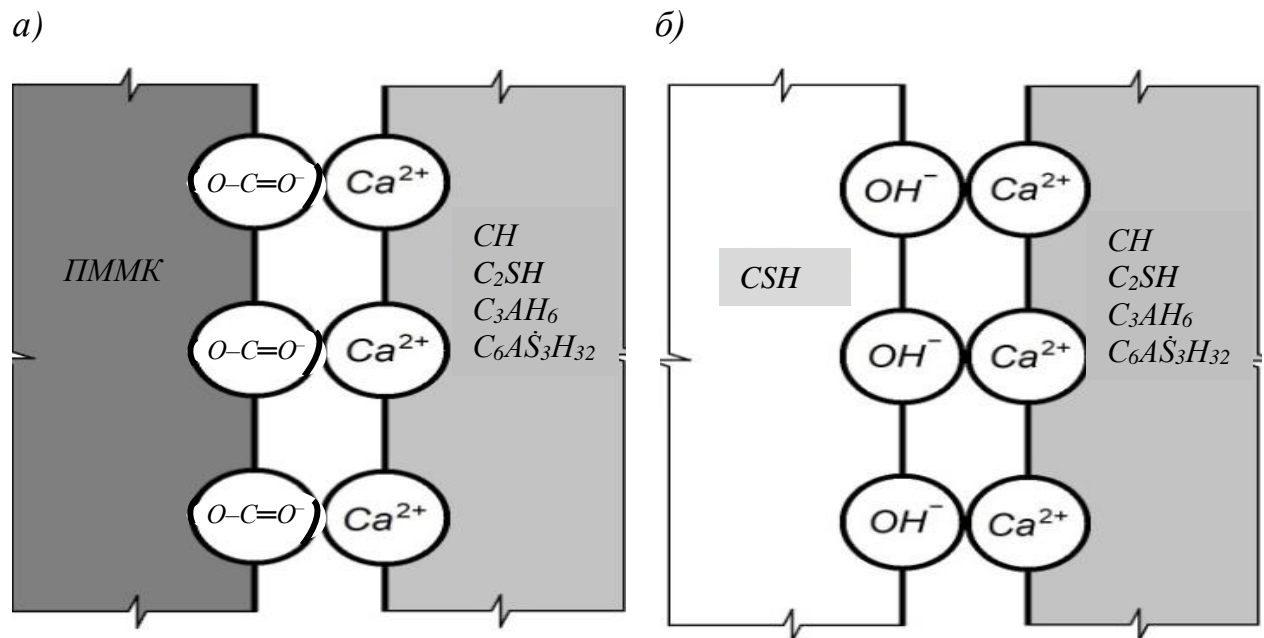
Значення інших абсолютних ψ_0 та рівноважних ψ_{pH} електроповерхневих потенціалів основних складових полімернаповнених композиційних матеріалів за даними [146] наведені в табл.3.3.

Таблиця 3.3 – Електроповерхневі потенціали деяких речовин

Вихідні компоненти			Новоутворення в результаті гідратації				
Найменування	Потенціал, В			Найменування	Потенціал, В		
	ψ_0	$\psi_{pH=7}$	$\psi_{pH=12}$		ψ_0	$\psi_{pH=7}$	$\psi_{pH=12}$
Кварц SiO_2	-0,56	-0,97	-1,26	Портландит $Ca(OH)_2$	+1,24	+0,83	+0,64
Корунд Al_2O_3	+0,33	-0,08	-0,38	Високоосновні ГСК C_2SH	+0,59	+0,18	-0,11
Кальцит $CaCO_3$	+0,21	-0,20	-0,49	Низькоосновні ГСК CSH	+0,29	-0,12	-0,37
Аліт C_3S	+0,74	+0,33	+0,03	ГАК C_3AH_6	+0,92	+0,51	+0,21
Беліт C_2S	+0,55	+0,14	+0,16	Еtringіт $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	+0,76	+0,35	+0,19
Трикальцієвий алюмінат C_3A	+0,90	+0,49	-0,19	Гіпс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	+1,39	+0,98	+0,68
Чотирикальцієвий алюмоферит C_4AF	+0,64	+0,23	-0,18	Поліметилметакрилат ПММК (власні розрахунки автора)	-0,12	-0,29	-0,58

Аналізуючи дані табл. 3.3, можна спрогнозувати механізм структуроутворення композиційних матеріалів як на основі цементу, так і на основі дрібної фракції залишків бетону. У високолужному середовищі свіжої цементної пасти вихідні компоненти аліт і беліт мають позитивне значення електроповерхневого потенціалу, а алюмінат та алюмоферит – негативне, як і частинки ПММК. Отже, буде відбуватися взаємодія між C_3S , C_2S і ПММК, що призведе до сповільнення гідратації цих мінералів і зменшення кількості портландиту, що і спостерігали інші дослідники за результатами рентгенофазового аналізу [65, 71]. Однак, коли використовуються залишки бетонних конструкцій як наповнювач, то вони в основному складаються із продуктів гідратації цементу, які мають в умовах

нейтрального середовища інші знаки і величину поверхневого заряду (табл.3.3). У таких матеріалах буде відбуватися електрогетерогенна взаємодія між усіма продуктами гідратації за виключенням низькоосновних гідросилікатів кальцію (рис. 3.5).



CH – портландит; *C₂SH* – високоосновні гідросилікати кальцію; *C₃AH₆* – гідроалюмінати кальцію; *C₆AŠ₃H₃₂* – еtringіт

Рис. 3.5. Схеми електрогетерогенних контактів між поверхнями частинок поліметилметакрилату (ПММК) і продуктами гідратації цементу (а), а також між низькоосновними гідросилікатами кальцію *CSH* і продуктами гідратації цементу (б)

Але найбільша міцність і щільність буде досягнуті при рівності поверхонь з протилежними зарядами. Розрахуємо при якій кількості наповнювача і полімеру це відбудеться. Площа частинок, які мають однаковий поверхневий заряд, визначиться як сума добутків питомих поверхонь частинок певного типу S_i на їх відсоткову частку в суміші p_i за формулою

$$S^q = \sum_{i=1}^n S_i \cdot p_i \quad (3.13)$$

З урахуванням середньої кількості у відсотках продуктів гідратації цементу,

визначеної за літературними даними (табл. 3.4) у рециклінговому бетоні, та відомої питомої поверхні частинок розраховуємо за формулою (3.13) площу позитивно та негативно заряджених частинок на 1 одиницю маси речовини:

$$S^- = 0,1 \cdot 0,5 + 200 \cdot 0,16 + 10 \cdot 0,08 = 33 \text{ м}^2/\text{г};$$

$$S^+ = 0,26 \cdot 200 = 52 \text{ м}^2/\text{г}.$$

Таблиця 3.4 – Відсотковий вміст продуктів гідратації цементу в рециклінгових матеріалах за даними джерел

Елементи композиційного матеріалу	Кількість у суміші, %	Джерело інформації
Кварц	50...70	[8, 31, 32, 105]
Портландит (Ca(OH) ₂)	15...25	[31, 32, 105]
Еtringіт	5...10	[31]
Низькоосновні гідросилікати кальцію	50...60	[8, 31]
Високоосновні гідросилікати кальцію	10...20	[8, 31]
Гідроалюмінати кальцію		[42]
Кальцит	10...15	[8, 31, 32, 105]
доломіт	10...15	[8, 32, 105]
Гіпс	10...15	[8, 31]
Негідратовані залишки цементу	5...10	[8, 146]

Враховуючи, що питома поверхня глобул ПММК становить $S_{\text{ПММК}} = 20 \text{ м}^2/\text{г}$, розраховуємо зміну відношення позитивно та негативно заряджених поверхонь при поступовому додаванні полімеру в наповнені композиційні матеріали на основі подрібнених залишків бетону за формулою

$$\frac{S^-}{S^+} = \frac{S^{q-} + x \cdot S_{\text{ПММК}}}{S^{q+}}, \quad (3.14)$$

де S^{q-} , S^{q+} – площа поверхні негативно і позитивно заряджених частинок, визначених за формулою (3.13), м^2 ; x – масова частка полімеру в суміші, част.од.

Результати розрахунку наведені на рис. 3.6.

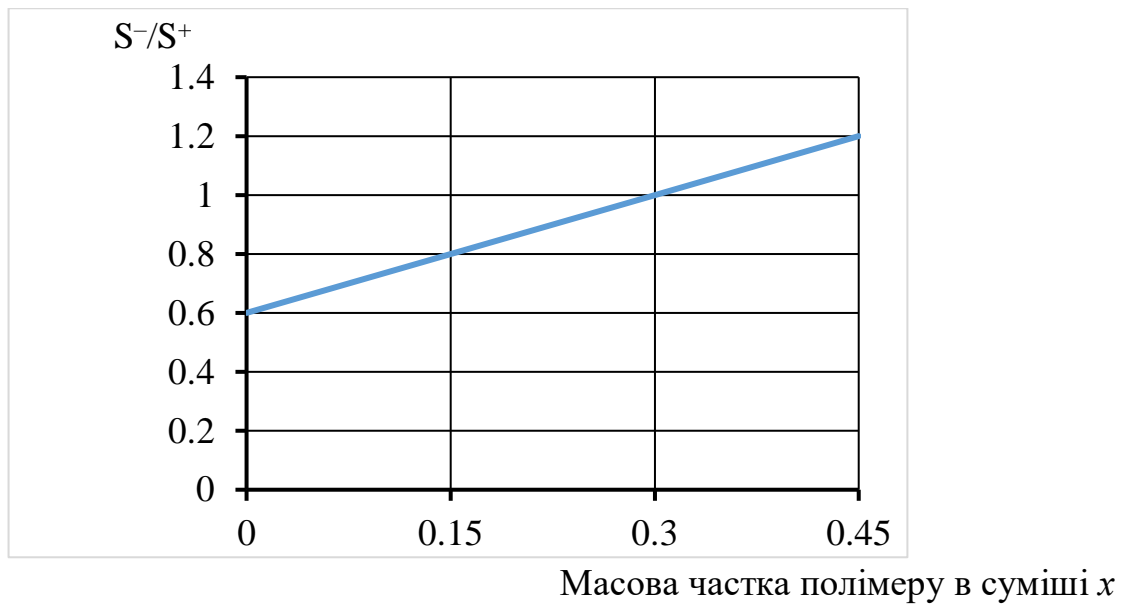


Рис.3.6. Залежність співвідношення позитивно та негативно заряджених поверхонь від масової частки полімеру в суміші

Отже, для досягнення рівності позитивно та негативно заряджених поверхонь, що призведе до формування щільної структури, частка полімеру у загальному складі суміші повинна становити 0,3 масових частини.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3

1. В основі покращення властивостей крупних заповнювачів із відходів бетону методом механічного очищення лежить використання помольних тіл різного діаметра у певному співвідношенні, що створює більш щільне їх розташування і збільшує ефективність поверхневого очищення.

2. В основі покращення властивостей крупних заповнювачів із відходів бетону методом просочення лежить хімічна реакція силікату натрію з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, у результаті якої утворюється гель C-S-H, що заповнює мікротріщини, зменшує кількість пір і водопоглинання й добре зв'язується з новим розчином з утворенням додаткової кількості гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію. Це значно підсилює зв'язок між заповнювачем і цементною матрицею, покращуючи механічну міцність бетону.

3. Оптимізація складу бетонів і цементно-піщаних розчинів на основі рециклінгових заповнювачів можлива через врахування структурних характеристик матеріалів – коефіцієнтів розсунення зерен піску μ і зерен цементу λ . Дотримання принципу щільного пакування частинок і врахування параметрів гранулометричного складу заповнювачів, а саме діаметрів найбільш представницької фракції кожного із заповнювачів, дозволяє досягти максимальної густини та міцності розчинів. Це забезпечує поліпшення фізико-механічних властивостей матеріалів та розширює можливості використання рециклінгової сировини у будівництві.

4. Розраховано електроповерхневі характеристики частинок поліметилметакрилату. Показано, що структура полімернаповненого матеріалу формується завдяки рівновазі між позитивно та негативно зарядженими поверхнями, що забезпечує оптимальну взаємодію складників. На цій основі виконано обґрунтування співвідношення компонентів у суміші, зокрема частки полімеру, яка має становити 0,3 масових частини для досягнення міцного зв'язку компонентів.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ

4.1. Оцінювання гранулометричного складу рециклінгових заповнювачів, отриманих із відходів бетону шпал, стандартним і розробленим методом

Для визначення гранулометричного складу подрібненої суміші було визначено залишки на ситах та побудовано криву розсіву. Часткові та повні залишки на ситах наведено у табл. 4.1, а гранулометричну криву – на рис. 4.1. Згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [47], якщо лінія розсіву сумішей розташована нижче кривої *A*, то така суміш заповнювачів вважається непридатною для використання через перенасичення частинками крупного розміру, що ускладнює її обробку та сприяє розшаруванню. Якщо лінія розсіву проходить між кривими *A* та *B*, суміш заповнювачів вважається оптимальною. У випадку, коли лінія розсіву знаходиться між кривими *B* та *C*, така суміш перенасичена піском і характеризується підвищеною водопотребою, що призводить до необхідності збільшення кількості цементу або пластифікуючої добавки.

Таблиця 4.1 – Часткові та повні залишки на ситах суміші заповнювачів

Розміри отворів контрольних сит, мм	Часткові залишки на ситах, %	Повні залишки на ситах, %
пройшло крізь сито 0,14	28,37	28,37
0,14	11,15	39,52
0,315	1,78	41,30
0,63	0,32	41,63
1,25	0,76	42,39
2,5	1,42	43,81
5	5,50	49,31
10	18,97	68,28
20	31,72	100,00

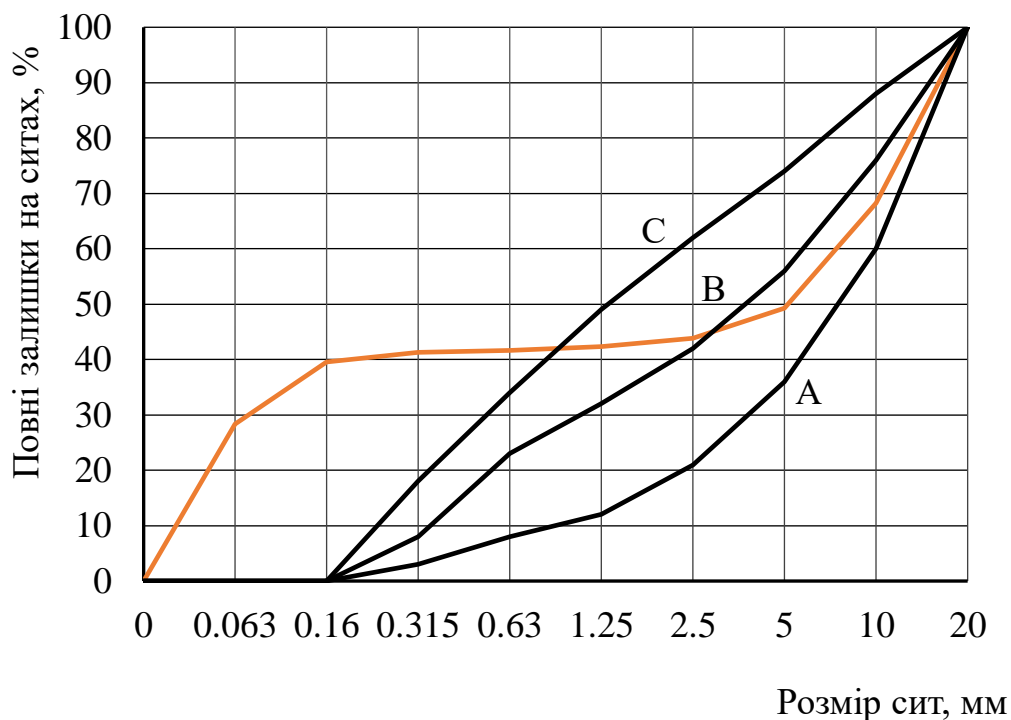


Рис. 4.1. Крива розсіву суміші заповнювачів

Як видно з рис. 4.1, експериментальна крива розсіву (помаранчева лінія) частково відповідає вимогам до гранулометричного складу заповнювачів і має відмінність від кривих розсіву для поліфракційних кондиційних заповнювачів, наведених у [8] для гранітного щебню марки за міцністю 1200, фракцій 2-5 мм, 5-10 мм та 10-20 мм.

Для оцінювання властивостей провели окремий розсів крупного і дрібного заповнювачів (рис. 4.2, 4.3). Лінія розсіву між кривими *A* та *B* означає придатність заповнювача для бетону згідно [115, 117]. Крупний заповнювач (блакитна лінія на рис. 4.2) відповідає вимогам за гранулометричним складом. Дрібний заповнювач (блакитна лінія на рис. 4.3) не придатний для виготовлення бетонної суміші через модуль крупності 0,9 та вміст зерен $< 0,16$ мм більше 15 %, що не відповідає вимогам [46]. Пісок з модулем крупності від 1,0 до 4,0 можна використовувати як дрібний заповнювач для бетонів, згідно [125].

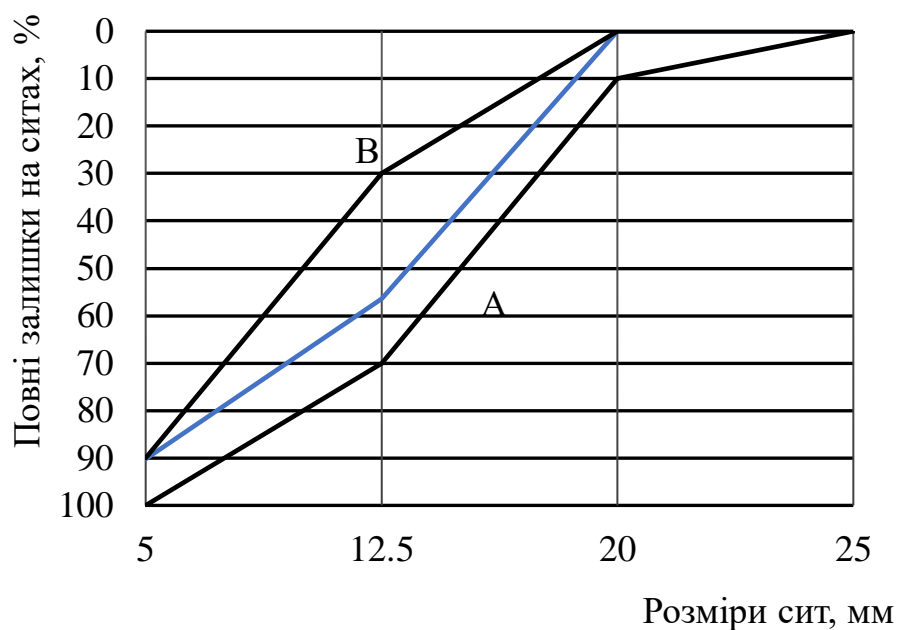


Рис. 4.2. Крива розсіву крупного заповнювача

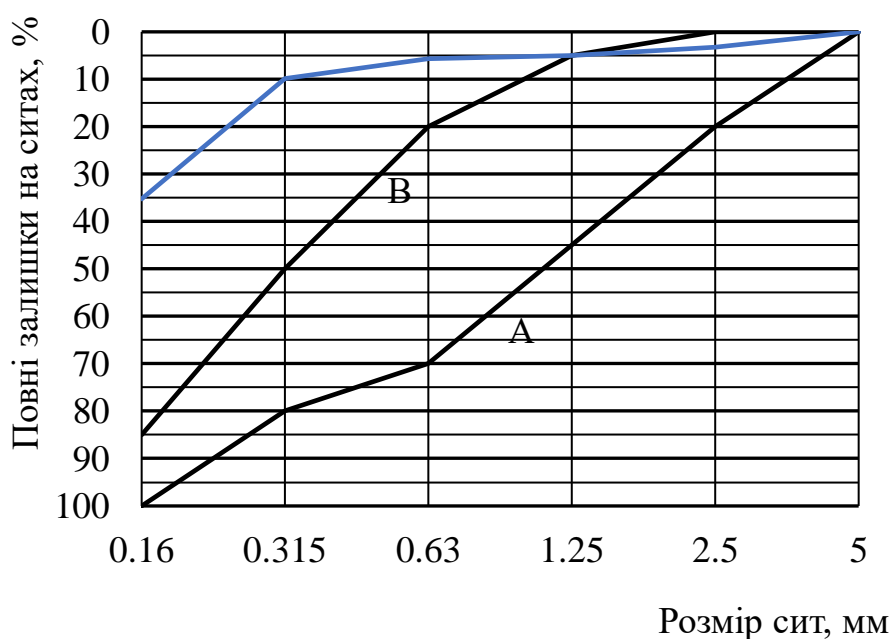


Рис. 4.3. Крива розсіву дрібного заповнювача

Отже, гранулометричний склад частинок розмірами більше 5 мм відповідають вимогам, які пред'являються до крупних заповнювачів для виготовлення бетонних сумішей. Фракції з розмірами частинок менше 5 мм є дуже дрібними з модулем крупності 0,9, що не відповідає вимогам, які пред'являються до дрібних заповнювачів для виготовлення бетонних сумішей.

Середній розмір частинок кожної фракції розраховували як середнє арифметичне значення розмірів отворів сітки двох сусідніх сит. Часткові залишки на ситах наведено у табл. 4.1, а діаграма розподілу частинок за розмірами – на рис. 4.4.

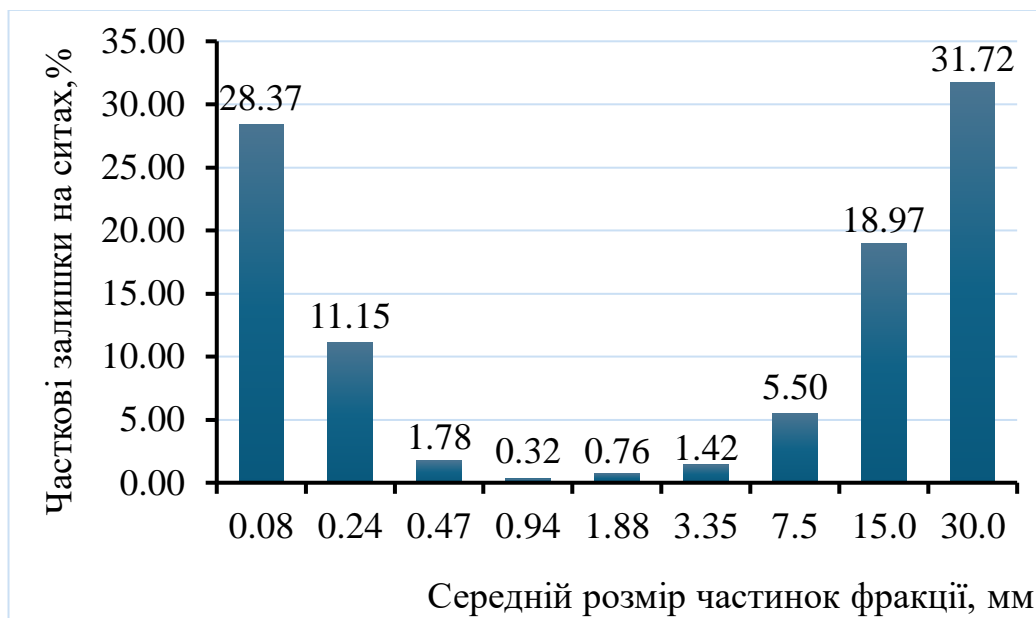


Рис. 4.4. Діаграма розподілу частинок суміші заповнювачів за розмірами

Як видно з рис. 4.4, найбільш представницькими є дві фракції із середніми розмірами 0,08 мм та 30 мм.

