

КОНЦЕПЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПОВНІЮВАЧІВ РЕЦИКЛІНГУ БЕТОНУ В ТЕХНОЛОГІЇ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ БЕТОНІВ

THE CONCEPT OF USING RECYCLED CONCRETE AGGREGATES IN LOW-CARBON CONCRETE TECHNOLOGY

Саницький М. А., д.т.н., проф., Кропивницька Т. П., д.т.н., проф., Рихліцька О. В., д-р філософії (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

Sanytsky M., prof., Kropyvnytska T., prof., Rikhlitska O., PhD, (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

У статті представлено концепцію використання заповнювачів рециклінгу бетону як одного з ключових компонентів низьковуглецевих бетонів. Наведено дані щодо впливу активних мінеральних добавок пуцоланічної дії (зола-винесення, мікрокремнезем) та етерів полікарбоксатів на міцнісні характеристики бетонів.

The concept of using recycled concrete aggregates (RCA) contributes to the further development of one of the most promising sustainable construction technologies, which is consistent with the principles of the circular economy and decarbonization of the industry. The use of Portland cement with limestone CEM II/A-LL 42.5 R, combined active pozzolanic additive "fly ash - microsilica" ensures uniform passage of the pozzolanic reaction of components at different structural levels in the formation of a cementing matrix, which largely determines the characteristics of the modified concrete. The combination of components with polycarboxylate ethers provides modification of the mesostructure of the cementing matrix of concretes based on RCA and creates the possibility of achieving high mobility of mixtures and increasing the strength of recycled aggregate concretes. Multi-component cementitious materials fill the pore space of the cement paste and contribute to the compaction of the interface transition zone due to the reaction with calcium hydroxide to form C-S-H gels, which leads to improved recycled aggregate concrete characteristics. The integration of RCA into the production of building materials is an important step towards reducing construction waste, conserving natural resources and creating competitive solutions for the green transformation of the construction sector.

Ключові слова: заповнювач рециклінгу бетону, зола-винесення, мікрокремнезем, полікарбоксилатні етери, цементуюча матриця, низьковуглецеві бетони

Keywords: concrete recycled aggregate, fly ash, microsilica, polycarboxylate ethers, cementitious matrix, low-carbon concretes

Вступ. Бетон завдяки своїй високій конструкційній міцності та довговічності є важливим компонентом сучасної інфраструктури. В той же час, при виготовленні бетонів у якості основних складників використовуються природні заповнювачі, видобування яких є високовартісними процесом. З іншої сторони, в результаті військових дій в Україні було зруйновано або пошкоджено значну кількість об'єктів цивільної інфраструктури. Одним із можливих шляхів повторного використання бетонних відходів (бетонні, залізобетонні конструкції та вироби, їх уламки) є виробництво крупного та дрібного заповнювачів для бетонів, що є актуальним і сприяє подальшому розвитку низьковуглецевої економіки [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. Використання заповнювачів рециклінгу бетону (recycled concrete aggregate RCA) є однією з найбільш перспективних технологій сталого будівництва, що відповідає принципам циркулярної економіки та декарбонізації галузі [3]. Розроблення низьковуглецевих бетонів на основі цементів з використанням рециклінгових заповнювачів бетону визначає необхідність вирішення завдання удосконалення методології проектування бетонних сумішей з оптимізованим гранулометричним складом. Модифікування поверхні заповнювачів рециклінгу бетону на різних структурних рівнях дозволяє отримати більшу щільність і міцність контактної зони, що сприяє підвищенню довговічності бетону [4].

Використання переробленого бетону не тільки зменшує споживання природних матеріалів, але й дає змогу зменшити викиди CO₂. В той же час, понижені характеристики заповнювачів рециклінгу бетону обмежують їх широке застосування в технології будівельного виробництва [5, 6]. Такі заповнювачі характеризуються вищим водопоглинанням та пористістю у порівнянні з природним щебенем. Залишковий цементний камінь створює ризик підвищеної усадки та тріщинуватості, але з іншого боку сприяє кращій адгезії цементного каменю.

