

## ХІМІКО-МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ РУЙНУВАНЬ ЯК МІНЕРАЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Белоград А.Ю.<sup>1</sup>, Мельник Л.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірантка, кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Д.т.н., доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

e-mail: 1. [Anastasiya.belograd@gmail.com](mailto:Anastasiya.belograd@gmail.com), 2. [luba\\_xtkm@ukr.net](mailto:luba_xtkm@ukr.net)

**Анотація.** У роботі досліджено можливість використання відходів руйнувань як мінеральної складової цементних композицій. Мета дослідження – встановлення хімічного та мінералогічного складу відходів руйнувань із різних регіонів України та оцінка можливості їх використання у порівнянні з традиційними мінеральними добавками. Проведено їх рентгенофлуоресцентний (XRF) та рентгенофазовий аналіз (XRD), та визначення міцності при стиску композицій із частковим заміщенням цементу в цементно-піщаному розчині. Виявлено високий вміст SiO<sub>2</sub>, переважання кварцу у фазовому складі та задовільні показники міцності цементних систем з використанням досліджуваних відходів. Отримані дані є підтвердженням доцільності їх використання як мінерального наповнювача і часткового заміщення цементу в будівельних розчинах та бетонних сумішах.

**Ключові слова:** відходи руйнувань, цементні композиції, мінеральний компонент, рентгенофлуоресцентний аналіз, рентгенофазовий аналіз.

У сучасних умовах війни в Україні, проблема повторного використання відходів руйнувань у якості нових будівельних матеріалів набуває особливої актуальності. Такі матеріали, завдяки своєму елементному складу, формують значний ресурс вторинної мінеральної сировини для будівельної галузі [1, 2]. Одним із перспективних напрямів є їх застосування у складі цементних композицій як мінерального компонента, здатного частково замінювати портландцементний клінкер. Перспективність такого підходу для України вже відзначалася в попередніх наших дослідженнях [3]. Встановлення хімічного складу відходів руйнувань із різних регіонів України та оцінка можливості їх використання у складі бетонних сумішей та розчинів у порівнянні з традиційними мінеральними добавками.

Використано два зразки відходів руйнувань: ВРМ – відходи руйнувань з м. Миколаїв та ВРХ – відходи руйнувань з м. Харків. Для порівняння розглянуто також пуцолану, золу виносу та доменний гранульований шлак (ДГШ). Також проведено визначення міцності при стиску зразків із частковим заміщенням цементу мінеральними компонентами.

За результатами XRF-аналізу встановлено, що обидва зразки відходів руйнувань характеризуються підвищеним вмістом SiO<sub>2</sub> – 53,70 % для ВРМ та 55,92 % для ВРХ. Вміст CaO становить 16,08 і 13,64 % відповідно (табл. 1), а Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> перебувають на рівні близько 5 і 2–3 %.

Таблиця 1 – Порівняльний оксидний склад досліджених мінеральних компонентів, мас. %

Матеріал	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI
ВРМ	53,70	5,09	3,12	16,08	0,83	0,21	0,81	1,40	0,84	11,78
ВРХ	55,92	5,20	2,15	13,64	0,70	0,19	1,06	1,16	0,89	7,26
Пуцолана	47,76	5,80	2,54	23,50	0,84	0,38	0,13	1,17	0,36	17,36
Зола	44,78	19,12	9,26	3,22	1,10	1,10	0,74	2,88	0,95	0,87
ДГШ	39,39	6,80	0,38	46,76	4,87	-	0,54	0,39	1,97	0,90

У порівнянні із золою виносу досліджені відходи руйнувань містять менше  $Al_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , але істотно більше  $CaO$ , що свідчить про їх проміжне положення між алюмосилікатними та карбонатно-силікатними мінеральними компонентами. Для зразка ВРМ також характерна вища втрата при прокалюванні – 11,78 %, тоді як для ВРХ вона становить 7,26 %, що може бути пов'язано з підвищеним вмістом карбонатних фаз.