Вміст зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форми стандартним методом визначили на основі вимірювань розміру зерен щебню за допомогою штангенциркуля. Для порівняння результатів оцінювання було проведено для двох видів крупного заповнювача – природного і рециклінгового щебню. Із кожного виду матеріалу було відібрано пробу масою 1 кг, проведено вимірювання всіх сторін кожного зерна щебню і визначено у відсотках кількість частинок, у яких один розмір перевищує інші сторони втричі або більше. Результати дослідження показали, що відсоток зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форми становить 16,7 % для натурального щебню і 14,6 % для рециклінгового щебню після подрібнення у барабанному млині. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-74 [126], у цьому випадку природний щебінь класифікується як покращена група за

формою зерен (нормований відсоток від 15 % до 25 %), а рециклінговий щебінь – як кубоподібна група (нормований відсоток від 10 % до 15 %).

Рециклінговий щебінь із подрібнених залізничних шпал містить значну кількість старого цементно-піщаного розчину, який необхідно видалити для покращення адгезії нового розчину під час виробництва нового бетону з рециклінговими заповнювачами. Для встановлення часу, необхідного для видалення залишків цементно-піщаного розчину, проба масою 2 кг була завантажена в барабанний млин, і кожні 30 хвилин (що відповідає 1500 обертам млина) проводилося вивантаження через сито розміром 20 мм з визначенням маси залишку на ситі. Під час обертання у млині металеві кулі і перекочування частинок сприяли очищенню поверхні щебню, що призвело до поступового зменшення початкової маси проби, як проілюстровано на рис. 4.5. Для покращення процесу видалення залишкового розчину у дослідженні застосовували кулі різного діаметру, згідно з розробленим у п.2.1.1 способом.

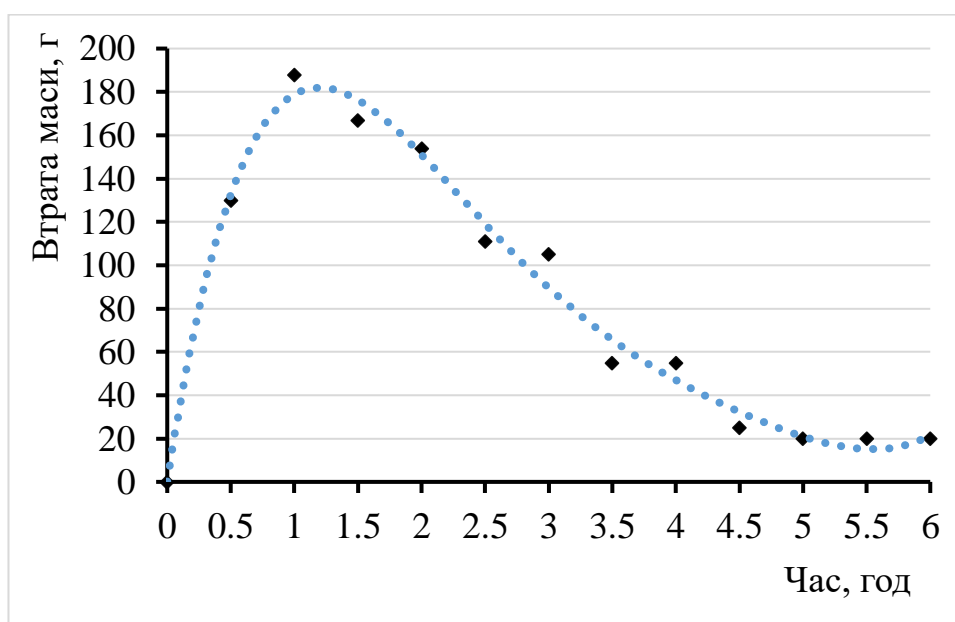


Рис. 4.5. Втрата маси крупного заповнювача з часом обробки

Як бачимо з рис. 4.5, найбільша втрата маси, а отже найбільше очищення, відбувається в перші 1-2 години. За 2 години втрата маси становить майже 50 %, а тривалість обробки понад 5 годин неефективна, так як зменшення маси проби

майже не відбувається.

За методикою, розробленою в п.2.2.2, було виконано оцінювання гранулометричного складу природних та рециклінгових заповнювачів [148]. Дані розрахунків наведені в Додатку В. Результати свідчать, що середнє значення показника округлості рециклінгових заповнювачів становить 0,78, тоді як для натурального заповнювача цей показник дорівнює 0,73, що вказує на менший ступінь окатаності зерен. Варто зазначити, що різниця між показниками становить 5%, а за стандартним методом відсоток зерен пластинчастої та голчастої форми (показник, протилежний округлості) відрізняється на 2,1%. Оскільки для ідеально квадратного перерізу показник округлості дорівнює 0,78, це значення можна попередньо визначити як межу округлості, що означає перехід від покращеної групи за формою зерен до кубоподібної.

Отримані дані дозволяють обчислити еквівалентний діаметр частинок на основі їх площі і побудувати діаграму розподілу частинок за розмірами. Ці результати представлені на рис. 4.6. Як видно, середній розмір найбільш представницької фракції природного щебню становить 25,6 мм, тоді як рециклінгового щебню – 22,6 мм. Ці величини суттєво відрізняються від визначених за середнім розміром отворів сит для розсіву, які складають 15 мм і 30 мм (рис. 4.4).

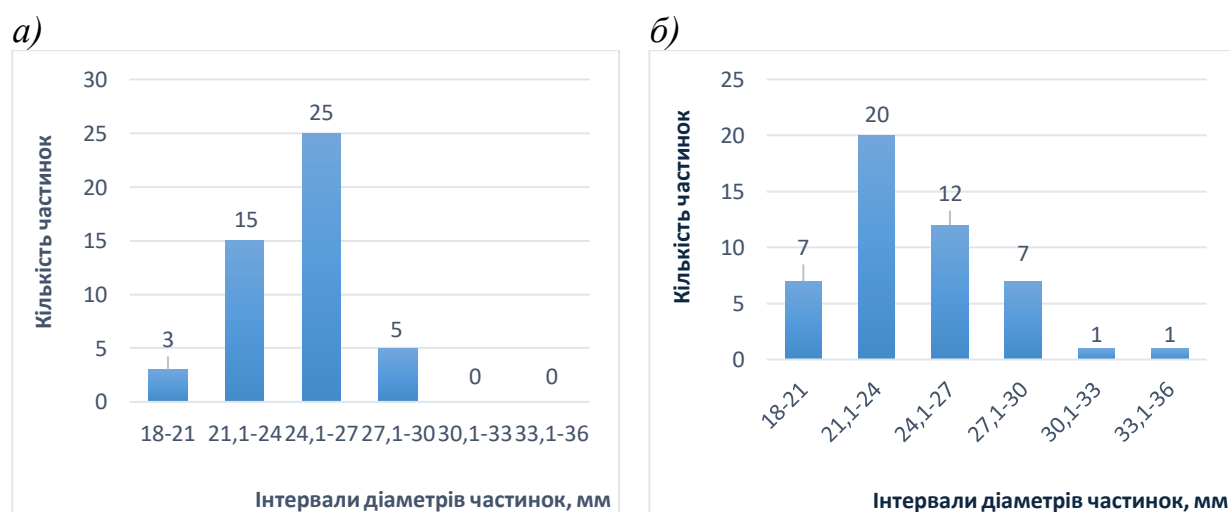


Рис. 4.6. Діаграми розподілу частинок за розмірами природнього (а) і рециклінгового (б) щебню

Різниця в розмірах частинок може спричинити помилки у розрахунках бетонних сумішей, зокрема у визначенні об'єму цементно-піщаного розчину, що заповнює міжзерновий простір між частинками щебню. Якщо фактичний розмір частинок перевищуватиме прийнятий за результатами розсіву, фактичний міжзерновий простір зменшиться. Це призведе до використання більших обсягів цементно-піщаного розчину, ніж необхідно, спричиняючи перевитрати цементу. У протилежному випадку, коли фактичний розмір частинок щебню менший за передбачений, це збільшить міжзерновий простір, який не буде повністю заповнений розрахованою кількістю цементно-піщаного розчину, що підвищить пористість та знизить міцність і довговічність бетону.

Аналогічним методом шляхом обробки зображень за п.2.2.2. було визначено середній розмір частинок фракцій із залишків на ситі 014, пройшло крізь сито 014 і залишилося на дні піддону, і пройшло крізь сито 009 (Додаток В). Гістограми наведені на рис. 4.7, 4.8, 4.9. Розміри найбільш представницької фракції були використані при розрахунках складів матеріалу за формулами (3.1)-(3.9).



Рис. 4.7. Фото частинок, які пройшли крізь сито 014, (ліворуч) і гістограма їх розподілу за розмірами у міліметрах (праворуч)

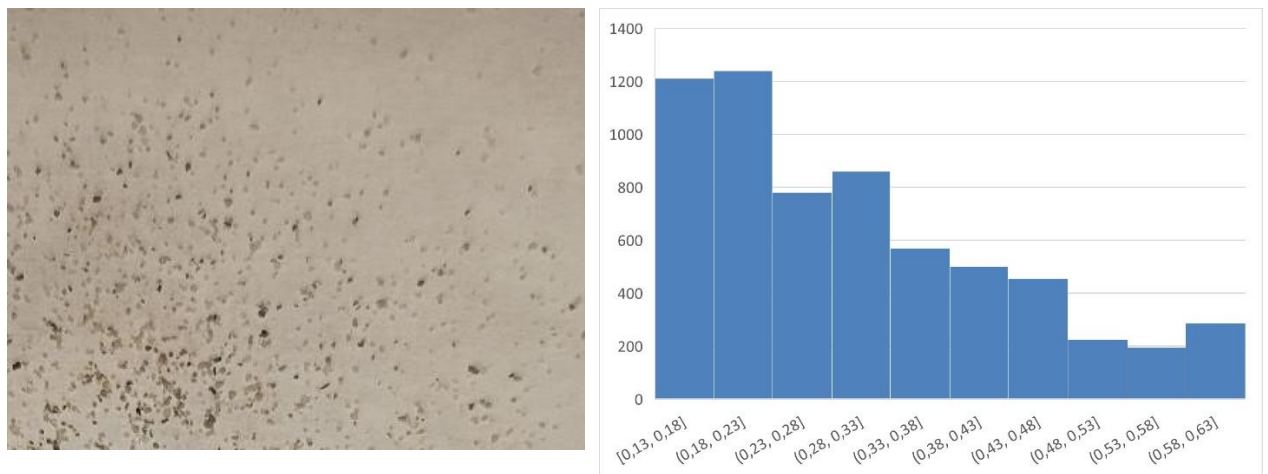


Рис. 4.8. Фото частинок, які залишилися на ситі 014, (ліворуч) і гістограма їх розподілу за розмірами у міліметрах (праворуч)

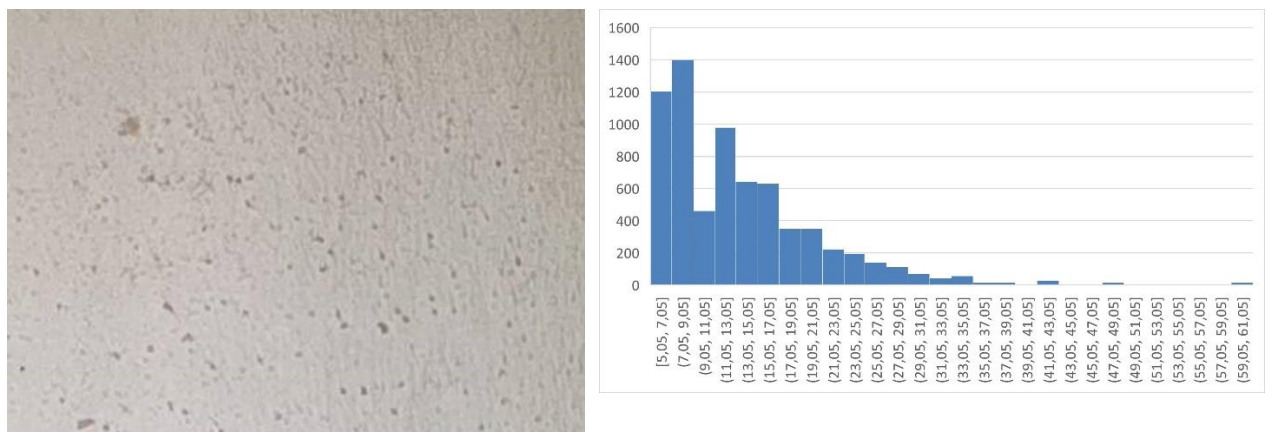


Рис. 4.9. Фото частинок, які пройшли крізь сито 009, (ліворуч) і гістограма їх розподілу за розмірами у мікрометрах (праворуч)

4.2. Визначення міцності бетонних зразків на природних та рециклінгових заповнювачах

Для дослідження міцності бетону було виготовлено два типу заповнювачів – з механічним очищенням від залишків старого розчину і з попереднім просоченням силікатом натрію залишків старого розчину [149]. Механічне очищення проводилося у барабанному млині за методикою п.2.1.1 (рис. 4.10). Просочення проводилося 3 % розчином силікату натрію протягом 60 хв (рис. 4.11), після чого розчин відфільтрували, а заповнювач сушили у сушильній шафі при температурі 40...50°C (рис. 4.12).



Рис. 4.10. Механічне очищення заповнювачів у барабанному млині



Рис. 4.11. Просочення заповнювачів розчином силікату натрію



Рис. 4.12. Загальний вид заповнювачів після просочення

Для визначення впливу виду крупного заповнювача на міцність бетону було виготовлено 4 серії зразків: на необробленому рециклінговому щебні (серія 1), на просоченому силікатом натрію (серія 2), на рециклінговому щебні після механічного очищення в барабанному млині (серія 3), на натуральному щебні (серія 4). Співвідношення компонентів суміші наведено в табл. 4.2. Для серій зразків-кубів бетону після витримки у нормальних умовах протягом 7 та 28 діб було проведено визначення середньої густини та міцності на стиск. Фото зразків наведено на рис. 4.13, а результати випробувань на рис. 4.14, 4.15.

Таблиця 4.2 – Співвідношення компонентів бетонної суміші

Серія №	Витрата компонентів, кг/м ³				В/Ц
	Щебінь	Пісок	Цемент	Вода*	
1	1220 (рециклінговий неочищений)	617	360	180	0,5
2	1220 (просочений силікатом натрію)	617	360	180	0,5
3	1220 (рециклінговий очищений)	617	360	180	0,5
4	1220 (природний)	617	360	180	0,5

* Кількість води вказано без урахування додаткової кількості на змочування і поглинання пористими рециклінговими наповнювачами



Рис. 4.13. Загальний вид зразків бетону

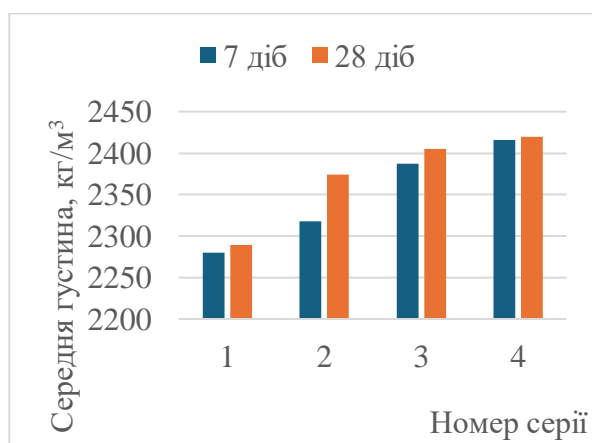


Рис. 4.14. Середня густина зразків серій бетону

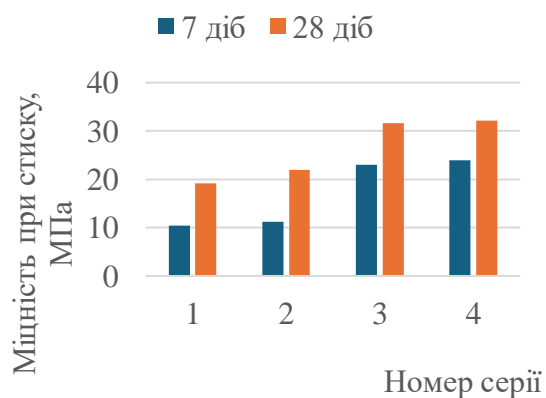


Рис. 4.15. Міцність при стиску зразків серій бетону

Як показано на рис. 4.14 і 4.15, всі зразки бетону демонструють аналогічну тенденцію щодо збільшення середньої густини та міцності на стиск із часом твердіння. Однак, введення необробленого рециклінгового щебню (серія 1) суттєво впливає на міцність бетону на стиск і його середню густину. Результати показують, що бетон, виготовлений з використанням необробленого щебню, має нижчу міцність на стиск (10,4 і 19,2 МПа), у порівнянні з контрольним бетоном на природному заповнювачі (24 і 32,2 МПа) в обидва терміни випробувань. Через 7 днів твердіння міцність бетону на рециклінговому щебні, просоченому силікатом натрію (серія 2), була на 10 % вищою, ніж у бетону на необробленому щебні, а міцність бетону на механічно очищеному рециклінговому щебні (серія 3) була у 2,3 рази більшою за міцність бетону серії 1 на рециклінговому щебні. Через 28 днів міцність на стиск бетону з обробленим силікатом натрію та механічно очищеним щебнем становила 68 % та 98 %, відповідно, від контрольного бетону на натуральному заповнювачі (серія 4).

Загальні результати цього дослідження продемонстрували, що використання 100% великого заповнювача з необробленого щебню в бетонних сумішах призводить до зменшення міцності на стиск та середньої густини. Фактори, що сприяють цим негативним змінам, можна пояснити наступним чином. Наявність прилиплоного розчину на частинках щебню призводить до значного зниження якості порівняно з природними заповнювачами. Тріщини та пухкі залишкові частинки розчину на поверхні щебню перешкоджають утворенню міцних зв'язків між ним і новим цементним тестом, що створює слабкі місця при додаванні такого типу заповнювача в бетонну суміш. З іншого боку, використання механічно обробленого або просоченого щебню в бетонних сумішах дає протилежні результати. Підвищення міцності на стиск та середньої густини може бути пояснено наступним чином. Видалення слабких і пухких частинок розчину з поверхні щебню або їх просочення силікатом натрію покращує фізико-механічні властивості бетону на рециклінгових заповнювачах. Поліпшення якості поверхні забезпечує міцний поверхневий контакт міжфазної зони між цементним тістом і заповнювачем, що збільшує міцність бетону.

Модифікація поверхні рециклінгового заповнювача після просочення його розчином силікату натрію зменшує кількість пір і поглинаючі характеристики щебню. Гель С-S-H, що утворюється в результаті реакції силікату натрію з продуктом гідратації цементу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в новому розчині, покращує структуру пір і заповнює поверхневі мікротріщини. Гель С-S-H має ті ж властивості матеріалу, що й бетон, і може зчеплюватися з новим розчином без відшарування. Всі ці ефекти сприяють зміцненню зв'язку між поверхнею заповнювача та цементною матрицею, покращуючи механічну міцність бетону.

4.3. Визначення міцності цементно-піщаного розчину на природних та рециклінгових заповнювачах

Для дослідження впливу кількості рециклінгового піску на міцність цементно-піщаного розчину було сформовано зразки-призми розміром $4 \times 4 \times 16$ см (рис. 4.16) із складом, наведеним у табл.3.1, які витримувалися у нормальних умовах протягом 28 діб, у повітряносухих – 90 та 270 діб. Результати випробувань на згин і стиск, а також визначення середньої густини наведені на рис. 4.17 і 4.18.



Рис. 4.16. Загальний вид зразків цементно-піщаного розчину із рециклінговим заповнювачем піском

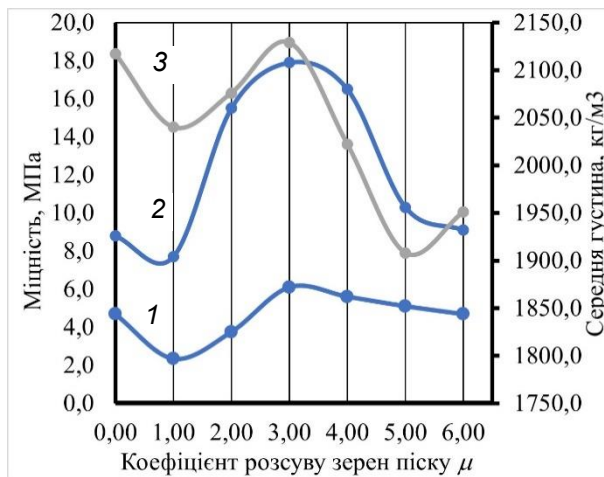


Рис. 4.17. Міцність на згин (1), стиск (2) та середня густина (3) зразків у віці 28 діб

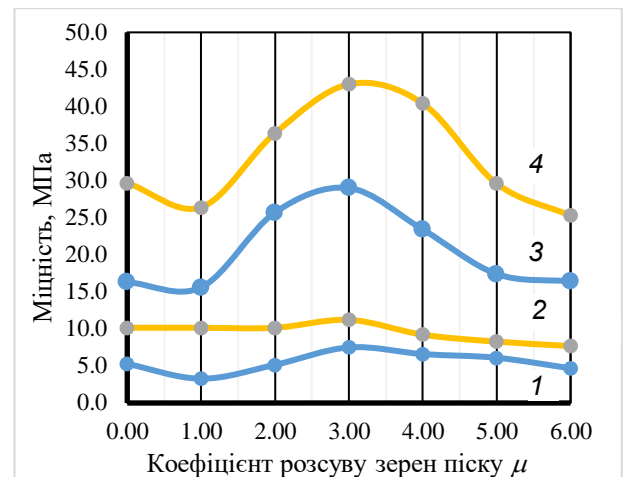


Рис. 4.18. Міцність на згин (1, 2) та стиск (3, 4) зразків у віці 90 діб (1, 3) і 270 діб (2, 4)

Як показано на рис. 4.17 та 4.18, найбільшу середню густину та міцність, як у віці 28 діб, так і у віці 90 і 270 діб, мають зразки з коефіцієнтом розсунення зерен піску $\mu_{\text{опт}} = 3,0$. Це відповідає найбільш щільному розташуванню частинок наповнювача в прошарку між зернами піску (рис. 3.3).

Для дослідження впливу кількості рециклінгового пилу на міцність цементно-піщаного розчину було сформовано зразки-призми розміром 4×4×16 см (рис. 4.19) із складом, наведеним у табл.3.2, вони витримувалися у нормальних умовах протягом 28 діб, у повітряносухих – 90 та 270 діб.



Рис. 4.19. Загальний вид зразків цементно-піщаного розчину із рециклінговим заповнювачем цементним пилом

Результати випробувань на згин і стиск, а також середньої густини наведені на рис. 4.20, 4.21 і 4.22. Дані на рис.4.20 демонструють зниження середньої густини зразків із збільшенням як кількості заміненого наповнювача на відходи шпал, так і із збільшенням терміну зберігання [150]. У першому випадку зменшення густини пояснюється збільшенням пористих рециклінгових заповнювачів у складі сировинних сумішей. Це призводить до більшого накопичення води під час приготування розчинів, а з часом витримування зразків її випаровування призводить до зменшення маси зразків, а отже і зменшення середньої густини. Але звертає на себе увагу зміна середньої густини зразків із заміною цементу на рециклінговий піл у віці 270 діб – середня густина трьох перших серій зрівнялася із густиною контрольного зразка. Це свідчить про формування в зразках продуктів новоутворень цементу за рахунок поступового вивільнення води і протікання пуцоланової реакції, що дозволило скомпенсувати пористість рециклінгових заповнювачів і підтвердити наукову гіпотезу.