Згідно [7, 8], керуючи фізико-хімічними процесами структуроутворення в цементуючих системах на мікро- та макрорівнях, можна отримати низьковуглецеві композити з використанням продуктів рециклінгу бетонів з такими властивостями та функціями, що забезпечують тривалу експлуатацію. високі механічні, технічні та екологічні характеристики будівель і споруд. У цьому плані важливим є встановлення особливостей процесів структуроутворення в цементуючій матриці бетонів, яка заповнює простір між зернами крупного заповнювача. При цьому технологічним параметром суміші, який впливає на структуру цементуючої матриці, є співвідношення цемент : пісок. У бетонах з заповнювачем рециклінгу цементуюча матриця може бути модифікована активними мінеральними добавками,

суперпластифікаторами та наноматеріалами для підвищення ефективності структуроутворення та експлуатаційних властивостей [9].

Таким чином, дослідження з макро- та мікроскопічної точки зору впливу різного роду мінеральних добавок (зола-винесення, мікрокремнезем та ін.) в поєднанні з естерами полікарбоксилатів на характеристики бетонів з використанням відходів рециклінгу є перспективними і відповідають стратегії сталого розвитку в будівельній галузі. Це дозволить розширити повну переробку бетону та розгорнути її в промислових масштабах, таким чином сприяючи широкому використанню низьковуглецевих бетонів.

Мета та завдання роботи: розроблення напрямків щодо підвищення міцності бетонів з використанням заповнювачів рециклінгу шляхом введення до цементуючої матриці пуцоланових матеріалів різного структурного рівня дисперсності (зола-винесення, мікрокремнезем) в поєднанні з естерами полікарбоксилатів.

Матеріали і методи досліджень. В дослідженнях застосовано портландцемент з вапняком СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R (виробник ПрАТ «Івано-Франківськцемент»); питома поверхня за Блейном $S_{\text{пнт}}=4200 \text{ см}^2/\text{г}$. Для покращення структури цементуючої матриці бетону з заповнювачем рециклінгу застосовано комбіновану пуцоланову добавку (КПД) на основі золи-винесення Бурштинської ТЕС та мікрокремнезему Elkem Microsilica Grade 940-U. Зола-винесення характеризується вмістом, мас. %: SiO_2 – 53,61, CaO – 3,80, Al_2O_3 – 26,0 і Fe_2O_3 – 8,98; питома поверхня складає $S_{\text{пнт}}=3240 \text{ см}^2/\text{г}$. Для мікрокремнезему вміст SiO_2 складає 95,8 мас. %; питома поверхня становить $S_{\text{пнт}}=14000 \text{ см}^2/\text{г}$. В якості полікарбоксилатного суперпластифікатора (ПСЕ) використано Master Glenium 430 (BASF). В якості альтернативного дрібного заповнювача використано продукти подрібнення в щоківий дробарці бетону класу міцності C25/30.

Хімічний склад компонентів визначено методом рентгеноспектрального аналізу. Для визначення гранулометричного складу активної комбінованої пуцоланової добавки застосовано метод лазерної дифракції. При визначенні фазового складу застосовано методи кількісної рентгенівської дифрактометрії та растрової електронної мікроскопії.

Результати досліджень. Згідно з даними лазерної гранулометрії, для комбінованої пуцоланової добавки вміст фракції $\varnothing 5$; $\varnothing 10$; $\varnothing 20 \text{ мкм}$ становить відповідно 22,62, 38,01, 59,89 %, а розмір зерен $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ відповідає 6,08; 27,0; 119 мкм. Максимум на диференційній кривій розподілу відповідає частинкам розміром 11,5 мкм. Питома поверхня КПД складає $S_{\text{пнт}}=5800 \text{ см}^2/\text{г}$.

Для оцінки впливу заповнювачів рециклінгу бетону (RCA) на характеристики бетонів проведено порівняльну оцінку фізико-механічних властивостей бетонів на основі гранітного щебеню та заповнювачів рециклінгу бетону. Запроектовано традиційні бетони з використанням портландцементу з вапняком СЕМ ІІ/А-LL 42,5 R ($\rho=350 \text{ кг/м}^3$) при різному

співвідношенні заповнювачів гранітного щебеню та RCA. Встановлено, що для досягнення марки за рухливістю Р4 при збільшенні витрати RCA спостерігається збільшення В/Ц. Так, для контрольного зразка В/Ц становить 0,62, а при заміні частини гранітного щебеню на 25%, 50%, 75% RCA показник В/Ц зростає відповідно до 0,63, 0,64; 0,66; при повній заміні щебеню на RCA показник В/Ц збільшується до 0,70.