Для системного аналізу хімічного складу природних і техногенних наповнювачів та їхнього впливу на властивості ПКМ було розраховано кілька ключових індексів, що широко використовуються в матеріалознавстві, та технології силікатів. Серед них силікатний індекс ( $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ ), алюмосилікатний індекс ( $Al_2O_3/SiO_2$ ) та коефіцієнт кислотності ( $SiO_2/(CaO+MgO)$ ). Для ВРМ ці показники становили відповідно 6,54; 0,095 і 3,18, а для ВРХ – 7,61; 0,093 і 3,90. Враховуючи те, що силікатний індекс обох зразків ( $K_s > 4,5$ ) то їх можна віднести до групи малореакційноздатних, пасивних наповнювачів, які доцільно використовувати для створення композицій зі стабільною структурою та низькою міжфазною взаємодією.

Дані рентгенофазового аналізу показали, що основною кристалічною фазою в обох зразках є кварц з вмістом 78,11 % для ВРМ та 86,16 % для ВРХ. Окрім кварцу, у складі зразків виявлено кальцит, ангідрит, арканіт, афтіталіт, лангбейніт, а також незначні кількості портландиту, периклазу та феритової фази. Вміст кальциту у зразку ВРМ досягає 10,90 %, тоді як у ВРХ він істотно нижчий – 3,86 %, що узгоджується з результатами XRF-аналізу та значеннями втрат при прожарюванні. Відсутність аліту і беліту свідчить про те, що досліджені відходи руйнувань не можуть розглядатися як самостійне гідравлічно активне в'язуче, проте є перспективними як мінеральний наповнювач і компонент низьоклінкерних цементних систем. Оцінка фізико-механічних властивостей композицій із 50 мас.% заміною цементу показала, що суміші на основі відходів руйнувань мають вищу питому поверхню, ніж вихідний цемент СЕМ І 42.5 R: 5907  $cm^2/g$  для ВРХ + СЕМ та 6255  $cm^2/g$  для ВРМ + СЕМ проти 4315  $cm^2/g$  для цементу. Міцність при стиску через 2 доби становить 12,6 МПа для композиції з ВРХ і 12,5 МПа для композиції з ВРМ, а через 7 діб – 21,1 та 20,9 МПа відповідно. За цими показниками досліджені композиції є близькими до систем із пуцоланою та золою виносу, що підтверджує можливість використання відходів руйнувань як часткової заміни цементу в композиційних матеріалах.

Отримані дані свідчать, що відходи руйнувань із Миколаєва та Харкова характеризуються близьким за типом, але відмінним за співвідношенням оксидів і фазовим складом. Високий вміст кварцу, наявність кальциту та сульфатовмісних фаз, а також задовільні фізико-механічні характеристики цементних композицій із їх використанням дають підстави розглядати такі відходи як перспективний мінеральний компонент для цементних композицій.

## ВИСНОВКИ

Відходи руйнувань ВРМ і ВРХ характеризуються високим вмістом  $SiO_2$  – 53,70 і 55,92 мас.% відповідно, що свідчить про їх кремнеземистий характер. Основною кристалічною фазою в обох зразках є кварц, вміст якого становить 78,11 мас. % для ВРМ і 86,16 мас. % для ВРХ. При 50 мас. % заміні цементу відходами руйнувань міцність при стиску через 2 доби становить 12,5–12,6 МПа, а через 7 діб – 20,9–21,1 МПа, що підтверджує можливість їх використання як мінерального наповнювача та часткової заміни цементу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. European Commission. Construction and demolition waste.
2. World Bank, European Union, United Nations, & Government of Ukraine. (2025). *Ukraine fourth rapid damage and needs assessment (RDNA4): February 2022 – December 2024*.
3. Bielohrad, A. (2024). Assessment of the opportunities of demolition waste using as a building material of the future in Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(3(77)), 25–29. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.307317>