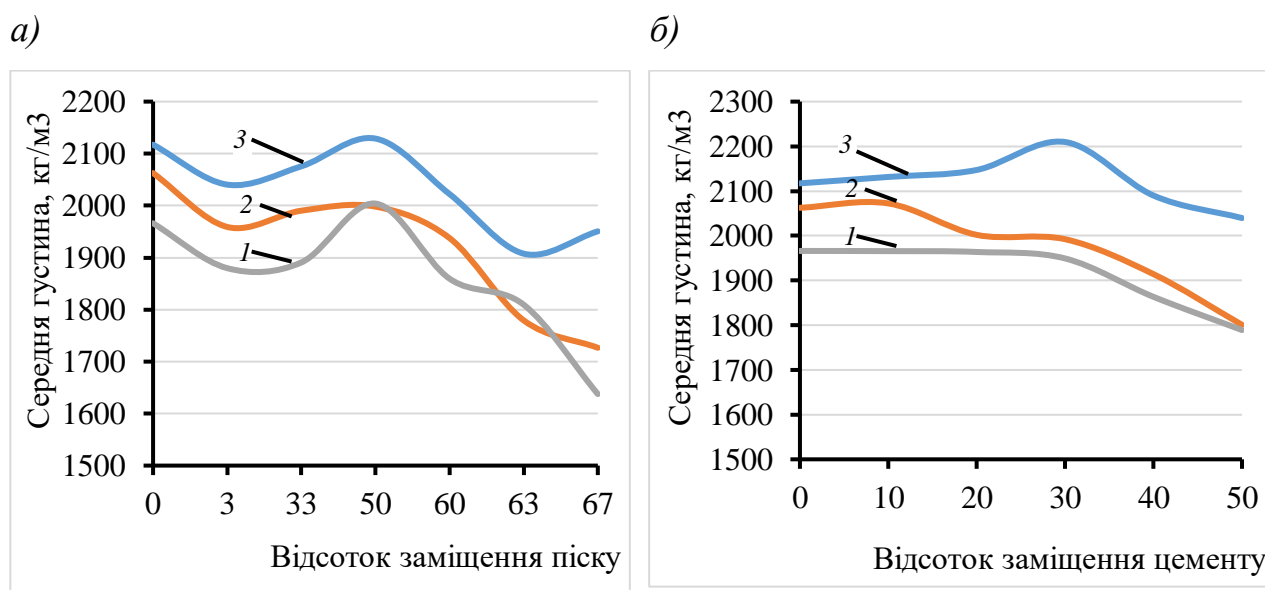


Рис. 4.20. Залежності середньої густини зразків цементно-піщаного розчину із заміною піску (а) і заміною цементу (б) при різних термінах зберігання: 1 – 28 діб; 2 – 90 діб; 3 – 270 діб

Як показано на рис. 4.21 та 4.22, найбільшу міцність, як у віці 28 діб, так і у віці 90 і 270 діб, мають зразки з коефіцієнтами розсунення зерен цементу $\lambda_{\text{опт}} = 1,7$ та $\lambda_{\text{опт}} = 2,5$. Це відповідає найбільш щільному розташуванню найдрібніших частинок цементу та наповнювача в прошарку між зернами цементу (рис. 3.3).

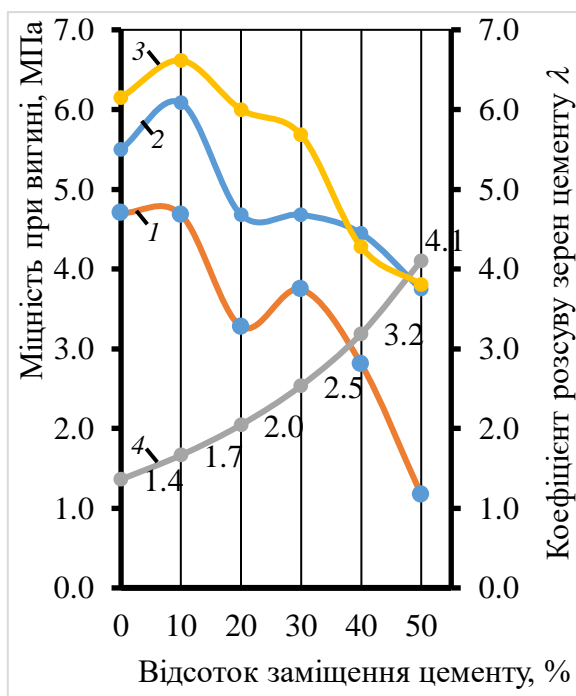


Рис. 4.21. Міцність на згин зразків у віці 28 дб (1), 90 дб (2), 270 дб (3) та відповідні значення коефіцієнта λ (4)

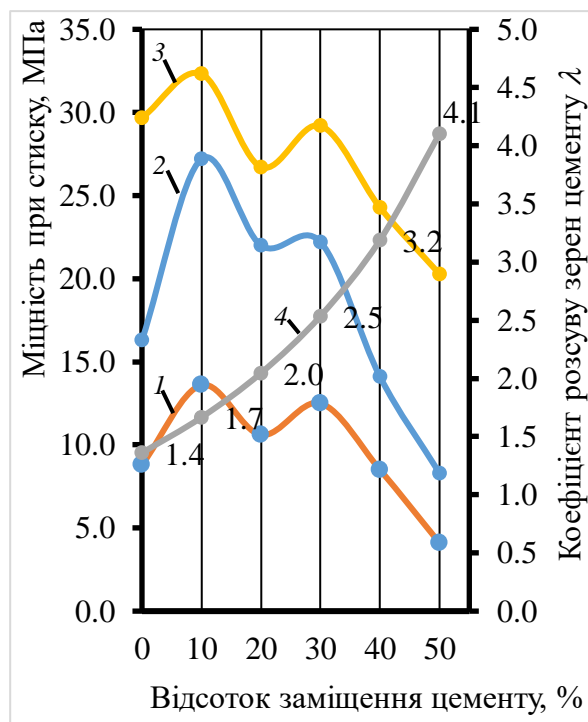


Рис. 4.22. Міцність на стиск зразків у віці 28 дб (1), 90 дб (2), 270 дб (3) та відповідні значення коефіцієнта λ (4)

Проаналізуємо тенденцію набору міцності кожного зразка в залежності від терміну твердіння (рис. 4.23), на якому показано, у скільки разів збільшується міцність кожної серії порівняно з її міцністю на 28 добу твердіння.

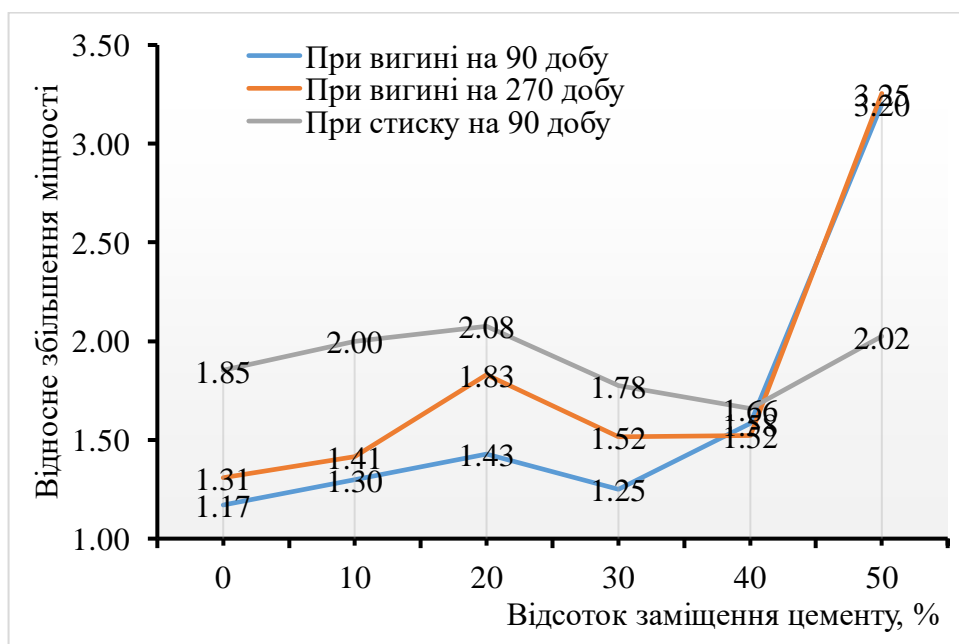


Рис. 4.23. Відносне збільшення міцності зразків із різним відсотком заміщення цементу

Як бачимо, для зразка без додавання рециклінгового пилу, міцність при вигині на 90 і 270 добу збільшилася у 1,17 та 1,31 разів, а при стиску – у 1,85 разів порівняно із такими же міцностями на 28 добу. У той же час усі інші зразки демонструють більшу величину покращення міцності порівняно з такою на 28 добу. Наприклад, для зразків із 50%-ою заміною цементу міцність при вигині зросла більше ніж втричі на 90 і 270 добу порівняно з міцністю цих зразків на 28 добу, а міцність при стиску зросла вдвічі. Це можна частково пояснити подальшою цементуючою дією негідратованих частинок рециклінгового цементу в цементно-піщаному розчині, що спостерігалось й іншими авторами [26], хоча, на нашу думку, збільшення міцності цим шляхом не може бути суттєвим. Більший вклад у підвищення міцності буде вносити значна кількість SiO_2 (табл. 3.4). Хімічний склад і пориста структура роблять подрібнені залишки бетону цеолітоподібними матеріалами, які можуть демонструвати пуцоланову активність – реакцію з гідроксидом кальцію з утворенням нерозчинних силікатів кальцію. Його активні аморфні SiO_2 та Al_2O_3 реагують з іонами Ca^{2+} та утворюють частинки гелю C-S-H. Ця гіпотеза опосередковано підтверджується даними роботи [26], де встановлено, що коли цементні мінерали гідратуються без присутності цеоліту, поверхня покривається різними кристалічними продуктами – пластинчастими кристалами портландиту, голкоподібним кристалічним еtringітом та дрібними кристалами гелю C-S-H, що ростуть у порожнинах між частинками портландиту. Заміна 10 мас.% цементу цеолітом перешкоджає гідратації цементу через брак води. Продукти гідратації без присутності як портландиту, так і еtringіту покривають меншу площу поверхні, і починають з'являтися усадочні тріщини. Гель C-S-H має значно дрібнішу кристалічну структуру з взаємопроникними кристалічними формами. Це зображення відповідає даним рентгенівської дифракції та їх аналізу. Більша різноманітність фаз CSH та CSAH є результатом високої сорбційної здатності впровадженого цеоліту та його пуцоланової активності завдяки наявності активних SiO_2 та Al_2O_3 з цеолітової добавки [23, 24].

На користь цього припущення говорить і інструментальний аналіз [151], який показав, що зі збільшенням вмісту модифікованої цеолітної добавки вміст портландиту – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – у мінеральному складі затверділого цементного тіста зменшується з 11,9 до 5,3% після 3 днів тужавлення та з 15,0 до 7,6% після 28 днів тужавлення. Найбільша кількість гелю C-S-H спостерігається при використанні модифікованої цеолітної добавки. Гідратація мінералів з цементного клінкеру відбувається при підвищеній лужності розчинів під впливом цеолітової добавки. За наявності октаедричних та тетраедричних фрагментів ґратчастої структури цеоліту та Ca^{2+} цементу можливі пуцоланові реакції у присутності води. Це створює можливість для утворення природних центрів кристалізації та призводить до росту гідратованих кальційалюмосилікатних сполук.

4.4. Визначення міцності полімернаповнених композиційних матеріалів на природних та рециклінгових наповнювачах

Композиційний матеріал з полімерним наповнювачем складається з мономера метилметакрилату як зв'язуючого та дрібної фракції бетонних відходів з розміром частинок менше 0,14 мм після подрібнення залізничних шпал (рис. 4.24). Зразки композиційних матеріалів були виготовлені шляхом змішування рідкого метилметакрилату з порошковим каталізатором і наповнювачем. Кількість дрібної фракції наповнювача варіювалася від 50 до 200 масових частин у загальному об'ємі суміші, яка складалася зі 100 мас. частин рідкого компонента і 100 мас. частин порошкового компонента [152]. Такий склад суміші та діапазон вмісту наповнювача було обрано згідно з п. 3.3. Міцність наповненого полімерного композиційного матеріалу визначали шляхом випробування зразків на стиск і вигин зразків-балочок розміром 40 мм × 40 мм × 160 мм (рис. 4.25). Результати випробувань наведені на рис. 4.26, 4.27.

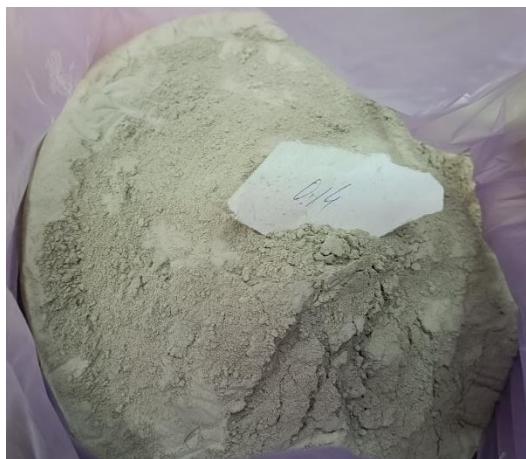


Рис. 4.24. Фото рециклінгового наповнювача



Рис. 4.25. Фото зразків наповнених композиційних матеріалів

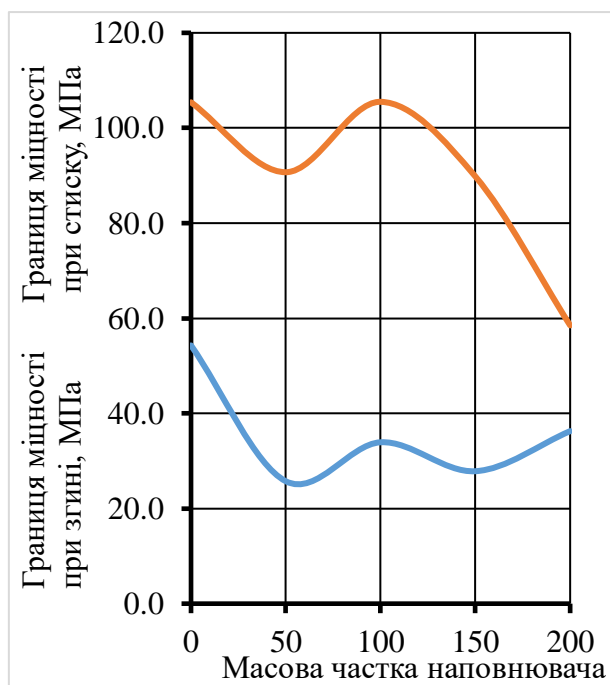


Рис. 4.26. Залежність міцності полімерного наповненого матеріалу від кількості наповнювача – пилу

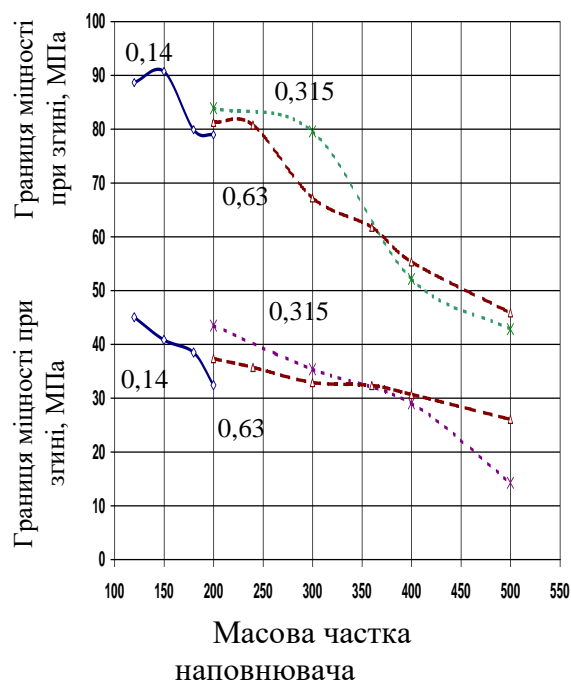


Рис. 4.27. Залежність міцності полімерного наповненого матеріалу від кількості наповнювача – піску

При додаванні до полімеру дрібних бетонних відходів розміром менше 0,14 мм у кількості від 50 до 200 масових частин, границя міцності при стиску становить 25,7 МПа і 36,3 МПа, відповідно, а границя міцності при згині – 90,7 МПа і 58,5 МПа, відповідно [153]. Найвищу міцність як при вигині, так і при стиску показують зразки, що містять 100 масових частин дрібного наповнювача – 33,9 МПа і 105,5 МПа, відповідно, що порівняно з міцністю чистого полімеру

(105,4 МПа). Попередні дослідження авторів [54] наповнених композицій піском фракцією розміром частинок більше 0,14 мм у кількості 150 мас.част. показали міцність при стиску 90,7 МПа та при згині 44,97 МПа (рис. 4.27). Оскільки ця фракція піску має меншу питому поверхню, то досягнення відповідної міцності досягається при більшому співвідношенні компонентів полімернаповненої композиції. Отже, підтверджена теоретична умова створення щільної міцної структури полімернаповнених композиційних матеріалів за рахунок дотримання певного співвідношення позитивно та негативно заряджених поверхонь в системі. Більша міцність зразків із рециклінговим пилом пояснюється тим, подрібнені до пилюватої фракції залишки бетону мають велику кількість кальційвміщуючих елементів – портландит, кальцит, еtringіт, гідросилікати кальцію. Складноефірна функціональна група C=O утворює карбоксильні групи в присутності води, які, у свою чергу, взаємодіють із вільними іонами кальцію, присутніми в поровому розчині, або незбалансованими катіонами на поверхні $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або C-(A)S-H, утворюючи фізичні ван-дер-ваальсові або хімічні зв'язки. Дослідження молекулярної динаміки, виконані у [143], показали існування незв'язаних взаємодій між подвійним зв'язком кисню складноефірної функціональної групи та іонами кальцію, навіть у присутності шару адсорбованої води, що сприяє збільшенню міцності системи і підтверджує теоретичні підгрунтя роботи. Також додатковим фактором може бути те, більш крупні наповнювачі можуть бути погано дисперговані в матриці полімеру, що призводить до слабшого зв'язку між частинками та утворення більшої кількості пор і дефектів, що призводить до збільшення пористості композитного матеріалу і відповідно, зменшення міцності.

4.5. Дослідження впливу кількості наповнювача на пористість зразків цементно-піщаного розчину за кінетикою їх водопоглинання

Метою цих досліджень є вивчення пористості зразків цементно-піщаного розчину із різним відсотком використання дрібної фракції помелу залишків

залізобетонних залізничних шпал. Для дослідження змін пористості при введенні наповнювачів були виготовлені зразки-балочки розміром 40×40×160 мм із суміші портландцементу, піску і води, в яких частина піску або цементу була замінена пилюватою фракцією подрібнених шпальних відходів [154]. Пісок заміщували наповнювачем, який пройшов крізь сито з розмірами чарунки 0,14 мм, цемент – наповнювачем, який пройшов крізь сито з розмірами чарунки 0,09 мм. Співвідношення компонентів наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Співвідношення компонентів в серіях зразків

Номер серії зразків	Витрата компонентів, кг/м ³					В/ Ц*
	Цемент	Пісок	Вода	Наповнювач (розмір зерен < 0,14 мм)	Наповнювач (розмір зерен < 0,09 мм)	
1	650	1950	260	-	-	0,5
2	650	1560	300	390	-	0,5
3	650	1170	340	780	-	0,5
4	650	975	360	975	-	0,5
5	650	780	380	1170	-	0,5
6	650	390	420	1560	-	0,5
7	650	-	460	1950	-	0,5
8	585	1950	330	-	65	0,5
9	520	1950	350	-	130	0,5
10	455	1950	370	-	195	0,5
11	390	1950	410	-	260	0,5
12	325	1950	450	-	325	0,5

* Водо-цементне відношення вказано без урахування додаткової кількості води на змочування і поглинання пористими наповнювачами

Після твердіння в нормальних умовах протягом 28 діб та 270 діб зразки кожної серії висушувалися при температурі 105±5 °С з періодичним зважуванням кожні 24 години до моменту, коли при двох послідовних зважуваннях маса зразка відрізнятиметься не більше ніж на 0,1 %. Потім зразки

поміщали в ємність з водою так, щоб рівень води в ній був вище за верхній рівень зразків на 50 мм (рис. 4.28). Температура води у ємності була 20 ± 2 °С.



Рис. 4.28. Загальний вид зразків для дослідження водопоглинання

Водопоглинання кожного зразка за масою W_m у відсотках визначали з похибкою до 0,1 % за формулою із [124]

$$W_m = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де m_b – маса водонасиченого зразка, г;

m_c – маса сухого зразка, г.

Водопоглинання кожного зразка за об'ємом W_o у відсотках визначали з похибкою до 0,1 % за формулою із [124]

$$W_o = \frac{W_m \cdot \rho_o}{\rho_b}, \quad (4.2)$$

де W_m' – водопоглинання окремого зразка за масою, %;

ρ_o – середня густина сухого зразка, кг/м^3 ;

ρ_b – середня густина води, прийнята 1000 кг/м^3 .

Вологість серії зразків визначали як середнє арифметичне значення результатів визначення вологості окремих зразків.

Для визначення параметрів порової структури цементно-піщаного розчину з наповнювачами використовували метод дослідження кінетики поглинання води, що дозволяє визначити показник середнього розміру та однорідності розмірів капілярних пор. Криві водопоглинання виражаються рівнянням у [124]

$$W_t = W_{\max} \left[1 - e^{-(\bar{\lambda}t)^\alpha} \right], \quad (4.3)$$

де W_t – водопоглинання зразка за час t за масою, %;

W_m – повне водопоглинання зразка за масою, %;

e – основа натурального логарифма;

t – час водопоглинання, год;

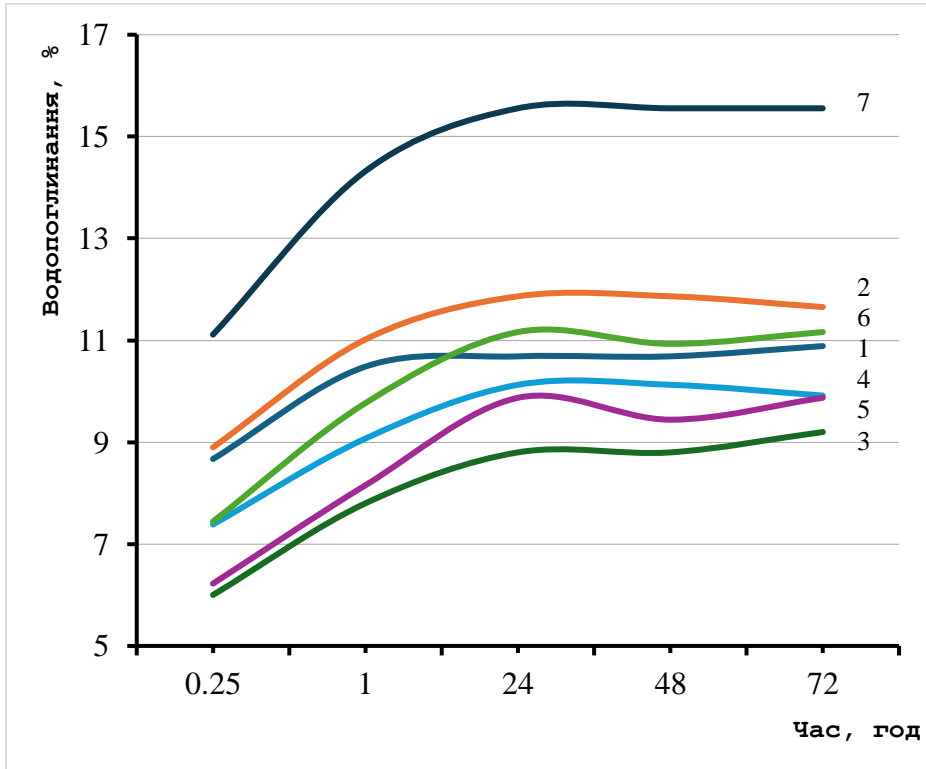
$\bar{\lambda}$ – показник середнього розміру відкритих капілярних пор, який дорівнює границі відношення прискорення процесу водопоглинання до його швидкості і визначається за номограмами, наведеними в [124];

α – показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор, визначається за номограмами, наведеними в [124].

Для отримання кривих водопоглинання зважування зразків проводили через 0,5 та 1 годину після занурення висушеного зразка у воду, а потім кожні 24 години до постійної маси. За результатами випробувань розраховують відносне водопоглинання масою в моменти часу $t_1 = 0,25$ і $t_2 = 1$ год. За цими величинами згідно [124] визначають параметри $\bar{\lambda}$ та α .