Як видно з рис. 1, при заміщенні в складі суміші гранітного щебеню на 50% RCA міцність через 1, 2, 7 і 28 діб становить 6,9; 13,1; 23,8 і 34,2 МПа відповідно. При заміні щебеню гранітного на 75% RCA міцність знижується на 12-13%, а при повному заміщенні міцність складає 5,8; 11,9; 21,3 і 30,5 МПа відповідно. Зниження міцності при заміні 25% RCA складає 4,3%, при 50% RCA - 8,8 %, при 75% RCA - 15,2 %; при введенні 100 % RCA міцність знижується на 18,7%.

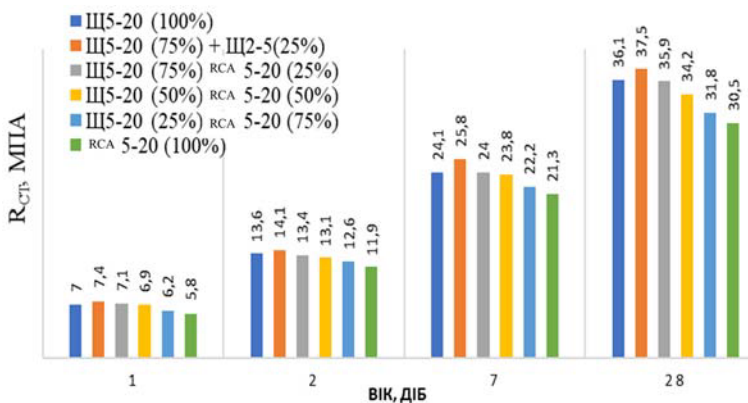


Рис. 1. Міцність на стиск бетонів на основі суміші заповнювачів різних видів

Для визначення фізико-механічних властивостей цементуючої матриці бетону, свіжоприготовлену бетонну суміш (марка за рухливістю Р4) було розділено на ситі з отвором 5 мм з одержанням двох складових: фракції щебеню та цементно-піщаної суміші. Як видно з табл. 1, для розчинової суміші рухливість за розпливом конуса складала РК=230 мм, а міцність на згин та стиск дрібнозернистого бетону через 2 і 28 діб становила 3,6 і 8,4 МПа та 24,5 і 74,8 МПа відповідно.

Таблиця 1
Фізико-механічні властивості цементуючої матриці бетону, модифікованої полікарбоксилатним суперпластифікатором

Вид заповнювачів	В/Ц	РК, мм	Границя міцності на згин/стиск, МПа	
			2	28
50%Щ ₅₋₂₀ + 50% RCA ₅₋₂₀	0,45	230	3,6 / 24,5	8,4 / 74,8
25%Щ ₅₋₂₀ + 75% RCA ₅₋₂₀	0,47	220	2,4 / 19,7	7,1 / 65,9

Характерно, що для структурних складових модифікованого бетону міцність змінюється наступним чином: для щебеню гранітного – 120 МПа, цементного каменю (залежно від В/Ц) – до 90 МПа, цементно-піщаної суміші (цементуюча матриця) – 74 МПа, а для бетону – 50 МПа. Це свідчить, що найслабшою ланкою в структурі бетону є контактна зона «заповнювач – цементний камінь». Оптимальній структурі бетону на макро- і мезорівні відповідає максимальна щільність упакування зерен, а на мікрорівні – міцна будова перехідного шару (контактної зони). Покращення контактної зони може досягатися за рахунок ущільнення цементуючої матриці шляхом застосування активної пуццоланової добавки «зола-винесення - мікрокремнезем» в комплексі з полікарбоксилатними естерами.

Згідно з даними кількісного рентгенофазового аналізу за Рітвельдом, для портландцементу СЕМ II/A-LL, гідратованого 24 год, вміст еtringіту складає 12,3 мас. %, портландиту - 16,2 мас. %, рентгеноаморфної фази – 43,4%. При введенні 20,0 мас.% КПД збільшується кількість еtringіту до 14,7 %, а кількість портландиту зменшується до 11,2 %. Методом растрової електронної мікроскопії показано, що цементуюча система 85 мас. % СЕМ II/A-LL + 15 мас. % КПД характеризується дрібнокристалічною структурою, яка проявляється у вигляді голкоподібних гідросилікатів кальцію та пластиноподібних окремих кристалів портландиту. Комплексне поєднання золи-винесення, мікрокремнезему та полікарбоксилатних естерів дозволяє ущільнити структуру на мезо- і мікрорівнях цементуючої матриці бетонів. Багаторівневе модифікування мікроструктури комплексними добавками на основі високодисперсної КПД «зола-винесення - мікрокремнезем» і полікарбоксилатних естерів забезпечує максимально щільну цементуючу матрицю та підвищену адгезійну міцність на межі контактної зони.