На рис. 4.29 представлені криві водопоглинання серій зразків згідно з табл. 4.3. Криві мають плавний характер експоненційного типу, які апроксимуються трипараметричною експоненційною функцією (4.3). Для більшої наочності криві для зразків із заміною піску і цементу наведені окремо (рис. 4.29, а і б).

а)



б)

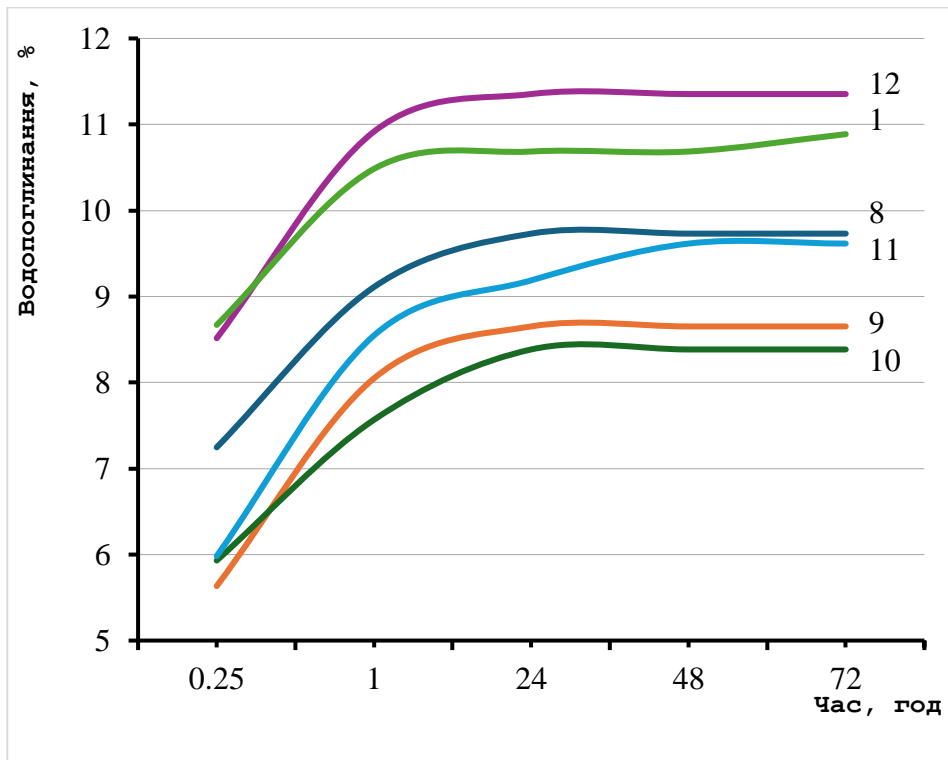


Рис. 4.29. Криві кінетики водопоглинання серій зразків у віці 28 діб із заміною піску (а) і заміною цементу (б). Номери поруч з кривими відповідають номерам серій у таблиці 4.3.

Як свідчать результати на рис. 4.29, найбільше водопоглинання мають зразки з найбільшим відсотком заміни піску або цементу – 15,6% і 11,4% (відповідно серії 7 і 12). Це пов'язано як із загальною нещільною структурою за рахунок неоптимального розташування частинок піску, цементу і наповнювача, так і з підвищеною пористістю самого наповнювача. Найменше водопоглинання мають зразки серій 3 і 10 (відповідно 9,2% і 8,4%). Отже, для цих зразків досягнуто найбільш щільне пакування частинок, що зменшує водопоглинання навіть при використанні пористих наповнювачів.

Виконаємо розрахунок параметрів рівняння (4.3) згідно з [124] та визначимо зміну закритої пористості зі збільшенням кількості наповнювача. Загальну пористість матеріалу P визначали за значеннями істинної густини речовини ρ_0 та середньої густини матеріалу ρ (за даними п. 4.3), використовуючи співвідношення [124]

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100\%. \quad (4.4)$$

Відкрита пористість матеріалу визначалася з міркувань, що об'єм відкритих капілярних пір P_0 у зразках дорівнює об'ємному водопоглинанню, що визначається формулою (4.2). Закрита пористість визначається різницею цих величин, а саме

$$P_z = P - P_0. \quad (4.5)$$

Результати розрахунків зведені у табл. 4.4 та 4.5, а також представлені на рис. 4.30.

Таблиця 4.4 – Розрахунок параметрів експоненційних кривих

Номер серії	W_{\max} , %	W_{t2} , %	W_{t2}/W_{\max}	W_{t1} , %	W_{t1}/W_{\max}	$\bar{\lambda}_1$	α
1	10,89	10,48	0,96	8,67	0,80	3,15	0,50
2	11,65	11,02	0,95	8,90	0,76	3,00	0,55
3	9,20	7,80	0,85	6,00	0,65	1,90	0,42
4	9,92	9,07	0,91	7,38	0,74	2,35	0,40
5	9,87	8,15	0,83	6,22	0,63	1,75	0,40

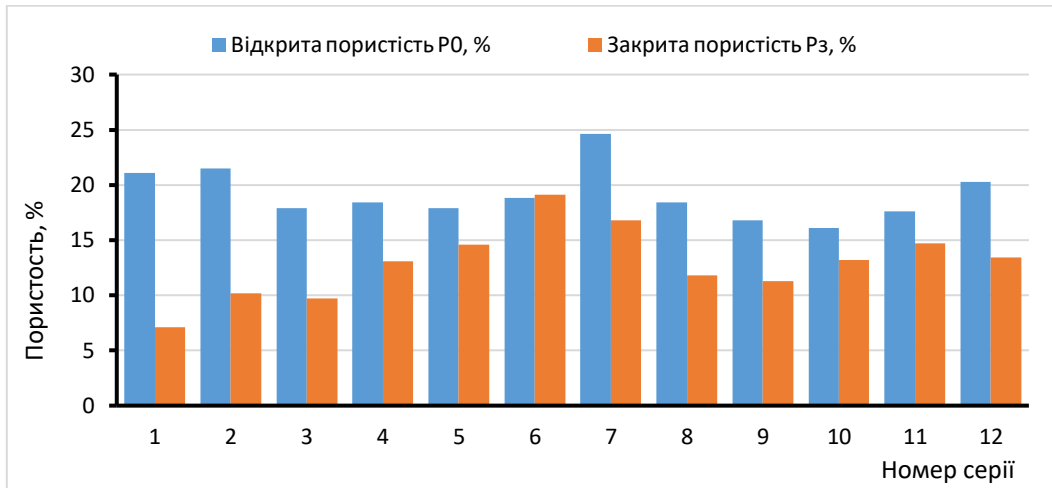
Продовження табл. 4.4

Номер серії	W_{\max} , %	W_{t2} , %	W_{t2}/W_{\max}	W_{t1} , %	W_{t1}/W_{\max}	$\bar{\lambda}_1$	α
6	11,16	9,77	0,88	7,44	0,67	2,10	0,48
7	15,56	14,32	0,92	11,11	0,71	2,50	0,50
8	9,73	9,11	0,94	9,73	0,74	2,51	0,45
9	8,65	8,05	0,93	8,65	0,65	2,60	0,65
10	8,38	7,57	0,90	8,38	0,71	2,25	0,42
11	9,62	8,55	0,89	9,62	0,62	2,20	0,60
12	11,35	10,92	0,96	11,35	0,75	3,00	0,53

Таблиця 4.5 – Розрахунок пористості серій зразків

Номер серії	Середня густина ρ_0 , кг/м ³	Загальна пористість P , %	Відкрита пористість P_0 , %	Закрита пористість P_z , %	Показник середнього розміру відкритих капілярних пор $\bar{\lambda}$
1	1937,5	28,2	21,1	7,1	9,2
2	1843,8	31,7	21,5	10,2	7,2
3	1953,1	27,7	17,9	9,7	4,5
4	1851,6	31,4	18,4	13,1	8,3
5	1820,3	32,6	17,9	14,6	4,0
6	1679,7	37,8	18,8	19,1	4,6
7	1582,1	41,4	24,6	16,8	6,3
8	1886,7	30,1	18,4	11,8	7,8
9	1941,4	28,1	16,8	11,3	4,8
10	1910,2	29,2	16,1	13,2	6,8
11	1828,1	32,3	17,6	14,7	4,2
12	1789,1	33,7	20,3	13,4	8,2

а)



б)

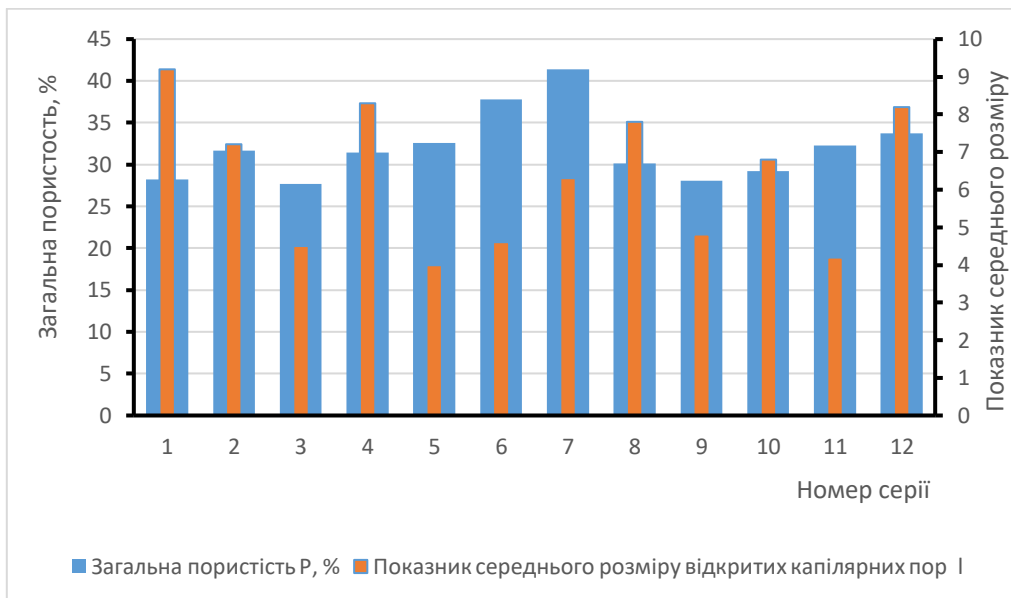


Рис. 4.30. Значення закритої, відкритої (а) та загальної пористості і показника середнього розміру відкритих капілярних пор \bar{l} (б) для серій зразків у віці 28 діб

Аналізуючи діаграми на рис. 4.30, а бачимо, що співвідношення відкритої та закритої пористості відрізняється для зразків із заміною цементу та з заміною піску. Значення відкритої пористості найменше для серій 9 і 10. Закрита пористість спочатку зростає від серії 1 до серії 6, а потім знов зменшується для тих самих зразків серій 9 і 10. Співвідношення відкритої та закритої пористості для ненаповненого зразка (серія 1) становить 2,95, тобто відкрита пористість майже втричі більша за закрити. Для наповнених зразків це співвідношення

коливається в межах $2,1 \dots 0,98$ і свідчить про збільшення кількості закритих пор за рахунок кількості відкритих. З точки зору довговічності найкраще співвідношення загальної, відкритої та закритої пористості мають зразки серії 10 – цей склад характеризується найменшою загальною і відкритою пористістю, що запобігає проникненню води ззовні, і майже такою ж саме величиною закритої пористості, що збільшує морозостійкість і довговічність матеріалу такого складу. Згідно з рис. 4.30, б, добавка наповнювачів сильно впливає на показник середнього розміру відкритих капілярних пір, найменше значення якого демонструють зразки серій 5 і 11, що означає найменше адсорбційне поглинання вологи із повітря матеріалом такого складу. Найбільшу загальну пористість мають зразки серій 6 і 7, так само як і відкриту пористість. Фото зразків на рис. 4.31 також підтверджують цей висновок. Отже, додавання наповнювачів замість цементу або піску при певному співвідношенні компонентів призводить до зниження капілярних пор у зразках з добавками, що позитивно вплине на такі характеристики як водопроникність, морозостійкість, солестійкість.

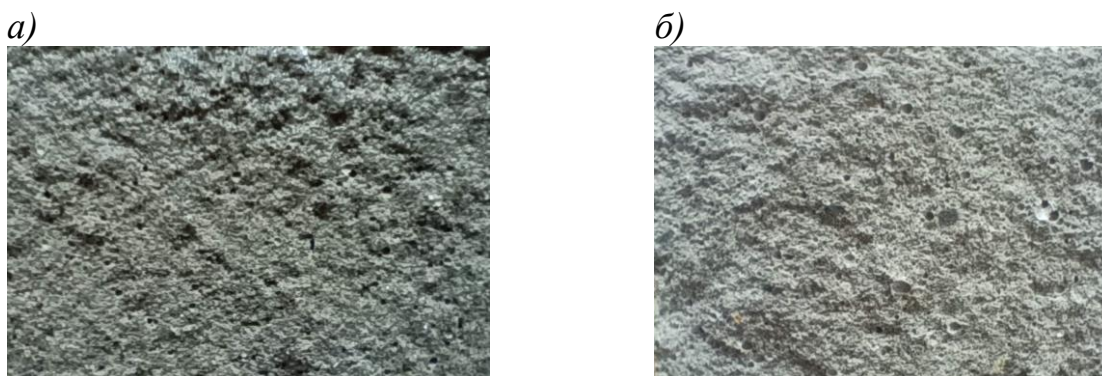
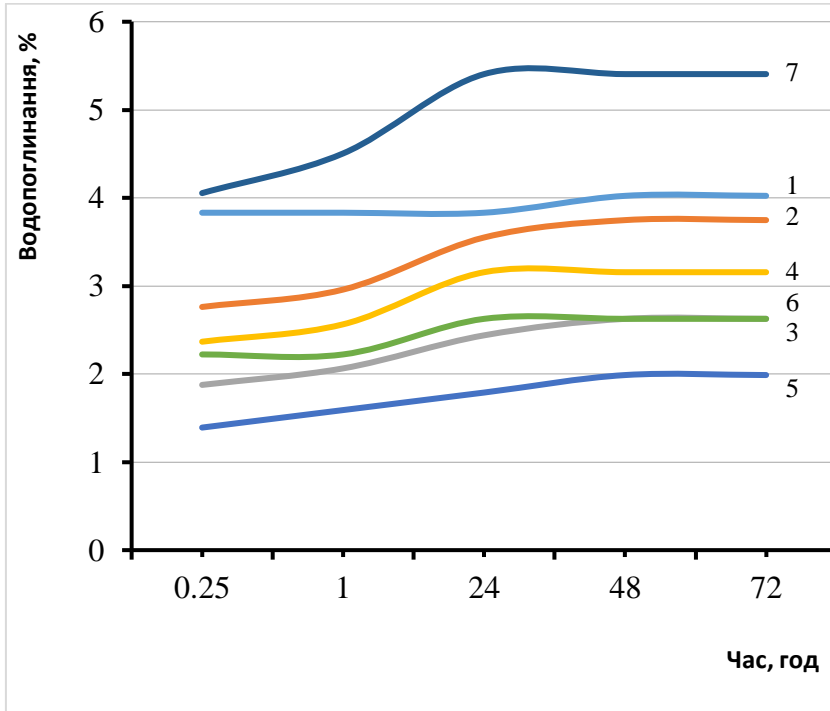


Рис. 4.31. Фото перерізів зразків із заміною 40 % піску (а) і 10 % цементу (б)

Для підтвердження гіпотези про можливу подальшу гідrataцію мономінералів цементу, які не прогідратували, було виконано такий же комплекс досліджень для зразків у віці 270 діб. Розрахунки наведено у Додатку Г, а результати наведено на рис. 4.32, 4.33.

a)



б)

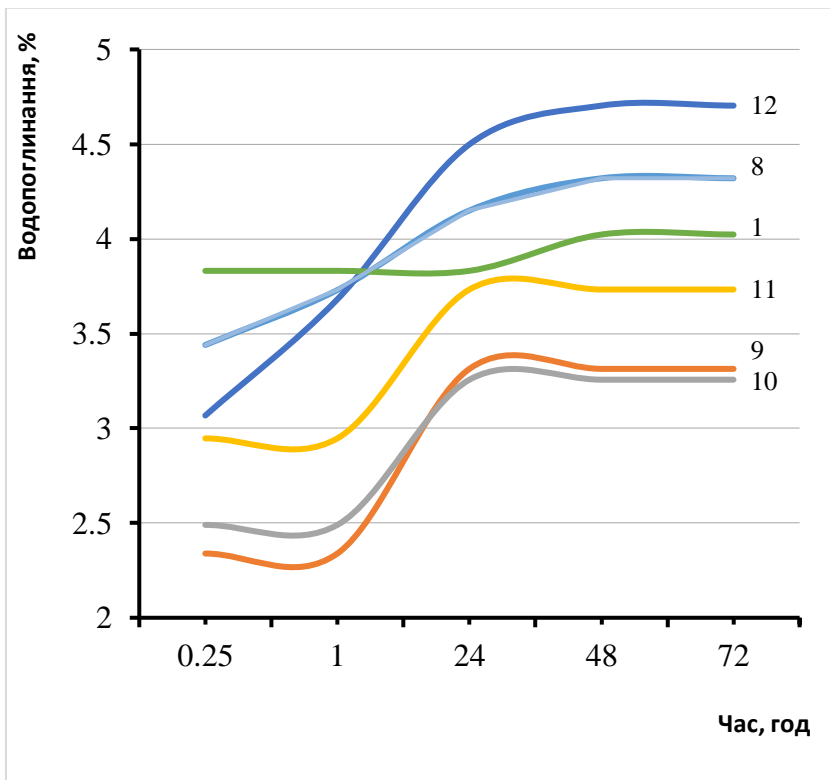
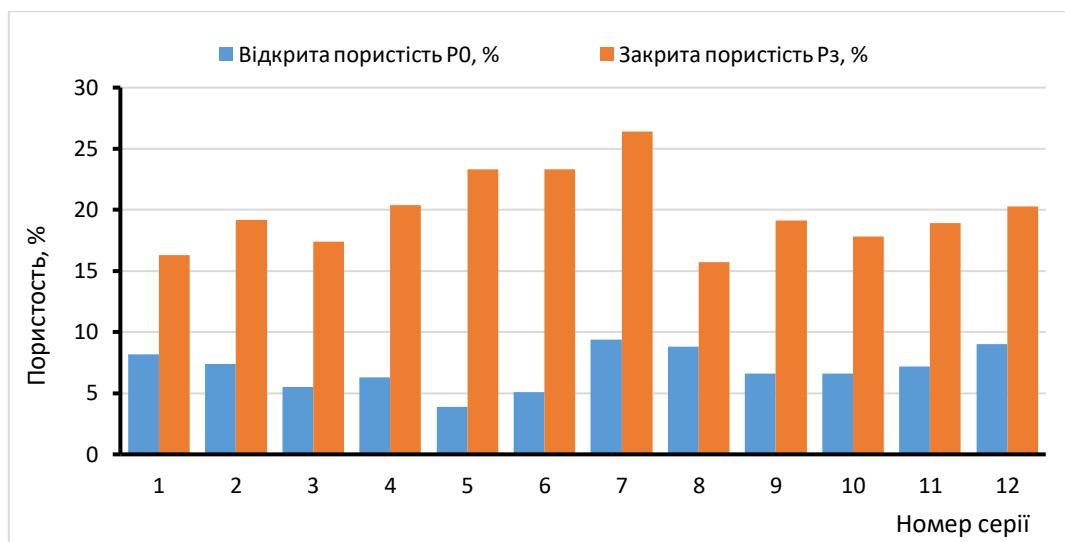


Рис. 4.32. Криві кінетики водопоглинання серій зразків у віці 270 діб із заміною піску (а) і заміною цементу (б). Номери поруч з кривими відповідають номерам серій у таблиці 4.3.

a)



б)

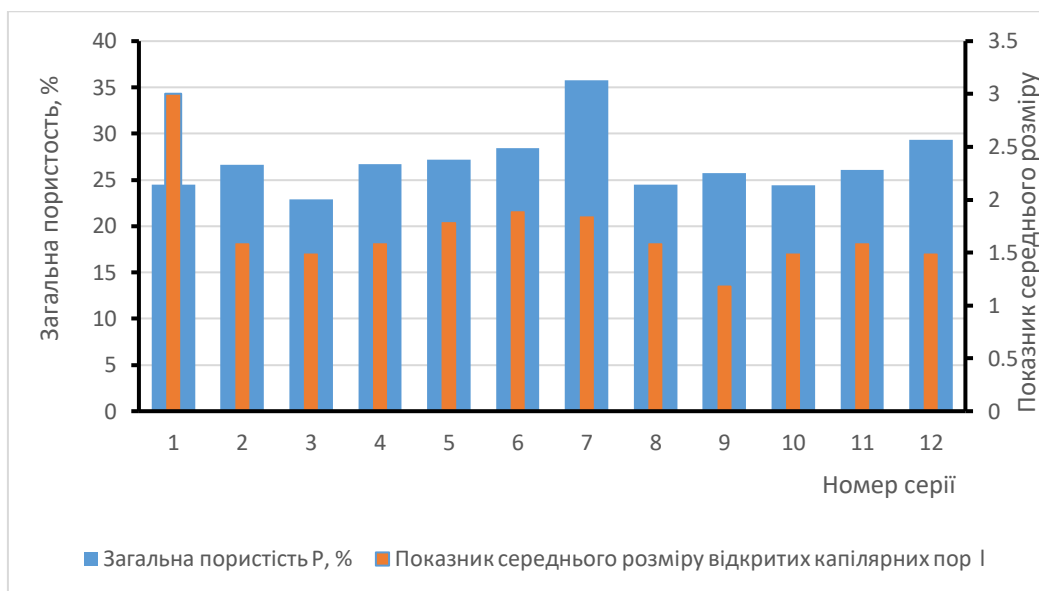


Рис. 4.33. Значення закритої, відкритої (а) та загальної пористості і показника середнього розміру відкритих капілярних пор \bar{l} (б) для серій зразків у віці 270 діб

Якщо порівняти рис. 4.30, а і 4.33, а, бачимо, що з часом в усіх зразках співвідношення закритої та відкритої пористості змінюється на протилежне – відкрита пористість зменшується, а закрита зростає. Що стосується загальної пористості (рис. 4.30, б, рис. 4.33, б), то її значення дещо знизилося для всіх серій зразків, але показник закритих капілярних пор зазнав суттєвих змін – зменшився вдвічі-втричі за виключенням зразків серії 1. Це означає, що основна гідратація зразків без наповнювачів закінчується майже повністю на 28 добу, у той час як за рахунок повільного вивільнення води із пористих наповнювачів формується

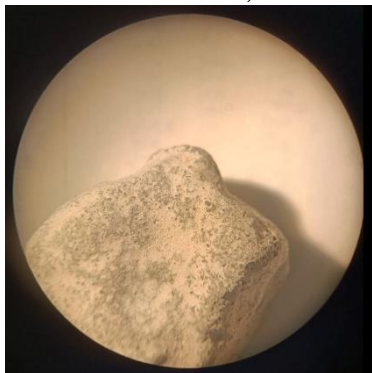
більш щільна структура з утворенням гідросилікатів кальцію, що підтверджує теоретичне припущення стосовно формування структури матеріалів з використанням рециклінгових заповнювачів.

4.6 Фізико-хімічні дослідження розроблених матеріалів

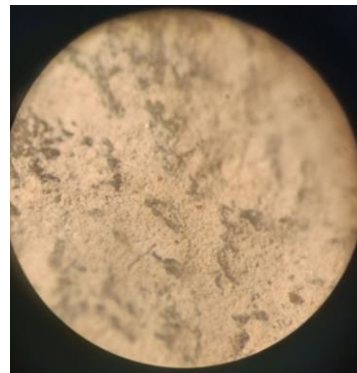
4.6.1. Дослідження макро- і мезоструктури розроблених матеріалів методом оптичної мікроскопії

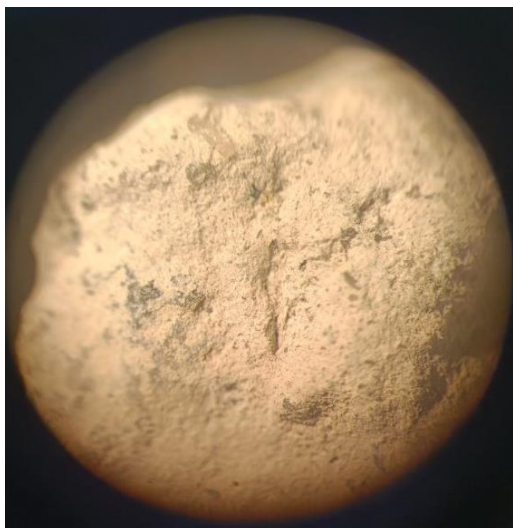
Знімки поверхонь заповнювачів природних і після різних видів обробки за збільшення $\times(25\dots87,5)$ наведено на рис. 4.34...4.38. На зразках заповнювача безпосередньо із подрібнених відходів шпал (рис. 4.34) добре видно залишки прикріпленого старого цементно-піщаного розчину для всіх фракцій отриманого заповнювача від 20 мм до 0,14 мм. Для порівняння були отримані знімки поверхонь натурального заповнювача (рис. 4.35), які мають чисту шорстку поверхню. Після механічного очищення в барабанному млині за способом п.2.1.1, отримано окатану форму заповнювачів із гладкою поверхнею (рис. 4.36). Просочення силікатом натрію дало змогу отримати зміцнений поверхневий шар із залишків старого налиплого цементно-піщаного розчину (рис. 4.37) більш однорідної структури. Просте подрібнення без додаткової механічної обробки за методом п. 2.1.1 не дозволило отримати повністю очищену поверхню заповнювача, на якій спостерігаються залишки розчину (рис. 4.38), що підтвердило ефективність розробленого методу за патентом [155].

а) при збільшенні $\times 12,5$



б) при збільшенні $\times 25$



в) при збільшенні $\times 50$ г) при збільшенні $\times 25$ д) при збільшенні $\times 25$ е) при збільшенні $\times 50$ ж) при збільшенні $\times 50$ и) при збільшенні $\times 50$ 

к) при збільшенні $\times 50$



л) при збільшенні $\times 50$



Рис. 4.34. Оптичні знімки поверхні заповнювачів, отриманих після подрібнення шпал фракцій: *a* – 20 мм; *б* – 10 мм; *в* – 5 мм; *г* – 2,5 мм; *д* – 1,25 мм; *е*, *ж* – 0,63 мм; *и* – 0,315 мм; *к* – 0,14 мм; *л* – менше 0,14 мм

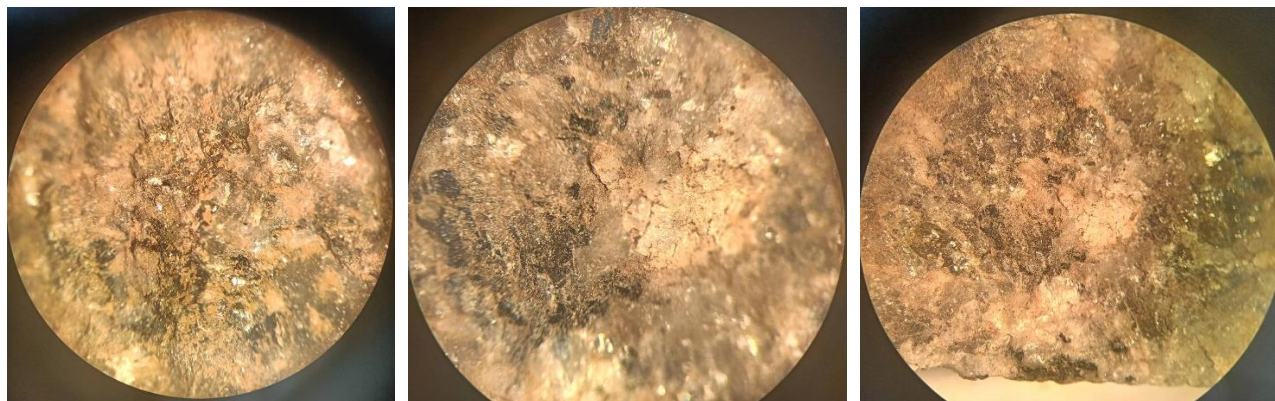


Рис. 4.35. Оптичні знімки поверхні натурального заповнювача фракції 20 мм при збільшенні $\times 87,5$

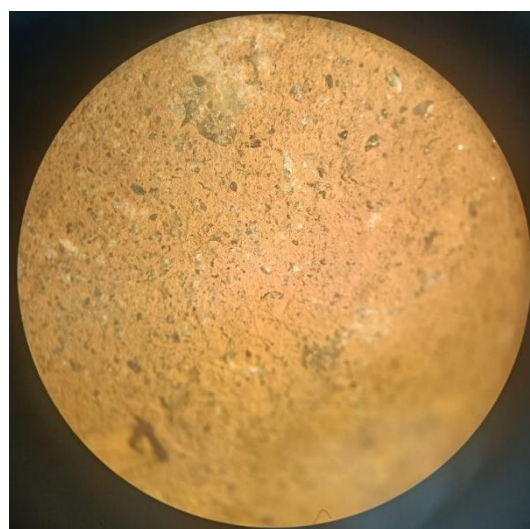


Рис. 4.36. Оптичні знімки поверхні рециклінгового заповнювача фракції 20 мм після механічного очищення за методом п. 2.1.1 при збільшенні $\times 50$



Рис. 4.37. Оптичні знімки при збільшенні $\times 50$ поверхні рециклінгового заповнювача фракції 20 мм після просочення силікатом натрію

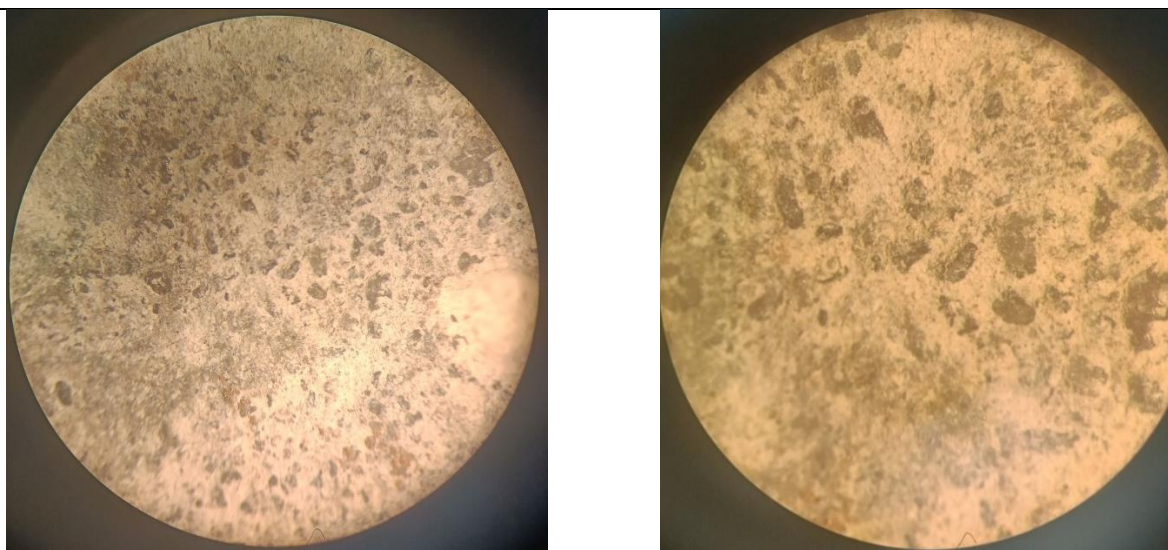


Рис. 4.38. Оптичні знімки при збільшенні $\times 50$ поверхні заповнювачів, отриманих після подрібнення шпал звичайним методом

4.6.2 Дослідження взаємодії компонентів методом інфрачервоної спектроскопії

Для дослідження взаємодії складових методом інфрачервоної спектроскопії було підготовлено 6 серій зразків – для серії 1 використовували бетон з необробленим рециклінговим крупним заповнювачем; для серії 2 – бетон з рециклінговим заповнювачем, просоченим силікатом натрію протягом 14 днів; для серії 3 – бетон з рециклінговим заповнювачем після механічного очищення в барабанно-му млині; для серії 4 – бетон на природному щебні; для серії 5 – бетон з рециклінговим заповнювачем, просоченим силікатом натрію протягом 1 години; для серії

б – зразки цементного розчину відбирали безпосередньо з поверхні просоченого заповнювача шляхом дряпання [156]. Зразки, підготовлені за п. 2.2.3, досліджували за допомогою FTIR-спектрометра Bruker Alpha в діапазоні хвильових чисел $400\text{-}4000\text{ см}^{-1}$ зі спектральною роздільною здатністю 4 см^{-1} . Фоновий спектр отримували з використанням чистих KBr-спектрів, а спектри зразків скоригували з використанням лінійної базової лінії. ІЧ-спектри, отримані для всіх серій зразків, мають типову форму, характерну для затверділого портландцементу (рис. 4.39).

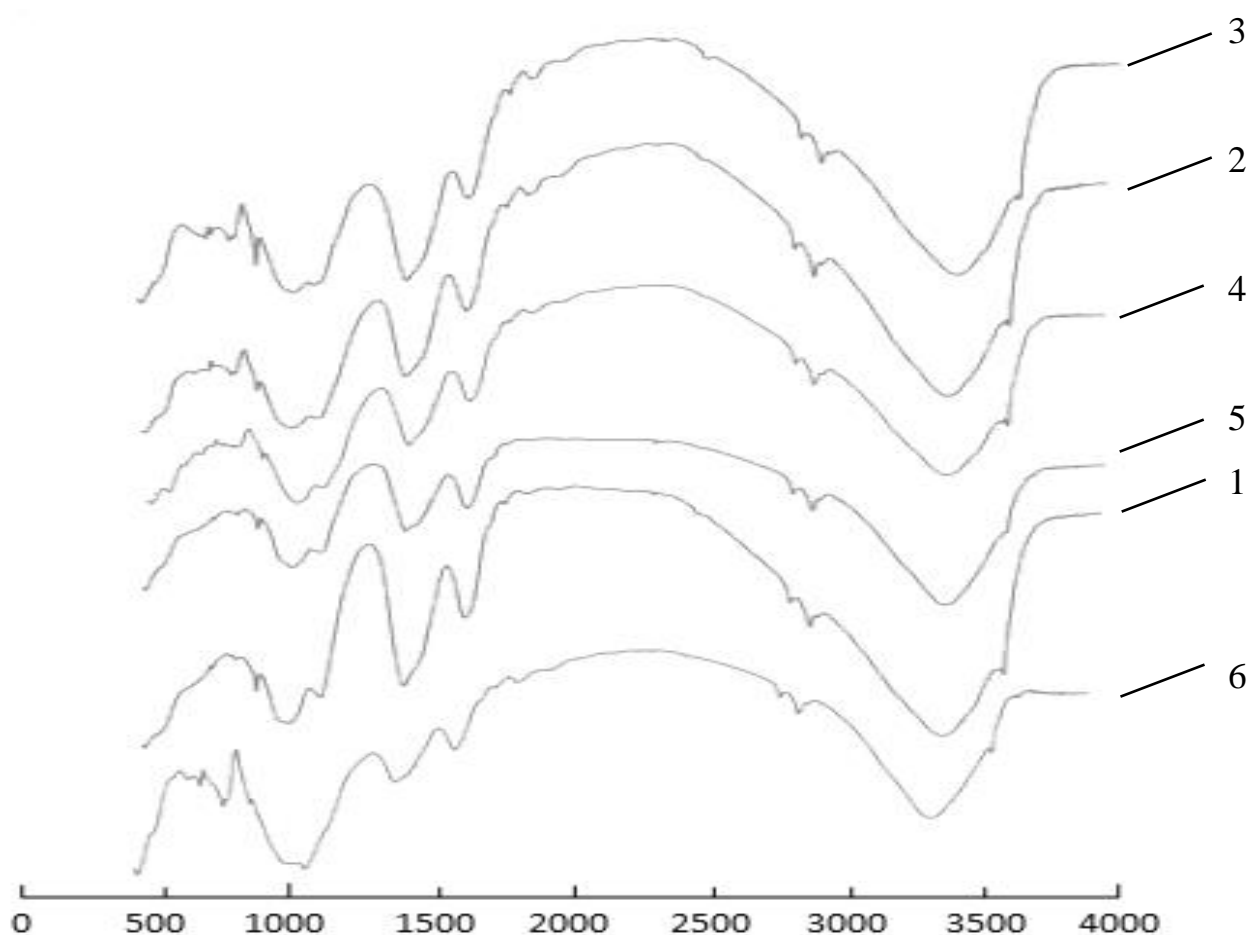


Рис. 4.39. ІЧ-спектри зразків: 1 – бетон з необробленим рециклінговим крупним заповнювачем; 2 – бетон з рециклінговим просоченим заповнювачем протягом 14 днів; 3 – бетон з рециклінговим заповнювачем після механічного очищення; 4 – бетон на природному щебні; 5 – бетон з рециклінговим просоченим заповнювачем протягом 1 години; 6 – зразки цементного розчину безпосередньо з поверхні просоченого заповнювача

Як зазначено в [129], широка смуга з максимумом близько 3440 см^{-1} підтверджує наявність води, зв'язаної у гідратних фазах, тоді як смуга середньої інтенсивності близько 1645 см^{-1} вказує на наявність капілярної води у зразках. Основні характерні піки C-S-H розташовані в діапазоні $1100\text{--}900\text{ см}^{-1}$. Іони SO_4^{2-} викликають вузькі смуги при 1088 та 1100 см^{-1} , характерні для моносульфоалюмінату кальцію (етрингіту). Різка смуга при 3640 см^{-1} вказує на наявність вільних (незв'язаних) гідроксильних (ОН)-груп, які для цементних систем пов'язують з портландитом $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [129].

Аналіз спектрів (рис. 4.39) призвів до наступних висновків. Тип обробки заповнювача не впливає на кількість портландиту та етрингіту в гідратованому цементі, оскільки розташування смуг поглинання при 3640 см^{-1} та 1100 см^{-1} та їх інтенсивність однакові для всіх зразків. Однак, метод обробки заповнювачів суттєво впливає на формування гелевої фази гідратованих силікатів та алюмінатів кальцію. Форма смуги, характерної для коливань Si-O у фазі C-S-H, розширюється, а її максимум зміщується від 995 см^{-1} для бетону з необробленим щебнем (серія 1) до 1000 см^{-1} для бетону з природним та обробленим заповнювачем (серії 2, 3, 4). Це свідчить про те, що обробка модифікує гідратну структуру силікату кальцію матеріалу, впливаючи на співвідношення Ca/Si у фазі C-S-H та ступінь полімеризації силікатних ланок. Цей ефект може бути наслідком зміни концентрації Ca^{2+} та співвідношення Ca/Si у поровому розчині через присутність розчину силікату натрію, що потенційно впливає на продукти гідратації цементу. Форма смуги, характерної для C-S-H та інших силікатних фаз ($900\text{--}1200\text{ см}^{-1}$), також вказує на різну мікроструктуру фаз, що утворюються в бетонах з різними типами заповнювачів.

Інтенсивна смуга близько 1420 см^{-1} та різкі смуги при 875 та 712 см^{-1} вказують на наявність карбонатів. Вони найбільш виражені в зразках бетону з необробленим та механічно очищеним щебнем. Для бетону з природним та просоченим щебнем (серія 2 та 4) інтенсивність цих смуг приблизно однакова. Смуги при 535 см^{-1} та 650 см^{-1} свідчать про утворення більшої кількості карбоалюмінатів, сульфоалюмінатів, гідрогарнатів та алюмосилікатів, що

пояснює вищу міцність бетону з обробленим заповнювачем порівняно з необробленим щебнем. Однак, гідратований алюмінат кальцію, алюмінат кремнезему та портландит мають нижчу міцність через свою пластинчасту структуру порівняно з міцнішою фазою гідрату силікату кальцію. Це може пояснити нижчу міцність бетону з просоченим або очищеним щебнем порівняно з бетоном з природними заповнювачами. Більша водоутримуюча здатність пористих залишків старого цементного розчину підтверджується більшою кількістю капілярної води у зразку бетону з необробленим переробленим заповнювачем (серія 1, смуги при 1650 см^{-1}).

На спектрах с просоченим щебнем (серія 4 та 6) бачимо незначну кількість портландиту, натомість зросла кількість карбонатних продуктів гідратації (смуги 700 см^{-1}). Це підтверджує механізм зміцнення бетону за рахунок взаємодії іонів кремнію із силікату натрію із іонами кальцію з утворенням відповідних сполук.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4

1. За результатами просіювання заповнювачів, отриманих шляхом подрібнення залізобетонних шпал, найбільш типовою визначено фракцію із середнім розміром частинок 30 мм, тоді як метод обробки зображень встановив величину 22,6 мм. Така різниця може призвести до відхилень у розрахунках бетонної суміші, що вплине на перевитрати цементу або зниження міцності виробу. За геометрією зерен рециклінговий щебінь класифікується як кубоподібний заповнювач, відповідно до стандартного методу. Метод зображень, який потребує значно менше часу, показав округлість 0,78 – ознаку високого ступеня окатаності. Найінтенсивніше видалення залишків старого цементно-піщаного розчину відбувається в перші 1–1,5 години. Ці результати будуть враховані при розробленні ефективної технології повторного використання рециклінгової сировини.

2. У ході експериментального дослідження бетонів, виготовлених із рециклінгового щебню, отриманого з подрібнених залізобетонних шпал, встановлено такі результати. Як механічне видалення залишків старого цементно-піщаного розчину, так і просочення залишкового шару розчином силікату натрію позитивно впливають на фізико-механічні характеристики бетону, у порівнянні з варіантами на необроблених заповнювачах. Бетон із необробленого щебню демонструє у три рази нижчу міцність на стиск, ніж бетон на природних заповнювачах. Механічна обробка дає змогу досягти 98 % цієї міцності. Обробка силікатом натрію дещо покращує показники на 7 добу, а на 28 добу забезпечує 68 % від міцності зразків на чистих заповнювачах. Таким чином, обидві технології підготовки рециклінгового крупного заповнювача можна ефективно використовувати для отримання бетонів.

3. У процесі експериментального дослідження цементно-піщаних композицій, в яких частину піску було замінено наповнювачем із подрібнених залізобетонних шпал, встановлено таке: міцність на стиск і згин, а також середня густина зразків на 28-му добу нормального твердіння змінюються залежно від вмісту заповнювача. Оптимальні характеристики (міцність на згин 6,1 МПа, на

стиск 17,9 МПа, середня густина 2129 кг/м³) досягнуті при коефіцієнті розсунення зерен піску $\mu_{opt} = 3,0$. Подібні тенденції спостерігаються й на 90-ту добу при повітряносухому зберіганні (7,5 МПа на згин, 29,0 МПа на стиск). Це дало змогу встановити математичну залежність між середніми розмірами зерен піску та наповнювача для досягнення максимальної щільності й міцності на рівні мезоструктури.

4. У дослідженні цементно-піщаних композицій з додаванням наповнювача, отриманого шляхом подрібнення залізобетонних шпал, було виявлено залежність показників міцності на стиск і згин (на 28-й та 90-й день твердіння) від кількості наповнювача, який частково заміщує цемент. Максимальні значення міцності (4,7 МПа на згин і 13,6 МПа на стиск) зафіксовано при оптимальному коефіцієнті розсуву частинок цементу $\lambda_{opt} = 1,7$. Така ж закономірність простежується і на 90-ту добу, з показниками 6,1 МПа та 27,2 МПа відповідно. За коефіцієнта $\lambda_{opt} = 2,5$ міцність була трохи нижчою, що пояснюється переважанням силікатної фази в продукті гідратації цементу. Результати дали змогу встановити математичну модель співвідношення цементу та наповнювача для досягнення оптимальних характеристик мікроструктури.

5. Найвищу міцність композиційного матеріалу на основі поліметилметакрилату (90 МПа при стиску і 40 МПа при згині) продемонстрували зразки із найменшою фракцією піску 0,14 мм при його кількості 150 масових частин. Найвищу міцність (114 МПа при стиску та 28,5 МПа при вигині) показав зразок з наповненням 100 мас. част. пилюватої фракції відходів подрібнення бетону. Збільшення як розміру частинок так і їх кількості призводить до зменшення міцності наповненої композиції, що пояснюється порушенням оптимального співвідношення позитивно та негативно заряджених поверхонь частинок наповнювача і полімеру.

6. За рахунок використання наповнювачів, які є подрібненими відходами залізобетонних шпал, було досягнуто регулювання структури цементно-піщаних зразків, що проявилось у зміні співвідношення загальної, відкритої та закритої пористостей, а також показника середнього розміру відкритих капілярних пор.

Експериментально встановлено, що заміна 40 % піску або 10 % цементу призводить до зміщення пористості зразків в область мікропор, про що свідчить зменшення вдвічі показника середнього розміру, зменшення обсягу загальних пор і збільшення кількості закритих пор, а також майже втричі зменшення відкритої пористості порівняно із закритою. У цих умовах вільне переміщення води зовні бетонних конструкцій усередину бетону утруднене, що підвищує його довговічність. Зафіксовано зміни пористості з часом, що підтверджує гіпотезу про ефект самоущільнення завдяки вивільненню вологи з пір рециклінгового заповнювача.

7. Дослідження методом оптичної мікроскопії показали, що початкові зразки рециклінгового заповнювача мали залишки старого цементно-піщаного розчину по всіх фракціях, на відміну від чистої шорсткої поверхні природного щебню. Механічне очищення в барабанному млині призвело до формування більш округлої форми частинок зі згладженою поверхнею, що свідчить про ефективне видалення залишків старого розчину. Обробка силікатом натрію дала змогу створити однорідний і зміцнений поверхневий шар, який утримує залишки старого розчину. Натомість звичайне подрібнення без додаткової обробки виявилось неефективним для повного очищення заповнювачів. Отримані результати підтвердили доцільність використання запропонованої технології обробки рециклінгового заповнювача, що має важливе значення для підвищення якості та довговічності бетонних матеріалів.

8. Дослідження мікроструктури за допомогою ІЧ-спектроскопії показує, що тип обробки не впливає на кількість портландиту та еtringіту в гідратованому цементі. Однак обробка перероблених заповнювачів змінює взаємодію в гелевій фазі продуктів гідратації цементу. У бетоні з заповнювачами, обробленими силікатом натрію, більше алюмінатних компонентів. Крім того, спостерігається зсув смуг, що відносяться до валентності Si-O, до вищих хвильових чисел (від 995 см^{-1} до 1088 см^{-1}), що можна пояснити утворенням гелю C-S-H з нижчим співвідношенням кальцій/кремній. Отже, це може призвести до вищої міцності бетону в більш пізньому віці, що підтверджено відносним збільшенням міцності.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1 Застосування розроблених матеріалів для ремонту шляхопроводу

Розроблена полімер-наповнена суміш з оптимальною кількістю дрібної фракції відходів бетону була застосована для ремонту пошкоджених опор моста. Технологія ремонту була розроблена з урахуванням вимог МР В.2.3-37641918-888 [157] і Р В.2.3-37641918-934 [158]. Фото ділянок до проведення ремонтних робіт наведено на рис. 5.1. У жовтні 2024 р. було проведено впровадження нових матеріалів з ремонту об'єктів інфраструктури залізничного транспорту.