Низьковуглецеві клінкер-ефективні бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону, склади яких оптимізовані склади на мезо- та мікрорівнях за рахунок модифікування РСЕ та комбінованою активною пуццолановою добавкою «зола-винесення - мікрокремнезем», характеризуються через 1; 2 та 28 діб збільшенням міцності до 24,7; 39,6 та 78,7 МПа, що відповідає вимогам щодо швидкотверднучих та високоміцних бетонів ($f_{cm2}/f_{cm28} = 0,50$, С50/60). Розроблені швидкотверднучі низьковуглецеві бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону характеризуються підвищеними будівельно-технічними властивостями: модуль пружності $E_{cm}=46,5$ ГПа, в'язкість руйнування $K_t=0,95$ МПа·м^{1/2}, водонепроникність W12, морозостійкість F300. При дотриманні умов сортування, очищення та фракціонування RCA можливо досягти зниження вуглецевого сліду бетонних виробів до 30–50% у порівнянні з традиційними бетонами [10].

Висновок:

Розроблені низьковуглецеві бетони на основі заповнювачів рециклінгу бетону характеризуються необхідними показниками технологічності,

щільності, міцності та довговічності (марка за водонепроникністю W12, марка за морозостійкістю F300). Концепція використання заповнювачів рециклінгу бетону полягає в забезпеченні безперервного дисперсно-гранулометричного складу зерен твердої фази та використанні комбінованої пуцоланової добавки на основі золи-виношення та мікрокремнезему в комплексі з естерами полікарбоксилатів, що сприяє максимальному ущільненню структури цементуючої матриці та контактної зони між цементним каменем і заповнювачем, а в кінцевому результаті забезпечує підвищені експлуатаційні властивості низьковуглецевих бетонів. Це дозволить розширити повну переробку бетонних конструкцій та розгорнути її в промислових масштабах, сприяючи таким чином подальшому розвитку технології низьковуглецевих бетонів.

1. O'Hegarty R., Kinnane O., Newell J., West R. High performance, low carbon concrete for building cladding applications. *Journal of Building Engineering*, Vol. 3, 2021, 102566. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102566>.
2. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Марчук В. В. Рубцова Ю. В. Бетони нового покоління. Рівне: НУБГП. 2021. 300 с.
3. González M. D., Caballero P. P., Fernández D. B., Vidal, M. J. Bosque, I. Martínez, C. The Design and Development of Recycled Concretes in a Circular Economy Using Mixed Construction and Demolition Waste. *Materials*. 2021, 14(16), 4762. <https://doi.org/10.3390/ma14164762>.
4. Troian V., Gots V., Keita E., Roussel N., Angst U., Robert J. Flatt. Challenges in material recycling for postwar reconstruction. *Techn. Lett.* 2022, 7: 139-149. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.171>.
5. Xie T., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Toward the Development of Sustainable Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Comprehensive Review of Studies on Mechanical Properties. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2018, 30(9): 04018211. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002304](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002304).
6. Fawzy A., Elshami A., Ahmad S. Investigating the Effects of Recycled Aggregate and Mineral Admixtures on the Mechanical Properties and Performance of Concrete. *Materials*. 2023, 16, 5134. <https://doi.org/10.3390/ma16145134>.
7. 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. *Mater.* 2023, 16(22), 7144; <https://doi.org/10.3390/ma16227144>.
8. Singh P. Study the effect of Fly Ash, Silica Fume and Recycled Aggregate on the Compressive Strength of Concrete. *Int. J. Res. Eng. Adv. Techn.* 2015, 3, 1, 71-78. <https://www.academia.edu/36958214>.
9. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони: монографія – Львів: Видавництво ТОВ «Простір-М», 2021. - 206 с.
10. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rykhlytska O. The effect of pozzolanic additives on the performance of the cementitious matrix of recycled aggregate concrete // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2024. – Vol. 18, № 4. – P. 592–600.