Рис. 5.1. Фото частин опори мосту до ремонту

Розроблений за п. 3.3 матеріал було використано для ремонту пошкодженої ділянки опори залізобетонного залізничного шляхопроводу, який розташований на 2 км ПК8 ділянки Основа-Харків-Пас (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Загальний вигляд шляхопроводу

До складу наповненого полімерного композиційного матеріалу входить мономер метилметакрилат як зв'язуюче та дрібна фракція бетонних відходів з розмірами частинок менше 0,14 мм після подрібнення залізничних шпал як наповнювач. Витрата компонентів в масових частинах становила 1:1:1 (рідкий мономер : порошковий каталізатор : наповнювач). Як ґрунтовий розчин використовувалася двокомпонентна суміш рідкого мономеру метилметакрилату та порошкового каталізатора. Роботи проводилися при температурі повітря +15 °С. Було виконано такий комплекс робіт із ремонту пошкоджених частин мосту: очищення і підготовка поверхні; приготування і нанесення ґрунтового розчину; приготування і нанесення ремонтного полімерного розчину; штикування і притискання спеціальним інструментом; контроль якості неруйнівними методами. Загальна площа відремонтованих ділянок мосту становить 3,3 м² (рис. 5.3).





Рис. 5.3. Фото частин опори мосту після ремонту

Контроль якості виконаних робіт проводили з використанням електронного склерометра Онікс-2.5 (рис. 5.4). Значення показників для усіх відремонтованих тріщин знаходилися в межах 10,9...12,2 МПа, що можна вважати еквівалентним класу міцності важкого бетону С8/10.



Рис. 5.4. Контроль якості виконаних робіт

У результаті роботи комісії із впровадження результатів були зроблені висновки, що розроблений матеріал придатний для використання для ремонтно-відновлювальних робіт об'єктів інфраструктури залізничного транспорту, сприяє подовженню міжремонтних термінів та забезпечує стійкість і довговічність штучних споруд (Додаток Д).

У квітні 2025 року було проведено повторне обстеження відремонтованих ділянок. У результаті огляду встановлено, що атмосферні фактори осінньо-зимового періоду не вплинули на вигляд відремонтованих ділянок – не спостерігалось тріщин, відколів та інших порушень суцільності (рис. 5.5), що свідчить про ефективність розроблених матеріалів для ремонту об'єктів інфраструктури залізничного транспорту.



Рис. 5.5. Фото частин опори мосту після осінньо-зимового періоду

У лютому 2026 року у рамках нагляду за відремонтованими ділянками було проведено додаткове обстеження шляхопроводу. У результаті огляду встановлено, що експлуатація протягом 1,5 року не вплинули на стан відремонтованих ділянок. Як і під час попереднього огляду не спостерігалось тріщин, відколів та інших порушень суцільності (рис. 5.6), що свідчить про ефективність розроблених матеріалів для ремонту об'єктів інфраструктури залізничного транспорту.



Рис. 5.6. Фото частин опори мосту після 1,5-річної експлуатації

5.2. Розрахунок зменшення вуглецевого сліду матеріалів на рециклінгових заповнювачах

Сталий розвиток вимагає інтегрованого підходу, що поєднує виробництво і споживання, сприяючи переходу до економіки замкнутого циклу. Створення довговічної продукції, придатної для вторинної переробки і повторного використання, а також мінімізація використання енергії та матеріалів зменшують вплив на навколишнє середовище, приносячи економічні вигоди і покращуючи суспільне благополуччя. Згідно з [75], існують п'ять основних факторів, які суттєво впливають на навколишнє середовище. Потенціал глобального потепління визначає вплив викидів парникових газів, таких як CO_2 , N_2O , CH_4 та ін., на зміни клімату. Ці викиди виникають під час видобутку сировини, використання викопного палива та процесів виробництва бетону. Потенціал підкислення характеризує викиди SO_2 протягом життєвого циклу матеріалу, які можуть спричинити кислотні дощі і підкислення природних екосистем. Евтрофікація визначає збагачення води поживними речовинами, що спричиняє ріст водоростей і рослин, виснаження кисню та порушення екосистем. Вичерпання абіотичних ресурсів аналізує ступінь виснаження джерел енергії, таких як викопне паливо та мінеральні сполуки. Токсичність для людини вимірює потенційні токсичні речовини, які викидаються в атмосферу протягом терміну експлуатації бетону і можуть негативно впливати на здоров'я людини. Як показали дослідження [75], методи обробки поверхні рециклінгового заповнювача призвели до мінімального впливу на категорії вичерпання ресурсів (4,6%) і глобальне потепління (1,5%), але значно збільшили відсоток в категоріях впливу на підкислення (22%), евтрофікації (18,6%) і токсичність (8,8%).

Вуглецевий слід розроблених матеріалів було визначено з урахуванням того, що відстань від природних піщаних та щебневих кар'єрів становила 200 км, відстань від виробника цементу – 200 км, а відстань від місця отримання переробленого піску і щебню – 20 км. Невелика прийнята відстань для отримання перероблених заповнювачів пов'язана з тим фактом, що як демонтаж,

так і будівельні роботи зазвичай проводяться в міських районах, тобто на невеликій відстані один від одного. Розрахунок наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Методика розрахунку вуглецевого сліду

Компонент		Обчислення вуглецевого сліду (кг CO ₂ /т)	Джерело інформації
Цемент	виробництво	822,00	[75]
	транспортування	Передбачувана відстань 200 км, витрата палива приблизно 30 л/100 км у завантаженому стані, 20 л/100 км у порожньому стані, витрата 1 л дизельного палива виділяє близько 2,7 кг CO ₂ Сумарний показник = 10,00	[42]
Вода	Підготовка та постачання	0,91	[75]
Природний пісок	видобуток корисних копалин	6,60	[159]
	транспортування	Передбачувана відстань 200 км, витрата палива приблизно 30 л/100 км у завантаженому стані, 20 л/100 км у порожньому стані, витрата 1 л дизельного палива виділяє близько 2,7 кг CO ₂ Сумарний показник = 13,92	[42]
Перероблений пісок	дроблення	8,48	[159]
	транспортування	Передбачувана відстань 20 км, витрата палива приблизно 30 л/100 км у завантаженому стані, 20 л/100 км у порожньому стані, витрата 1 л дизельного палива виділяє близько 2,7 кг CO ₂ Сумарний показник = 1,30	[42]
Природний щебінь	видобуток корисних копалин	7,84	[31]
	транспортування	Передбачувана відстань 200 км, витрата палива приблизно 30 л/100 км у завантаженому стані, 20 л/100 км у порожньому стані, витрата 1 л дизельного палива виділяє близько 2,7 кг CO ₂ Сумарний показник = 13,92	[42]
Перероблений щебінь	дроблення та очищення	8,48	[159]
	транспортування	Передбачувана відстань 20 км, витрата палива приблизно 30 л/100 км у завантаженому стані, 20 л/100 км у порожньому стані, витрата 1 л дизельного палива виділяє близько 2,7 кг CO ₂ Сумарний показник = 1,30	[42]

Підсумкові значення зменшення викидів вуглецю при використанні рециклінгових заповнювачів в кількості 10 % заміщення цементу, 100 % заміщення крупного заповнювача і 50 % дрібного заповнювача наведено в табл.5.2. У розрахунках також було прийнято, що споживання води у випадку рециклінгового заповнювача буде збільшено вдвічі завдяки процесу його попередньої підготовки.

Таблиця 5.2 – Підсумкові значення розрахунку вуглецевого сліду

Компонент	Витрата природних компонентів, кг/м ³	Витрата перероблених компонентів, кг/м ³	Вуглецевий слід(кгСО ₂ /т) звичайних компонентів	Вуглецевий слід(кгСО ₂ /т) перероблених компонентів	Вуглецевий слід (кг СО ₂ / м ³ бетону на природних компонентах)	Вуглецевий слід (кг СО ₂ / м ³ бетону на перероблених компонентах)
Бетон на натуральних заповнювачах						
Цемент	450		822		369,9	
Крупний заповнювач	1250		21,76		27,2	
Дрібний заповнювач	500		20,52		10,26	
Вода	200		0,91		0,182	
Підсумок					407,54	
Бетон на рециклінгових заповнювачах						
Цемент	405	45	822	9,78		333,35
Крупний заповнювач		1250		9,79		12,24
Дрібний заповнювач	250	250	20,52	9,78		7,58
Вода	400		0,91			0,36
Підсумок						353,53

Як свідчать розрахунки, використання вказаних відсотків заміни компонентів бетону призводить до зменшення вуглецевого сліду від 407,54 кг СО₂/ м³ до 353,53 кг СО₂/ м³ бетону, або на 13 % на кожному кубічному метрі виготовленого бетону. Але якщо пасти будуть виготовлені з 100% переробленого цементу, переробленого змішаного цементу або переробленого бетонного порошку, то вони все ще можуть досягати того самого рівня міцності, що й звичайні пасти з портландцементу із застосуванням різних мінеральних або хімічних добавок, або при певній обробці заповнювачів [160, 161]. У цьому випадку викиди СО₂ від виробництва на тонну переробленого цементу

становлять лише 0,05–0,40 т CO₂ порівняно з 0,75–0,82 т CO₂ для звичайного портландцементу, що відповідає зниженню викидів CO₂ на 47–94 % залежно від застосованих технологій і методів активації. Отримані у роботі [42] значення міцності на стиск, вуглецевого сліду, ціни та економії природних ресурсів були переведені у відносні величини. Показано, що із збільшенням частки переробленого піску зменшуються вуглецевий слід, ціна та міцність на стиск, а економія природних ресурсів зростає. Слід зазначити, що якщо зниження міцності на стиск є небажаною властивістю, то зміна решти параметрів є вигідною з точки зору сталого розвитку.

5.3. Впровадження результатів дослідження в початковий процес

Результати досліджень, розроблені матеріали на основі поліфракційних відходів залізничних залізобетонних шпал з використанням як неорганічних, так і органічних в'язучих та технології ремонтно-відновлювальних робіт об'єктів залізничного транспорту знайшли своє відображення у матеріалах лекційних курсів і лабораторних робіт дисципліни «Будівельне матеріалознавство» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освіти спеціальностей G19 Будівництво та цивільна інженерія і J7 Залізничний транспорт, дисципліни «Відновлення та захист конструкцій і споруд» для здобувачів другого (магістерського) рівня освіти спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія освітньо-професійної програми «Промислове та цивільне будівництво», дисципліни «В'язучі речовини та композиційні матеріали на їх основі» для здобувачів третього (доктор філософії) рівня освіти спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія освітньо-наукової програми «Будівництво та цивільна інженерія», а також у дипломному проєктуванні (Додаток Е).

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5

1. У ході дослідження було доведено ефективність використання полімер-наповнених сумішей з додаванням дрібної фракції відходів бетону для ремонтно-відновлювальних робіт інфраструктури залізничного транспорту. Нова технологія показала високі результати міцності (10,9–12,2 МПа), відповідні класу бетону С8/10, що було підтверджено контролем якості за допомогою електронного склерометра Онікс-2.5. Повторні обстеження у квітні 2025 року та у лютому 2026 року засвідчили, що після впливу осінньо-зимових атмосферних факторів не було зафіксовано пошкоджень, таких як тріщини чи відколів, що свідчить про надійність розроблених матеріалів.

2. Розрахунок вуглецевого сліду показав, що використання рециклінгових заповнювачів зменшує вплив на навколишнє середовище, сприяючи сталому розвитку. Заміна природних компонентів бетону на перероблені дозволила знизити викиди CO₂ на 13% на кубічний метр бетону. Таким чином, використання інноваційних матеріалів не лише забезпечує довговічність конструкцій, але й зменшує екологічні ризики, сприяючи економіці замкнутого циклу.

3. Розроблені матеріали та технології використання поліфракційних відходів бетону успішно впроваджені в навчальний процес для студентів різних рівнів здобуття освіти із спеціальностей G19 Будівництво та цивільна інженерія і J7 Залізничний транспорт, сприяючи підготовці кваліфікованих фахівців у напрямку інноваційних підходів у будівництві.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість досягнення достатньої середньої густини, міцності і водонепроникності матеріалів на основі поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізобетонних залізничних шпал за рахунок покращення якості рециклінгових заповнювачів, формування оптимальної структури будівельних розчинів і бетонів, забезпечення електрогетерогенних взаємодій у композиційних полімерних матеріалах.

2. Розроблений спосіб отримання заповнювачів із залізничних шпал дозволив знизити відсоток зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форми із 16,7 % до 14,6 % для рециклінгового щебню і отримати більш кубоподібну форму з повним видаленням залишків цементно-піщаного розчину. При застосуванні такого обробленого щебню була досягнута міцність бетону при стиску 31,6 МПа на 28 добу, що становило 98% міцності контрольного бетону на природньому щебні.

3. При заміні природного піску рециклінговим було досягнута найбільша міцність зразків цементно-піщаного розчину при згині 6,1 МПа і при стиску 17,9 МПа на 28 добу при використанні оптимального коефіцієнта розсунення частинок піску $\mu_{\text{опт}} = 3,0$. При заміні цементу пилюватою фракцією подрібнених залізобетонних шпал було досягнута найбільша міцність зразків цементно-піщаного розчину при згині 4,7 МПа і при стиску 6,1 МПа на 28 добу при використанні оптимального коефіцієнта розсунення частинок цементу $\lambda_{\text{опт}} = 1,7$. Ці коефіцієнти відповідають найбільш щільному розташуванню частинок рециклінгового наповнювача в прошарку між зернами піску та зернами цементу.

4. На 90 і 270 добу твердіння було досягнуто підвищення міцності цементно-піщаних зразків із заміною природного піску рециклінговим до 7,5 МПа і 11,2 МПа при згині і до 29,0 МПа і 43,0 МПа при стиску, відповідно. При заміні цементу пилюватою рециклінговою фракцією було досягнуто

підвищення міцності зразків до 6,1 МПа і 6,6 МПа при згині і до 27,2 МПа і 32,32 МПа при стиску, відповідно на 90 і 270 добу твердіння. Досягнуті величини були в середньому на 10% більші, ніж міцність контрольних зразків у ті самі терміни твердіння. Це свідчить про продовження процесів структуроутворення в цементно-піщаних зразках і утворення більш щільної структури. У цілому, підвищення міцності порівняно з контрольним спостерігалось для всіх зразків із заміною піску або цементу рециклінговими наповнювачами і становило від 1,17 до 3,25 разів.

5. Ущільнення структури було доведено експериментально при визначенні пористості зразків за кінетикою їх водопоглинання. Встановлено, що співвідношення відкритої та закритої пористості для ненаповненого зразка становить 2,95, а для наповнених зразків це співвідношення коливається в межах 2,1...0,98, що свідчить про збільшення кількості закритих пор порівняно з кількістю відкритих. Додавання наповнювачів сильно впливає на показник середнього розміру відкритих капілярних пір, найменше значення якого демонструють зразки з оптимальними коефіцієнтами розсунення зерен. На 270 добу цей показник зменшився у 2-3 рази, що підтверджує теоретичне припущення стосовно формування структури матеріалів з використанням рециклінгових заповнювачів.

6. При використанні пилюватої фракції подрібнених залізничних шпал як наповнювача в полімерних композиційних матеріалах на основі поліметилметакрилату встановлено, що найбільшу міцність як при згині, так і при стиску показують зразки, що містять 100 масових частин дрібного наповнювача – 33,9 МПа і 105,5 МПа, відповідно, що порівняно з міцністю чистого полімеру (105,4 МПа). Це підтверджує теоретичну передумову створення щільної міцної структури полімернаповнених композиційних матеріалів за рахунок дотримання певного співвідношення позитивно та негативно заряджених поверхонь в системі.

7. Дослідження методом оптичної мікроскопії показали, що механічне очищення в барабанному млині призвело до формування більш округлої форми

частинок зі згладженою поверхнею, що свідчить про ефективне видалення залишків старого розчину розробленим в роботі методом. Обробка силікатом натрію дала змогу створити однорідний і зміцнений поверхневий шар із залишків старого розчину. Отримані результати підтвердили доцільність використання запропонованої технології обробки рециклінгового заповнювача, що має важливе значення для підвищення якості бетонних матеріалів.

8. Дослідження мікроструктури за допомогою ІЧ-спектроскопії показує, що тип обробки не впливає на кількість портландиту та еtringіту в гідратованому цементі. Однак, метод обробки заповнювачів суттєво впливає на формування гелевої фази гідратованих силікатів та алюмінатів кальцію. У бетоні з заповнювачами, обробленими силікатом натрію, більше алюмінатних компонентів. Крім того, спостерігається утворення гелю C-S-H з нижчим співвідношенням кальцій/кремній. Отже, це призводить до більшої міцності матеріалів з використанням рециклінгових заповнювачів у більш пізньому віці, що підтверджено відносним збільшенням міцності зразків цементно-піщаного розчину.

9. У ході робіт із впровадження результатів дослідження було доведено ефективність використання полімер-наповнених сумішей з додаванням пилюватої фракції відходів бетону для ремонту опор шляхопроводу. Відремонтовані ділянки показали високі результати міцності (10,9–12,2 МПа), відповідні класу бетону C8/10, що було підтверджено контролем якості за допомогою електронного склерометра Онікс-2.5. Розрахунок вуглецевого сліду показав, що заміна природних компонентів бетону на перероблені дозволила знизити викиди CO₂ на 13% на кубічний метр бетону. Таким чином, використання розроблених матеріалів зменшує екологічні ризики і сприятиме зменшенню площ для накопичення будівельних відходів. Розроблені матеріали та технології використання поліфракційних відходів бетону залізничних шпал впроваджені в навчальний процес для студентів різних рівнів здобуття освіти із спеціальностей G19 Будівництво та цивільна інженерія і J7 Залізничний транспорт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р. Дата оновлення: 17.09.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 15.11.2023).
2. Ugnenko E., Shevchenko A., Shevchenko O. Stages of reconstruction and renewal of Ukraine's infrastructure in the war and post-war period, taking into account experience and security. *Environmental Engineering*. 2023. 848. P. 1-9. <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.848>
3. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6 (018). С. 111-117. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013>
4. Anike E. E., Saidani M., Ganjian E., Tyrer M., Olubanwo A. O. The potency of recycled aggregate in new concrete: a review. *Construction Innovation*. 2019. Vol. 19, No. 4. P. 594-613. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2018-0056>
5. Pérez S.P.M., Vecerra J.M.P., Chumacero J.M.G., Diaz E.S., Ortiz E.A.D., Laffite E.D.R., Osorio J.L.Q., Mendoza Y.M.B. Evaluation of the physical and mechanical properties of concrete with the incorporation of recycled concrete aggregate. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024. Vol. 9, No 204. P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01517-2>
6. Автомонова В. О., Власенко В. В., Зайцева К. О., Кривільова С. П. Рециклінг відходів виробництва та брухту бетонних конструкцій як центральна ланка концепції екологізації заводів ЗБК. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Хімія, хімічна технологія та екологія*. Харків, 2017. № 48 (1269). С. 16-23.
7. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Рихліцька О. В. Низьковуглецеві бетони з використанням вторинних заповнювачів: монографія. Львів: Простір-М, 2025. 172 с.

8. Троян В. В., Попруга П. В., Кіндрась Б. П. Високоміцні бетони на основі високорухомих товарних бетонних сумішей. *Будівельні матеріали та виробн.* 2014. № 2. С. 12-13.

9. Ma Zh., Zhang Zh., Hu R., Liu X., Shen J., Wang Ch. Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023. P. 1-19 <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>

10. Katz A., Kulisch D. Efficiency of Using Recycled Fine Aggregate for a New Concrete. *Sustainable Built Environment (SBE): Regional Conference (Zurich, June 15-17, 2016)*. Zurich, 2016. P. 404-407. Available from: http://dx.doi.org/10.3218/3774-6_65

11. Копилов М. Перемолоти шпальні гори. *Магістраль*. 2016. 13-19 січ. (№ 1 (2091)). URL: <https://web.archive.org/web/20160711195829/http://magistral-uz.com.ua/articles/peremoloti-shpalni-gori.html> (дата звернення: 15.11.2023).

12. Yang S., Lim Y. Mechanical strength and drying shrinkage properties of RCA concretes produced from old railway concrete sleepers using by a modified EMV method. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 185. P. 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.074>

13. Molla F. A. Concrete with Recycled Fine Aggregate (RFA) and Manufactured Sand (MS): Compressive Strength and Cost. Preprint Research Square. 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1407923/v1>

14. Salgado F., Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 52. 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>

15. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу рециклінгових заповнювачів, отриманих із відходів бетону. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків, 2023. Вип. 206. С. 121-128. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>

16. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rykhlytska O. The effect of pozzolanic additives on the performance of the cementitious matrix of recycled aggregate

- concrete. *Chemistry and Chemical Technology*. 2024. Vol. 18, No 4. P. 592-600. <https://doi.org/10.23939/CHCHT18.04.592>
17. Ahmed A. A. A. Nanodispersed Additive for Composite Binders Based on Technogenic Raw Materials of Iraq. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 945. 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012046>
18. Khatab M. A. T., Altmami M. Correlation between different properties of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2146, Is.1. 020005. <https://doi.org/10.1063/1.5123692>
19. Salau M. A., Ikponmwosa E. E., Adeyemo A. O. Shrinkage Deformation of Concrete Containing Recycled Coarse Aggregate. *British Journal of Applied Science & Technology*. 2014. Vol. 4, No 12. P. 1791-1807. URL: https://www.researchgate.net/publication/341831685_Shrinkage_Deformation_of_Concrete_Containing_Recycled_Coarse_Aggregate
20. Chaabane L. A., Soualhi H., Fellah I., Khalfi Y., and Bouayed N. S. Physical and mechanical behaviour of recycled concrete under destructive and non-destructive testing. *Budownictwo i Architektura*. 2024. Vol. 23, No. 2. P. 37–57. <http://dx.doi.org/10.35784/bud-arch.5840>
21. Brencich A., Dubesti A., Ali Akbari Hamed F. Structural Concrete from 100% Recycled Aggregates. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. P. 11709. <https://doi.org/10.3390/app142411709>
22. Singh S., Singh S.K., Mahgoub M., Mir S.A., Kanga S., Kumar S., Kumar P., Meraj G. Evaluating Recycled Concrete Aggregate and Sand for Sustainable Construction Performance and Environmental Benefits. *CivilEng*. 2024. Vol. 5. P. 461–481. <https://doi.org/10.3390/civileng5020023>
23. Banyai K., Czoboly O., Menyhart K., Orban Z. Influence of Aggregate Composition on the Properties of Recycled Concrete and Improving Performance Using Special Additives. *Materials*. 2025. Vol. 18. P. 1108. <https://doi.org/10.3390/ma18051108>

24. Lu L. Optimal Replacement Ratio of Recycled Concrete Aggregate Balancing Mechanical Performance with Sustainability: A Review. *Buildings*. 2024. Vol. 14. P. 2204. <https://doi.org/10.3390/buildings14072204>

25. Tamboli S., Imam A., Mishra U., Kumar K., Mishra S., Ray M.R., Kumar P., Yadav N. Research on Fresh and Hardened Concrete Residences with Partial Replacement of Recycled Coarse Aggregates Obtained from Demolition and Construction Waste. *International Journal of Experimental Research and Review*. 2024. Vol. 42. P. 343-350. DOI: <https://doi.org/10.52756/ijerr.2024.v42.030>

26. Khatib J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35, Is. 4. P. 763-769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>

27. Ravathi M. Ch., Chithra R. Strength optimization of recycled fine aggregate self-curing concrete using Taguchi design. *Structural Concrete*. 2022. Vol. 23, Is. 5. P. 3062-3072. <https://doi.org/10.1002/suco.202100339>

28. Rao M. C. Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*. 2021. Vol. 22, Is. S1. P. E105-E120. <https://doi.org/10.1002/suco.202000103>

29. Palaniappan P., Velu G., Somasundaram Th., Murugesan V. A comparative study of sustainable mix incorporating recycled aggregates. *Revista Matéria*. 2024. Vol. 29, No. 3. Article e20240284. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0284>

30. Смирнов А.С., Савицький М.В., Нікіфорова Т.Д., Бордун М.В., Титюк А.А., Федін В.А. Особливості розрахунку складу важкого бетону з використання крупного заповнювача рециклінгового походження. *Науковий вісник будівництва*. 2025. Вип. 113. С.166-175 <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.20>

31. Смирнов А. С. Бетони з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження : дис... докт. філос. : 192 / Навчально- науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій. Дніпро, 2024. 182 с.

32. Rocha S., Sousa-Coutinho J. Construction and demolition waste as partial cement replacement. *Advances in Cement Research*. 2019. Vol. 31, Is. 9. P. 411-422. <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00132>

33. Kim J., Nciri N., Sicakova A., Kim N. Characteristics of waste concrete powders from multi-recycled coarse aggregate concrete and their effects as cement replacements. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 398. P. 132525. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132525>

34. Raini I., Mesrar L., Touache A., Raini I., Jabrane R. Performance evaluation of cement mortar containing construction and demolition waste as supplementary cement materials. *Ceramics – Silikáty*. 2022. Vol. 66, No. 4. P. 407-418. <https://doi.org/10.13168/cs.2022.0036>

35. Akgul Ü. M., Akgul M. Effect of curing conditions on cement based self-compacting mortar produced with mortar waste aggregate. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 16. Article e36423. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36423>

36. Sharma S., Vyas A. K. A study on use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 93. P. 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.115>

37. Wu E., Ma X., Fang C., Li N., Jia L., Jiang P., Wang W. Strength Performance and Microscopic Mechanism of Cement Mortar Incorporating Fine Recycled Concrete Aggregate and Natural Sand. SSRN: веб-сайт. URL: <https://ssrn.com/abstract=4898706> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4898706> (дата звращения: 15.11.2024).

38. Kruger P., Serbai P., Chinelatto A. S. A., Pereira E. Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. *Cerâmica*. 2021. Vol. 67, No. 383. P. 269–276. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>

39. Panghal H., Kumar A. Sustainable Concrete: Exploring Fresh, Mechanical, Durability, and Microstructural Properties with Recycled Fine Aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2024. Vol. 68, No. 2. P. 1-15. <https://doi.org/10.3311/PPci.22711>

40. Liu F., Zhao L., Yang B. An Experimental Study on the Workability of Recycled Fine Aggregate Concrete Cement Mortar. *International Journal of Simulation: Systems, Science Technology*. 2016. Vol. 17. P. 201-204. <https://doi.org/10.5013/ijssst.a.17.49.20>
41. Wang Y., Lu Z., Wang D., Tan Q., Wu W., Zhu L. Influence of Recycled Cement Paste Powder on Early-Age Plastic Shrinkage and Cracking of Cement-Based Materials. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P.10661. <https://doi.org/10.3390/su151310661>
42. Kepniak M., Łukowski P. Multicriteria Analysis of Cement Mortar with Recycled Sand. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. P. 1773. <https://doi.org/10.3390/su16051773>
43. Frías M., Monasterio M., Moreno-Juez J. Physical and Mechanical Behavior of New Ternary and Hybrid Eco-Cements Made from Construction and Demolition Waste. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3093. <https://doi.org/10.3390/ma16083093>
44. Bian Y., Qiu X., Zhao J., Li Z., Ouyang J. Influence of Recycled Concrete Fine Powder on Durability of Cement Mortar. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 45-58. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.029299>
45. Рихліцька О. В. Бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону : дис... докт. філос. : 192 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2023. 176 с.
46. Чистяков А. О. Бетони основи дорожнього одягу з використанням рециклінгових заповнювачів : дис... докт. філос. : 192 / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2024. 164 с.
47. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 86 с.
48. Саєнко Н. В., Биков Р. О., Демідов Д. В., Скрипинець А. В., Обіженко Т. М. Вивчення впливу силікатних наповнювачів на структурно-реологічні властивості акрилових дисперсій. *Питання хімії та хімічної технології*. 2023. № 2. С. 137-144. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-147-2-137-144>

49. Roshanaei H., Khodkar F., Alimardani M. Contribution of filler–filler interaction and filler aspect ratio in rubber reinforcement by silica and mica. *Iranian Polymer Journal*. 2020. Vol. 29. P. 901–909. <https://doi.org/10.1007/s13726-020-00850-4>

50. Rajhi A. A. Mechanical Characterization of Hybrid Nano-Filled Glass/Epoxy Composites. *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 48-52. <https://doi.org/10.3390/polym14224852>

51. Ikromova M. S. Deformation of particulates filled epoxy polymers. *ISJ Theoretical and Applied Science*. 2023. Vol. 120, Is. 04. P. 282-284. <https://doi.org/10.15863/TAS.2023.04.120.54>

52. Candau N., Oguz O., Peuvrel-Disdier E., Bouvard J.-L., Pradille C., Billon N. Strain and filler ratio transitions from chains network to filler network damage in EPDM during single and cyclic loadings. *Polymer*. 2020. Vol. 197. P. 122435. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122435>

53. Quadflieg T., Srivastava V. K, Gries T., Bhatt S. Mechanical performance of hybrid graphene nanoplates, fly-Ash, cement, silica, and sand particles filled cross-ply carbon fibre woven fabric reinforced epoxy polymer composites beam and column. *Journal of Materials Science Research*. 2023. Vol. 12, № 1. P. 22-35. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v12n1p22>

54. Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Вплив виду та кількості наповнювача на деформативні властивості акрилового композиційного матеріалу для ремонту бетонних конструкцій. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 74. С.122-128. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-74-122-128>

55. Чернявська Т. В. Метод підвищення ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту завдяки використанню модифікованих захисних антикорозійних покриттів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. Т. 1, № 22. С. 74-83. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2020.1.22.074-083>

56. Мартинюк Г., Закодонський В., Скорейко Н., Аксіментьєва О. Вплив природи наповнювача на хімічну стійкість і мікротвердість плівок наповнених

епоксидних композитів. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2015. Т. 16, № 3. С. 528-533. <https://doi.org/10.15330/pcss.16.3.528-533>

57. Сапронов О. О., Нігалатій В. Д., Клевцов К. М., Смирнов І. В., Долгов М. А. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 2 (9). С. 229-237.

58. Chang Z., Wang Y., Zhang Z., Gao K., Hou G., Shen J., Zhang L., Liu J. Creep behavior of polymer nanocomposites: Insights from molecular dynamics simulation. *Polymer*. 2021. Vol. 228. P. 123895. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123895>

59. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Науковий вісник будівництва*. 2024. Вип. 111. С. 72-79. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>

60. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Федоренко О. В., Гаркуша І. Ю. Застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. Вип. 25. С. 74-86.

61. Trykoz L., Kamchatnaya S., Pustovoitova O., Atynian A., Saiapin O. Effective Waterproofing of Railway Culvert Pipes. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2019. Vol. 14, No. 4. P. 473-483. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.453>

62. Abokifa M.& Moustafa M. A. Experimental behavior of poly methyl methacrylate polymer concrete for bridge deck bulb tee girders longitudinal field joints. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 270. Article 121840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121840>

63. Czarnecki L. Polymer-Concrete Composites for the repair of concrete structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 199. Article 01006. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819901006>

64. Sakr M. R., Bassuoni M. T. Silane and methyl-methacrylate based nanocomposites as coatings for concrete exposed to salt solutions and cyclic

environments. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. Article 103841. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103841>

65. Su F., He T., He Z., Yu Q., Wang H. Mechanism of Acrylate Emulsion-Modified Cement-Based Materials. *Molecules*. 2024. Vol. 29. Article 1260. <https://doi.org/10.3390/molecules29061260>

66. Naseem Z., Shamsaei E., Sagoe-Crentsil K., Duan W. Microstructural and polymer film interaction mechanisms: Insights of GO-reinforced polymer-modified cement composites. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. Article 107962. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107962>

67. Li S., Mao Z., Deng M. Preparation of Butyl Acrylate Copolymer Emulsion and Its Regulation Effect on Cement Hydration. *Materials*. 2023. Vol. 16. Article 2887. <https://doi.org/10.3390/ma16072887>

68. Shi C., Bu K., Ma C. Effects of styrene–acrylic emulsion on bond performance and interface microstructure of repair mortar of ternary cementitious system. *Journal of Applied Polymer Science*. 2024. Vol. 141, No. 16. Article 55263. <https://doi.org/10.1002/app.55263>

69. Караваєв Т. А., Осика В. А., Комаха В. О., Калуга Н. В., Ткачук В. В., Сікорський О. О. Процеси хімічної взаємодії в системі мінеральний наповнювач–модифікатор–плівкоутворювач. *Питання хімії та хімічної технології*. 2019. Вип. 6. С. 83-91. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2019-127-6-83-91>

70. Ma Z., Hu R., Yao P., Wang C. Utilizing heat-mechanical synergistic treatment for separating concrete waste into high-quality recycled aggregate, active recycled powder and new concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 68. P. 106161. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106161>

71. Singh K. K., Singh P. N. Mechanical behavior of concrete containing recycled aggregates. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 08, No. 01. P. 1030–1038. <https://doi.org/10.30574/ijsra.2023.8.1.0129>

72. Su Y., Yao Y., Wang Y., Zhao X., Li L. Zhang J. Modification of Recycled Concrete Aggregate and Its Use in Concrete: An Overview of Research Progress. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 7144. <https://doi.org/10.3390/ma16227144>

73. Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K., Bołtryk M., Jiménez J. R., Fernández J. M. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12. P. 0367. <https://doi.org/10.3390/ma12030367>
74. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaides D., Petrou M. F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 2871. <https://doi.org/10.3390/ma15082871>
75. Kasulanati M. L., Pancharathi R. K. Optimizing multi-recycled concrete for sustainability: Aggregate gradation, surface treatment methods and life cycle impact assessment. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 449. P. 138510. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138510>
76. Kim J., Ubysz A. Thermal activation of multi-recycled concrete powder as supplementary cementitious material for repeated and waste-free recycling. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 98. P. 111169. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111169>
77. Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N., Ménard Y. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*. 2014. Vol. 126. P. 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.009>
78. Yunusa M., Zhang X., Cui P., Tian X. Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 16. P. 57-92. <https://doi.org/10.3390/ma15165792>
79. Chauhan B. L., Singh G. J. Experimental and Analytical Performance of Recycled Aggregates Produced by Customized Chemical-Mechanical Treatment. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2023. Vol. 21. P. 903-919. <https://doi.org/10.3151/jact.21.903>
80. Mardani A., Bui N. K., Noguchi T. Hybrid Environmentally Friendly Method for RCA Concrete Quality Improvement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024. Vol. 18. P. 29. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00664-1>

81. Wu J., Ding Y., Xu P., Zhang M., Guo M., Guo S. Effects of carbonated recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete and the micro-properties of the interfacial transition zone. *Ceramics-Silikáty*. 2022. Vol. 66, No. 1. P. 113-127. <https://doi.org/10.13168/cs.2022.0006>

82. Liu K., Xu W., Sun D., Tang J., Wang A., Chen D. Carbonation of recycled aggregate and its effect on properties of recycled aggregate concrete: A review. *Mater. Express*. 2021. Vol. 11. P. 1439–1452. <https://doi.org/10.1166/mex.2021.2045>

83. Qiu J., Sheng Tng D.Q., Yang E.-H. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 57. P. 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.085>

84. Liu Z., Chin C.S., Xia J. Improving recycled coarse aggregate (RCA) and recycled coarse aggregate concrete (RCAC) by biological denitrification phenomenon. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 301. P. 124338. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124338>

85. Ismail S., Ramli M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 726-739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.058>

86. Li P., Gan W., Yao G., Huang Q., Zhao R. Effect of Permeable Crystalline Materials on the Mechanical and Porosity Property of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 13. P. 4596. <https://doi.org/10.3390/ma16134596>

87. Pandurangan K., Dayanithy A., Om Prakash S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 120. P. 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.093>

88. Saravanakumar P., Abhiram K., Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and*

- Building Materials*. 2016. Vol. 111. P. 611-617.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>
89. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112, part 1. P. 466-472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
90. Zajac M., Skibsted J., Skocek J., Durdzinski P., Bullerjahn F., Haha M.B. Phase assemblage and microstructure of cement paste subjected to enforced, wet carbonation. *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 130. P. 105990. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105990>
91. Zhan B. J., Xuan D. X., Zeng W., Poon C.S. Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. P. 103360 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103360>
92. Fang X., Zhan B., Poon C.S. Enhancement of recycled aggregates and concrete by combined treatment of spraying Ca²⁺ rich wastewater and flow-through carbonation. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 277. P. 122202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122202>
93. Fang X., Xuan D., Zhan B., Li W., Poon C.S. Characterization and optimization of a two-step carbonation process for valorization of recycled cement paste fine powder. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 278. P. 122343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122343>
94. Liu S., Shen P., Xuan D., Li L., Sojobi A., Zhan B., Poon C.S. A comparison of liquid-solid and gas-solid accelerated carbonation for enhancement of recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. P. 103988. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103988>
95. Zhan B. J., Xuan D. X., Poon C.S., Scrivener K. L. Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared with carbonated modeled recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 136. P. 106175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106175>

96. Sánchez-Roldán Z., Valverde-Palacios I., Valverde-Espinosa I., Martín-Morales M. Microstructural analysis of concretes manufactured with recycled coarse aggregates pre-soaked using different methods. *Materiales de Construcción*. 2020. Vol. 70, Is. 339. e228. <https://doi.org/10.3989/mc.2020.16919>
97. Xu P., Yang H., Hang D., Ding Y., Yuhao C. The effects of polyaluminium chloride (PAC) slag on the properties of recycled concrete. *Ceramics-Silikáty*. 2022. Vol. 66, No. 4. P. 419-427. <https://doi.org/10.13168/cs.2022.0037>
98. Petkova V., Stoyanov V., Kostova B., Mihaylova K. Effects of zeolite incorporation and inert fillers on the curing of cement mortars. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024. Vol. 59, No. 2. P. 313-322. <https://doi.org/10.59957/jctm.v59.i2.2024.9>
99. Zhang P., Sun X., Wang F., Wang J. Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Polymers*. 2023. Vol. 15. P. 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>
100. Lyu S., Xiao J., Singh A., Ye T. The influence of recycled aggregate on the properties of geopolymeric recycled concrete: A comprehensive review. *Journal of Asian Concrete Federation*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. 33-49. <http://dx.doi.org/10.18702/acf.2023.9.2.33>
101. Olofinnade O. M., Osoata O. P. Performance assessment of mechanical properties of green normal strength concrete produced with metakaolin-cement coated recycled concrete aggregate for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 407. 133508 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133508>
102. Shi C., Wu Z., Cao Z., Ling T.C., Zheng J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 86. P. 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013>
103. Zhang H., Ji T., Liu H., Su S. Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulphoaluminate cement and basalt powder. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 192. P. 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.160>

104. Nóbrega É., Capuzzo V. Properties of Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate Treated with Portland Cement, Metakaolin and Nanosilica. SSRN Electronic Journal : веб-сайт. URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4129901> (дата звернення: 15.11.2023)

105. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. P. 118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>

106. Akono A.-T., Zhan M., Chen J., Shah S. P. Nanostructure of calcium-silicate-hydrates in fine recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. P. 103827. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103827>

107. Sanish K. B., Neithalath N., Santhanam M. Monitoring the evolution of material structure in cement pastes and concretes using electrical property measurements. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49. P. 288-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.038>

108. Buettner N., Iyacu G., Akono A.-T. Colloidal nanosilica promotes high-density calcium-silicate-hydrates in fine recycled concrete aggregate mortar. *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 180. P. 107498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107498>

109. Bu C., Liu L., Lu X., Zhu D., Sun Y., Yu L., OuYang Y., Cao X., Wei Q. The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: A Review. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 1110. <https://doi.org/10.3390/ma15031110>

110. Jagan S., Neelakantan T. R., Kumar P. S. Mechanical properties of recycled aggregate concrete surface treated by variation in mixing approaches. *Revista de La Construcción*. 2021. Vol. 20, No. 2. P. 236–248. <https://doi.org/10.7764/rdlc.20.2.236>

111. Kumar A., Singh G.J., Chauhan B.L. Strength and durability performance of acid-mechanically treated recycled aggregate concrete with metakaolin, lime powder, and A-fine. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 433. P. 136615. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136615>

112. Luo J., Huang R., Wang J., Zhang Y. Carbon Sequestration by Preparing Recycled Cement, Recycled Aggregates, and Recycled Concrete from Construction and Demolition (C&D) Wastes. *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 5020. <https://doi.org/10.3390/ma17205020>

113. Utsha T.D., Reza I., Zaman N., Rabbani Md. L. Enhancing Recycled Concrete Performance by Using Chemical Activators. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. 2024. Vol. 3, Is. 3. P. 19-30. <https://doi.org/10.54536/ajise.v3i3.2497>

114. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [Чинний від 2011-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України. 2011. 46 с.

115. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держкоммістобудування України. 1996. 13 с.

116. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України. 2010. 44 с.

117. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держкомбуд України. 1999. 16 с.

118. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держкомбуд України. 1999. 47 с.

119. Технічні умови ТУ 64-2-226-83. Пластмаси акрилові самотвердіючі. Введ. 01.01.1983. М., 1983. 12 с.

120. ДСТУ Б В 2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. [Чинний від 2010-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 15 с.

121. ДСТУ Б В 2.7-239:2010. Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань. [Чинний від 2011-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 34 с.

122. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України. 2010. 18 с.

123. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України. 2010. 43 с.

124. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України. 2009. 38 с.

125. ДСТУ Б В.2.7-29-95. Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держкоммістобудування України. 1996. 19 с.

126. ДСТУ Б В.2.7-74-98. Будівельні матеріали. Крупні заповнювачі природні, з відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держбуд України, 1999. 16 с.

127. Savva P., Ioannou S., Oikonomopoulou K., Nicolaidis D., Petrou M.F. A Mechanical Treatment Method for Recycled Aggregates and Its Effect on Recycled Aggregate-Based Concrete. *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1-18. <https://doi.org/10.3390/ma14092186>

128. Ren Q., Tao Y., Jiao D., De Schutter G., Jiang Z. Rheological properties of concrete with manufactured sand: A multi-level prediction. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. P. 104647. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104647>

129. Horgnies M., Chen J.J., Bouillon C. Overview about the use of Fourier Transform Infrared spectroscopy to study cementitious materials. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2013. Vol. 77. P. 251–262. <http://dx.doi.org/10.2495/mc130221>

130. Szemiot N., Sadowski Ł. The Design of Cement Mortar with Low Capillary Suction: Understanding the Effect of Fine Aggregate and Sodium Silicate. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 1517. <https://doi.org/10.3390/ma15041517>

131. Zhong C., Tian P., Long Y., Zhou J., Peng K., Yuan C. Effect of Composite Impregnation on Properties of Recycled Coarse Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 7. P. 1035. <https://doi.org/10.3390/buildings12071035>

132. Wang B., Yan L., Fu Q., Kasal B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation & Recycling*. 2021. Vol. 171. e105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>

133. Ali B. Effect of aqueous sodium silicate on properties of recycled aggregate mortar. *SN Applied Sciences*. 2019. Vol. 1. Article 1296. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1342-2>

134. Liu X., Xie X., Liu R., Lyu K., Zuo J., Li S., Liu L., Shah S.P. Research on the durability of nano-SiO₂ and sodium silicate co-modified recycled coarse aggregate (RCA) concrete. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 378. P. 131185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131185>

135. Плугін А., Плугін Д., Мірошніченко С., Калінін О., Крикун О. Дослідження бетону залізобетонних шпал, що зазнали пошкоджень під час експлуатації. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2021. Вип. 20. С. 56-65. <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/245342>

136. Плугін А., Крикун О., Зінченко В., Борзяк О., Дудін О. Вплив корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами на пошкодження залізобетонних шпал у колії. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2021. Вип. 196. С. 43-57. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241657>

137. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3-х т. Т. 1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / А. Н. Плугин и др. Київ : Наукова думка, 2011. 331 с.

138. Abu-Lebdeh T.M., Dampthey R., Ungureanu L.M., Petrescu F.I.T. A Ternary Model for Particle Packing Optimization. *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6. P. 113. <https://doi.org/10.3390/jcs6040113>

139. Kasulanati M. L., Pancharathi R. K. Particle Packing Approach for Proportioning Recycled Aggregate from Building Demolition Waste (BDW) – A Sustainable Solution. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 2022. Vol. 104, No. 1. P. 207–222. <https://doi.org/10.1007/s40030-022-00684-8>

140. De Oliveira T. A., Ramos J. M. L., Di Domenico P., Campos H. F. Eco-efficient concretes, optimized by Alfred's packing model, with partial cement replacement by limestone and diabase stone powder. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 2024. Vol. 17, No. 4. e17416. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000400016>

141. Спосіб визначення складу важкого бетону з мінеральним наповнювачем: пат. 71122 Україна: МПК G01N 33/38 C04B 28/00. № 2003087901; заявл. 21.08.2003; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6. 12 с.

142. ДСТУ Б В.2.7-189:2009 Будівельні матеріали. Пісок стандартний для випробувань цементів. Технічні умови. [Чинний від 2009-12-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 25 с.

143. Pango N.K., Gujar P., Nagesh A.K., Alex A., Ghosh P. Interfacial adhesion mechanism between organic polymer coating and hydrating cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. e103856. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103856>

144. Zhang C., Liu J., Zhang S., Kong X. Mechanical properties of polymer modified mortars using polymer latexes with varied glass transition temperature and surface charges. *Cement and Concrete Composites*. 2024. Vol. 150. e105573. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105573>

145. Zhang C., Kong X., Lu Z., Jansen D., Pakusch J., Wang S. Pore structure of hardened cement paste containing colloidal polymers with varied glass transition temperature and surface charges. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 95. P. 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.001>

146. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3-х т. Т. 2. Теория твердения портландцемента / А. Н. Плугин и др. Київ : Наукова думка, 2012. 224 с.

147. Jadhav P.J., Mohite N.A., Kadam V.S., More M.M., Patil V.B. Effect of concrete sludge from residual concrete on hardened cement paste properties. *European Chemical Bulletin*. 2023. Vol. 12, Is. 7. P. 748-763. <https://doi.org/10.48047/ecb/2023.12.si7.055>

148. Зінченко О. С. Оцінювання якості крупного заповнювача, отриманого з подрібнених бетонних залізничних шпал. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2024. Вип. 210. С. 43-51. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320709>

149. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Калінін О. А., Никитинський А. В. Вплив виду обробки рециклінгових заповнювачів на міцність бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. Вип. 4 (022). С. 126-133. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083>

150. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Дослідження впливу рециркульованих дрібних наповнювачів на міцнісні та структурні характеристики цементно-піщаних розчинів. *Науковий вісник будівництва*. 2025. Вип. 112. С. 258-264. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.31>

151. Vaičiukynienė D., Skipkiūnas G., Daukšys M., Sasnauskas V. Cement hydration with zeolite-based additive. *Chemija*. 2013. Vol. 24, No. 4. P. 271–278. <https://www.lmaleidykla.lt/ojs/index.php/chemija/article/view/5998/5166>

152. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Розробка полімерних наповнених композицій для ремонту штучних споруд залізничного транспорту. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : *Збірник наукових праць Українського державного університету науки і технологій*. Дніпро. 2025. Вип. 27. С. 53-61. <https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333792>

153. Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Зінченко О. С., Пустовойтова О. М., Бородін Д. Ю. Дослідження міцності і деформацій композиційних матеріалів на основі наповнених полімерів (in English). *Збірник наукових праць «Сучасне будівництво та архітектура»*. Одеса. 2024. Вип. № 8. С. 72-79. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-11-68-76>

154. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Дослідження змін пористості наповнених цементно-піщаних зразків за кінетикою їх водопоглинання. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків. 2025. Вип. 211. С. 154-166. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327345>

155. Спосіб виготовлення заповнювачів для бетону із відходів залізобетонних шпал : пат. 156792 Україна. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Пługін А.А., Панченко С.В., Пługін Д.А., Дудін О.А., Козеняшев І.А. Заявл. 08.12.2023. Заявка № u202305944. Опубл. 07.08.2024. Бюл. № 32. 7 с. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813569>

156. Trykoz L., Zinchenko O., Borodin D., Kamchatna S., Pustovoitova O. Effect of treatment types of recycled concrete aggregates on the properties of concrete. *Budownictwo i Architektura*. 2024. Vol. 23, No. 3. P. 129–137. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6318>

157. МР В.2.3-37641918-888:2017. Методичні рекомендації з відновлення залізобетонних конструкцій мостів і труб методом ін'єкційного просочування полімерними розчинами. Київ: ДП «ДерждорНДІ», 2017. 30 с.

158. Р В.2.3-37641918-934:2023. Рекомендації з улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 58 с.

159. Zhu X., Zhang Y., Liu Z., Qiao H., Ye F., Lei Z. Research on carbon emission reduction of manufactured sand concrete based on compressive strength. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 403. e133101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133101>

160. Luo J., Huang R., Wang J., Zhang Y. Carbon Sequestration by Preparing Recycled Cement, Recycled Aggregates, and Recycled Concrete from Construction and Demolition (C&D) Wastes. *Materials*. 2024. Vol. 17. e5020. <https://doi.org/10.3390/ma17205020>

161. Al-Waked Q., Bai J., Kinuthia J., Davies P. Durability and microstructural analyses of concrete produced with treated demolition waste aggregates. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 347. e128597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128597>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу рециклінгових заповнювачів, отриманих із відходів бетону. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків. 2023. Вип. 206. С. 121-128. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>
2. Трикоз Л.В., Камчатна С.М., Зінченко О.С., Пустовойтова О.М., Бородін Д.Ю. Дослідження міцності і деформацій композиційних матеріалів на основі наповнених полімерів (in English). Збірник наукових праць «Сучасне будівництво та архітектура». Одеса. 2024. Вип. № 8. С.72-79. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-72-79>
3. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Калінін О.А., Никитинський А.В. Вплив виду обробки рециклінгових заповнювачів на міцність бетону. Український журнал будівництва та архітектури. 2024. № 4 (022). С.126-133. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083>
4. Зінченко О. С. Оцінювання якості крупного заповнювача, отриманого з подрібнених бетонних залізничних шпал. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків. 2024. Вип. 210. С. 43-51. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320709>
5. Л. В. Трикоз, О. С. Зінченко, А. В. Никитинський. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. Науковий вісник будівництва. 2024. Вип. № 111. С. 135-141. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>
6. Л. В. Трикоз, О. С. Зінченко. Дослідження впливу рециркульованих дрібних наповнювачів на міцнісні та структурні характеристики цементно-піщаних розчинів. Науковий вісник будівництва. 2025. Вип. № 112. С. 258-264. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.31>
7. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Розробка полімерних наповнених композицій для ремонту штучних споруд залізничного транспорту. Мости та тунелі: теорія,

дослідження, практика : Збірник наукових праць Українського державного університету науки і технологій. Дніпро. 2025. Вип. 27. С. 53-61.

<https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333792>

8. Трикоз Л. В., Зінченко О. С. Дослідження змін пористості наповнених цементно-піщаних зразків за кінетикою їх водопоглинання. Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Харків. 2025. Вип. 211. С. 154-166. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327345>

9. Trykoz L., Zinchenko O., Borodin D., Kamchatna S., Pustovoitova O. Effect of treatment types of recycled concrete aggregates on the properties of concrete. Budownictwo i Architektura. 2024. 23(3). 129–137. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6318> (Scopus)

10. Трикоз Л. В., Зінченко О.С. Огляд сучасних методів обстеження споруд. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 19-20 жовтня 2022 р. / за заг. ред. О. Л. Тютюкіна. Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро. 2022. С. 43-46. <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/16115>

11. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Дослідження структуроутворення в системі наповнювач-полімер. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» 27-28 квітня 2023 р., ОДАБА. Одеса. 2023. С. 145-147. https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnyk_strukturoutvorennya_2023.pdf

12. Трикоз Л.В., Пустовойтова О.М., Зінченко О.С., Калінін О.А., Никитинський А.В., Романенко О.В. Вплив фракційного складу наповнювача на структуроутворення в композиційних матеріалах на основі наповнених полімерів. Зб. тез доповідей міжн. конф. «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» 23 квітня 2024 р. ОДАБА, Одеса. 2024. С.165-168. https://odaba.edu.ua/upload/files/Programa_konferentsii_Strukturoutvorennya_2024_1.pdf

13. Зінченко О.С. Використання рециклінгових заповнювачів та оцінка їх ефективності для забезпечення сталого розвитку Тези доповіді на X Міжна-

Продовження Додатка А

родній науково-практичній інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві», 15 травня 2025 року, Луцьк. С.30-32.

<https://drive.google.com/file/d/1Ulk7EZmzIXZM-rmXvOB9hkAIIHJp6UV9L/view>

14. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Композиційний матеріал для ремонту та відновлення бетонних споруд. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», присвяченої пам'яті професора В. Д. Петренка, 16-17 жовтня 2024 р. / за заг. ред. О. Л. Тютюкіна. Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро. 2024. С. 38-40.

<https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/19139>

15. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Калінін О.А., Никитинський А.В. Дослідження кінетики водопоглинання цементно-піщаних зразків з мікронаповнювачами. Тези доповідей 10-ї Міжн. науково-техн. конф. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 20-22 листопада 2024 р.: УкрДУЗТ, С.198-199.

<http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/28304/1/%D0%A2%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B7.pdf>

16. Trykoz L., Rachkovskiy A., Zinchenko O. Untersuchungen von Polymerschutzbeschichtungen für Betonkonstruktionen. Proceedings in civil engineering. 2023. 6 (6). 589-593. <https://doi.org/10.1002/cepa.2911>

17. Патент на корисну модель UA 156792. Спосіб виготовлення заповнювачів для бетону із відходів залізобетонних шпал. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Пługін А.А., Панченко С.В., Пługін Д.А., Дудін О.А., Козеняшев І.А. Заявл. 08.12.2023. Заявка № u202305944. Опубл. 07.08.2024. Бюл. № 32.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813569>

ДОДАТОК Б





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **156792** (13) **U**

(51) МПК (2024.01)

B02C 17/00**C04B 18/00**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2023 05944</p> <p>(22) Дата подання заявки: 08.12.2023</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 08.08.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 07.08.2024, Бюл.№ 32</p>	<p>(72) Винахідник(и): Трикоз Людмила Вікторівна (UA), Зінченко Олексій Сергійович (UA), Плугін Андрій Аркадійович (UA), Панченко Сергій Володимирович (UA), Плугін Дмитро Артурович (UA), Дудін Олексій Аркадійович (UA), Козеняшев Ігор Альбертович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків-50, 61050 (UA)</p> <p>(74) Представник: РЕКТОР - ПАНЧЕНКО СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ</p>
---	---

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПОВНЮВАЧІВ ДЛЯ БЕТОНУ ІЗ ВІДХОДІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ**(57) Реферат:**

Спосіб виготовлення заповнювачів для бетону із відходів залізобетонних шпал включає операції завантаження матеріалу в подрібнювач, подрібнення та вивантаження. Під час подрібнення додатково виконують операцію перевантаження, як подрібнювач використовують спочатку щокону дробарку. При цьому відстань між робочими пластинами установлюють 20 мм, а далі виконують перевантаження у барабанний млин. Подрібнення в барабанному млині здійснюють помольними тілами, які мають діаметри 50, 40 і 25 мм, узятими у масовому співвідношенні 1:(0,9-1,1):(0,9-1,1). Після вивантаження додатково виконують розсів на ситах за фракціями та промивання проточною водою.

UA 156792 U

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Дані розрахунку площі S (мм²), периметру P (мм) та ступеня окатаності C частинок крупного рециклінгового заповнювача

№	S	P	C	№	S	P	C
1	7.041	10.441	0.812	25	4.589	8.979	0.715
2	4.990	8.998	0.774	26	5.502	9.586	0.752
3	4.200	7.882	0.849	27	4.126	8.072	0.796
4	9.191	12.537	0.735	28	4.658	8.618	0.788
5	4.900	8.795	0.796	29	3.509	7.548	0.774
6	3.575	7.388	0.823	30	3.896	7.995	0.766
7	6.696	10.507	0.762	31	4.457	8.312	0.811
8	6.811	10.606	0.761	32	6.354	10.415	0.736
9	5.716	9.260	0.838	33	4.325	8.550	0.743
10	5.353	9.249	0.786	34	4.053	7.809	0.835
11	3.599	7.428	0.820	35	2.872	6.692	0.806
12	3.086	6.860	0.824	36	2.698	6.773	0.739
13	5.796	10.470	0.664	37	4.292	8.243	0.794
14	4.576	8.828	0.738	38	3.951	7.931	0.789
15	3.871	8.174	0.728	39	6.296	9.921	0.804
16	3.602	7.501	0.805	40	3.484	7.427	0.794
17	3.344	7.202	0.810	41	4.011	7.863	0.815
18	3.503	7.410	0.802	42	3.744	7.883	0.757
19	4.372	8.330	0.792	43	4.985	8.735	0.821
20	4.888	9.059	0.749	44	3.055	6.888	0.809
21	3.696	7.608	0.802	45	5.374	9.062	0.822
22	5.644	9.296	0.821	46	3.810	7.926	0.762
23	3.260	7.307	0.767	47	3.512	7.550	0.774
24	4.450	8.500	0.774	48	3.244	7.423	0.740

Продовження Додатка В

Таблиця В.2 – Вибрані дані розрахунку площі S (мм²) і діаметру d (мм)
частинок розмірами менше 0,14 мм

№	S	d	№	S	d	№	S	d
1	0,001029	0,036197	30	0,001029	0,036197	59	0,001029	0,036197
2	0,002058	0,05119	31	0,001029	0,036197	60	0,001029	0,036197
3	0,002058	0,05119	32	0,001029	0,036197	61	0,005146	0,080946
4	0,005146	0,080946	33	0,001029	0,036197	62	0,001029	0,036197
5	0,001029	0,036197	34	0,002058	0,05119	63	0,002058	0,05119
6	0,001029	0,036197	35	0,001029	0,036197	64	0,002058	0,05119
7	0,001029	0,036197	36	0,003088	0,062705	65	0,002058	0,05119
8	0,001029	0,036197	37	0,003088	0,062705	66	0,001029	0,036197
9	0,005146	0,080946	38	0,001029	0,036197	67	0,003088	0,062705
10	0,002058	0,05119	39	0,004117	0,072402	68	0,003088	0,062705
11	0,004117	0,072402	40	0,002058	0,05119	69	0,002058	0,05119
12	0,001029	0,036197	41	0,005146	0,080946	70	0,002058	0,05119
13	0,002058	0,05119	42	0,003088	0,062705	71	0,001029	0,036197
14	0,001029	0,036197	43	0,001029	0,036197	72	0,001029	0,036197
15	0,01	0,11284	44	0,001029	0,036197	73	0,003088	0,062705
16	0,001029	0,036197	45	0,002058	0,05119	74	0,003088	0,062705
17	0,008234	0,102392	46	0,001029	0,036197	75	0,003088	0,062705
18	0,002058	0,05119	47	0,002058	0,05119	76	0,008234	0,102392
19	0,002058	0,05119	48	0,002058	0,05119	77	0,003088	0,062705
20	0,001029	0,036197	49	0,005146	0,080946	78	0,002058	0,05119
21	0,001029	0,036197	50	0,001029	0,036197	79	0,001029	0,036197
22	0,002058	0,05119	51	0,002058	0,05119	80	0,001029	0,036197
23	0,001029	0,036197	52	0,001029	0,036197	81	0,001029	0,036197
24	0,002058	0,05119	53	0,01	0,11284	82	0,004117	0,072402
25	0,001029	0,036197	54	0,004117	0,072402	83	0,006	0,087405
26	0,002058	0,05119	55	0,001029	0,036197	84	0,008	0,100927
27	0,001029	0,036197	56	0,007204	0,095774	85	0,001029	0,036197
28	0,005146	0,080946	57	0,002058	0,05119	86	0,001029	0,036197
29	0,002058	0,05119	58	0,002058	0,05119	87	0,005146	0,080946

Продовження Додатка В

Таблиця В.3 – Вибрані дані розрахунку площі S (мкм²) і діаметру d (мкм)
частинок розмірами менше 0,09 мм

№	S	d	№	S	d	№	S	d
1	140	13,35136	30	240	17,48103	59	20	5,046339
2	60	8,740516	31	1380	41,91804	60	100	11,28396
3	100	11,28396	32	40	7,136602	61	1100	37,42466
4	480	24,72191	33	60	8,740516	62	80	10,09268
5	120	12,36096	34	100	11,28396	63	520	25,73138
6	280	18,88167	35	60	8,740516	64	360	21,40981
7	420	23,12523	36	40	7,136602	65	280	18,88167
8	320	20,18536	37	140	13,35136	66	240	17,48103
9	140	13,35136	38	40	7,136602	67	380	21,99648
10	100	11,28396	39	120	12,36096	68	180	15,13902
11	20	5,046339	40	140	13,35136	69	300	19,54439
12	60	8,740516	41	260	18,19484	70	200	15,95793
13	80	10,09268	42	200	15,95793	71	100	11,28396
14	460	24,20139	43	140	13,35136	72	20	5,046339
15	20	5,046339	44	200	15,95793	73	40	7,136602
16	40	7,136602	45	160	14,2732	74	340	20,80659
17	60	8,740516	46	200	15,95793	75	80	10,09268
18	40	7,136602	47	100	11,28396	76	100	11,28396
19	20	5,046339	48	40	7,136602	77	220	16,73681
20	300	19,54439	49	40	7,136602	78	420	23,12523
21	160	14,2732	50	60	8,740516	79	40	7,136602
22	380	21,99648	51	260	18,19484	80	560	26,70272
23	100	11,28396	52	60	8,740516	81	140	13,35136
24	160	14,2732	53	80	10,09268	82	180	15,13902
25	260	18,19484	54	440	23,66943	83	40	7,136602
26	360	21,40981	55	40	7,136602	84	180	15,13902
27	80	10,09268	56	40	7,136602	85	40	7,136602
28	160	14,2732	57	100	11,28396	86	400	22,56792
29	100	11,28396	58	60	8,740516	87	180	15,13902

Продовження Додатка В

Таблиця В.4 – Вибрані дані розрахунку площі S (мм²) і діаметру d (мм)
частинок розмірами від 0,14 мм до 0,63 мм

№	S	d	№	S	d	№	S	d
1	6,628	0,290504	30	6,628	0,290504	59	1,626	0,143887
2	2,651	0,183724	31	26,511	0,580998	60	21,208	0,51965
3	1,626	0,143887	32	15,906	0,450031	61	6,628	0,290504
4	10,604	0,367448	33	1,626	0,143887	62	10,604	0,367448
5	2,651	0,183724	34	14,581	0,430879	63	7,953	0,31822
6	1,626	0,143887	35	2,651	0,183724	64	5,302	0,259825
7	6,628	0,290504	36	13,255	0,41082	65	2,651	0,183724
8	1,626	0,143887	37	6,628	0,290504	66	9,279	0,343726
9	1,626	0,143887	38	1,626	0,143887	67	11,93	0,389746
10	10,604	0,367448	39	1,626	0,143887	68	3,977	0,225029
11	6,628	0,290504	40	1,626	0,143887	69	7,953	0,31822
12	2,651	0,183724	41	9,279	0,343726	70	5,302	0,259825
13	3,977	0,225029	42	7,953	0,31822	71	2,651	0,183724
14	5,302	0,259825	43	7,953	0,31822	72	5,302	0,259825
15	1,626	0,143887	44	2,651	0,183724	73	6,628	0,290504
16	1,626	0,143887	45	2,651	0,183724	74	1,626	0,143887
17	1,626	0,143887	46	1,626	0,143887	75	2,651	0,183724
18	1,626	0,143887	47	1,626	0,143887	76	1,626	0,143887
19	5,302	0,259825	48	6,628	0,290504	77	9,279	0,343726
20	18,557	0,486089	49	1,626	0,143887	78	1,626	0,143887
21	1,626	0,143887	50	6,628	0,290504	79	3,977	0,225029
22	2,651	0,183724	51	1,626	0,143887	80	7,953	0,31822
23	1,626	0,143887	52	7,953	0,31822	81	7,953	0,31822
24	1,626	0,143887	53	7,953	0,31822	82	2,651	0,183724
25	2,651	0,183724	54	2,651	0,183724	83	3,977	0,225029
26	1,626	0,143887	55	17,232	0,468413	84	7,953	0,31822
27	11,93	0,389746	56	1,626	0,143887	85	9,279	0,343726
28	2,651	0,183724	57	1,626	0,143887	86	1,626	0,143887
29	1,626	0,143887	58	2,651	0,183724	87	5,302	0,259825

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 – Розрахунок параметрів експоненційних кривих для зразків цементно-піщаного розчину на 270 добу твердіння

Номер серії	W_{\max} , %	W_{t2} , %	W_{t2}/W_{\max}	W_{t1} , %	W_{t1}/W_{\max}	$\bar{\lambda}_1$	α
1	4,02	3,83	0,95	3,83	0,95	3	0,0
2	3,75	2,96	0,79	2,76	0,74	1,6	0,1
3	2,63	2,06	0,78	1,88	0,71	1,5	0,05
4	3,16	2,56	0,81	2,37	0,75	1,6	0,05
5	1,99	1,59	0,80	1,39	0,70	1,8	0,20
6	2,63	2,22	0,85	2,22	0,85	1,9	0,0
7	5,41	4,50	0,83	4,05	0,75	1,85	0,10
8	4,32	3,73	0,86	3,44	0,79	1,6	0,0
9	3,31	2,34	0,71	2,34	0,71	1,2	0,0
10	3,26	2,49	0,77	2,49	0,77	1,5	0,0
11	3,73	2,95	0,79	2,95	0,79	1,6	0,0
12	4,70	3,68	0,78	3,07	0,65	1,5	0,2

Таблиця Г.2 – Розрахунок пористості серій зразків цементно-піщаного розчину на 270 добу твердіння

Номер серії	Середня густина ρ_0 , кг/м ³	Загальна пористість P , %	Відкрита пористість P_0 , %	Закрита пористість P_z , %	Показник середнього розміру відкритих капілярних пор $\bar{\lambda}$
1	2039,1	24,5	8,2	16,3	3
2	1980,5	26,6	7,4	19,2	1,6
3	2082,0	22,9	5,5	17,4	1,5
4	1980,5	26,7	6,3	20,4	1,6
5	1964,8	27,2	3,9	23,3	1,8
6	1933,6	28,4	5,1	23,3	1,9
7	1734,4	35,8	9,4	26,4	1,85
8	2039,1	24,5	8,8	15,7	1,6
9	2003,9	25,7	6,6	19,1	1,2
10	2039,1	24,4	6,6	17,8	1,5
11	1988,3	26,1	7,2	18,9	1,6
12	1910,2	29,3	9	20,3	1,5

ДОДАТОК Д

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник виробничого підрозділу

«Основа янська дистанція колії»

Регіональної філії «Південна залізниця»

АТ «Укрзалізниця»

Максим КРАСНОКУТСЬКИЙ



31 ЖОВТНЯ

2024 р.

АКТ

дослідного впровадження нових матеріалів для ремонту штучних споруд

Складений комісією у складі:

Голова комісії: Заступник начальника зі штучних споруд ВП «Основа янська дистанція колії» Іванченко А.В.

Члени комісії: Майстер мостовий першої ділянки ПЧМ-1 Сердюцький Ю.А.; майстер мостовий другої ділянки ПЧМ-2 Баженов М.А.; завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту д.т.н. професор Плугін Д.А.; д.т.н. професор Трикоз Л.В.; аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Зінченко О.С.

у тому, що в жовтні 2024 р. було проведено впровадження нових матеріалів з ремонту об'єктів інфраструктури залізничного транспорту, розроблених на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій і споруд УкрДУЗТ.

Новий матеріал було використано для ремонту пошкодженої ділянки опори залізобетонного залізничного шляхопроводу, який розташований на **2км пк 8 ділянки Основа – Харків Пас.** До складу наповненого полімерного композиційного матеріалу входить мономер метилметакрилат як зв'язуюче та дрібна фракція бетонних відходів з розмірами частинок менше 0,14 мм після подрібнення залізничних шпал як наповнювач. Витрата компонентів в масових частинах становила 1:1:1 (рідкий мономер : порошок каталізатор : наповнювач). Як ґрунтовий розчин використовувалася двокомпонентна суміш рідкого мономера метилметакрилату та порошкового каталізатора. Роботи проводилися при температурі повітря +15 °С.

Було виконано такий комплекс робіт із ремонту пошкоджених частин мосту:

- очищення і підготовка поверхні;
- приготування і нанесення ґрунтового розчину;
- приготування і нанесення ремонтного полімерного розчину;
- штикування і притискання спеціальним інструментом;
- контроль якості неруйнівними методами.

Загальна площа відремонтованих ділянок мосту становить **3.3 м²**.

Контроль якості виконаних робіт проведено з використанням електронного склерометра Онікс-2.5. Значення показників для усіх відремонтованих ділянок знаходилися в межах 10,9...12,2 МПа, що еквівалентно класу міцності важкого бетону

Продовження Додатка Д

C8/10. Досягнутий економічний ефект визначається за рахунок подовження міжремонтних термінів і використання некондиційних матеріалів – відходів подрібнення залізобетонних шпал.

У результаті проведених робіт з впровадження зроблені такі висновки. Розроблений матеріал придатний для використання для ремонтно-відновлювальних робіт об'єктів інфраструктури залізничного транспорту, сприяє подовженню міжремонтних термінів та забезпечує стійкість і довговічність штучних споруд.

Голова комісії:

Заступник начальника зі штучних споруд
ВП «Основ'янська дистанція колії»
Регіональної філії «Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця»



Андрій ІВАНЧЕНКО

Члени комісії:

Майстер мостовий першої дільниці ПЧМ-1
ВП «Основ'янська дистанція колії»
Регіональної філії «Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця»



Максим БАЖЕНОВ

Майстер мостовий другої дільниці ПЧМ-2
ВП «Основ'янська дистанція колії»
Регіональної філії «Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця»



Юрій СЕРДЮЦЬКИЙ

Завідувач кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд
Українського державного університету
залізничного транспорту



Дмитро ПЛУГІН

Професор кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд
Українського державного університету
залізничного транспорту



Людмила ТРИКОЗ

Аспірант кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд
Українського державного університету
залізничного транспорту



Олексій ЗІНЧЕНКО

ДОДАТОК Е

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту



Владислав ПАНЧЕНКО

« 09 » січня 2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
на здобуття наукового ступеня доктора філософії

ЗІНЧЕНКА Олексія Сергійовича

«Бетони, будівельні розчини та композиційні полімерні матеріали з
використанням поліфракційних рециклінгових наповнювачів із залізничних
залізобетонних шпал»

Результати дисертаційного дослідження Олексія ЗІНЧЕНКА використовуються в Українському державному університеті залізничного транспорту в освітньому процесі при підготовці бакалаврів, магістрів і докторів філософії спеціальності G19 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм здобуття освіти за освітньою програмою «Промислове та цивільне будівництво», а також спеціальності J7 Залізничний транспорт за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство», зокрема в курсах «Будівельне матеріалознавство», «Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів та конструкцій», «Відновлення експлуатаційних властивостей, захист конструкцій та споруд», «Модифікація бетонів і будівельних розчинів хімічними та мінеральними добавками і полімерами», а також в дипломному проєктуванні.

Результати дисертаційної роботи використані у трьох держбюджетних науково-дослідних роботах Міністерства освіти і науки України, а саме «Розвиток теоретичних основ і експериментальна перевірка нових ефективних способів підвищення несучої здатності та водонепроникності ґрунтів земляного полотна залізниць» (2020-2022, ДРН№ 0120U102065); «Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (2022-2023, ДРН№ 0122U002125); «Теоретичні та експериментальні основи створення стійких до електричних і динамічних впливів бетонних виробів з композитною арматурою для будівництва та відновлення електрифікованих ділянок залізниць» (2026-2028, ДРН№ 0126U002127).

Завідувач кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд,
д.т.н., професор

Дмитро ПЛУГІН