

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІНЕРАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ НА
ВЛАСТИВОСТІ ДОРОЖНІХ ГІДРАВЛІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF MINERAL COMPONENTS ON THE
PROPERTIES OF ROAD HYDRAULIC BINDERS**

Соболев Х.С., д.т.н., [0000-0003-0798-413X] проф Петровська Н.І., к.т.н., доц., [0009-0007-6129-5569] Гуняк О.М., к.т.н., доц., [0000-0002-6650-1516] Розмус Д.І., аспірант [0009-0002-8119-5534] (Національний університет "Львівська політехніка")

K.S. Sobol, DrSc, prof., N.I. Petrovska, Ph.D., associate professor, O.M. Hunyak Ph.D., associate professor, D.I. Rozmus, postgraduate student (Lviv Polytechnic National University, Department of Highways and Bridges)

Наведені результати дослідження впливу мінеральних компонентів на властивості дорожніх гідралічних в'язучих для використання в бетонах з низьким В/Ц.

The development of modern road construction requires the continual improvement of materials that ensure high quality, durability, and reliability of pavements. A key role in this process is played by road hydraulic binders, which are used for constructing road bases and pavements due to their ability to harden and maintain strength under demanding operating conditions. In response to current challenges in transport infrastructure, increasing attention is being paid to roller-compacted concrete (RCC), driven by rising costs of bituminous binders and the widespread availability of asphalt paving equipment that can be adapted for RCC placement.

This study explores the potential of using various mineral components — natural and synthetic zeolites, metakaolin, limestone, coal slag waste, and calcined sunflower ash—as partial substitutes for Portland cement in hydraulic binders. These materials were incorporated in varying proportions, and their effects on setting time, volume stability, and compressive strength were evaluated. The mineral additives, compliant with EN 13282-2:2021, significantly influenced hydration processes and microstructure development, especially under low water-to-cement ratios. Among the tested components, metakaolin, natural zeolite, and calcined sunflower ash (at up to 10 wt.% cement replacement) demonstrated the most promising results, contributing to enhanced early and final strength.

The use of such mineral additives not only improves the performance characteristics of binders but also supports the principles of circular economy

by recycling industrial by-products and reducing environmental impact. The findings highlight the viability of integrating sustainable materials into road construction to achieve both technical efficiency and environmental responsibility.

Ключові слова: в'язучі, добавки, бетон, міцність, в/ц.
binders, additives, concrete, strength, w/c.

Вступ. Розвиток сучасного дорожнього будівництва потребує постійного вдосконалення матеріалів, які забезпечують високу якість, довговічність та надійність дорожнього покриття. Особливе місце серед таких матеріалів займають дорожні гідралічні в'язучі, що використовуються при влаштуванні основ та покриттів дорожніх конструкцій і характеризуються здатністю тверднути та зберігати міцність у складних експлуатаційних умовах.

У сучасних реаліях транспортного будівництва все більшої уваги приділяють укочуваному цементобетону. Це спричинено суттєвим здорожчанням вартості органічних в'язучих, та наявністю значної кількості асфальтоукладальних комплексів в українських дорожньо-будівельних організацій, що можуть бути застосовані для укладання укочуваного цементобетону. У зв'язку з цим, особливого значення набуває використання ефективних в'язучих матеріалів для бетонів з низьким В/Ц, що забезпечують необхідні реологічні властивості бетонних сумішей, сприяють суттєвій економії ресурсів, а також підвищують будівельно-технічні властивості композитів [1].

Перспективним напрямком в підвищенні експлуатаційних характеристик дорожніх гідралічних в'язучих для укочуваних бетонів є дослідження ефективності в їх складі мінеральних компонентів різних типів. Залежно від їх природи, мінеральні компоненти активно впливають на формування структури в'язучого матеріалу, покращують його фізико-механічні властивості, підвищують стійкість до впливу вологи, температурних коливань та агресивного середовища [2]. До складу дорожніх гідралічних в'язучих можуть входити металургійні шлаки, мінеральні компоненти з численної групи пуцоланових добавок, зольні та шлакові відходи різного походження, а також природний вапняк.

Застосування таких мінеральних компонентів дозволяє значно підвищити морозостійкість, водонепроникність, зносостійкість і довговічність бетонів на основі гідралічних в'язучих, що є критично важливими показниками для дорожніх конструкцій. Крім того, використання промислових відходів у вигляді мінеральних добавок сприяє зниженню екологічного навантаження на довкілля, зменшенню викидів CO₂, а також економії енергетичних і сировинних ресурсів [3].

Таким чином, раціональне застосування мінеральних компонентів у складі дорожніх гідралічних в'язучих відкриває широкі можливості для підвищення ефективності та екологічності дорожнього будівництва. Упровадження принципів промислового симбіозу, що передбачає використання відходів як вторинної сировини, є важливим етапом на шляху до створення стійких та ресурсозберігаючих технологій у галузі. Системний підхід до вибору мінеральних добавок дозволяє не лише поліпшити якість будівельних матеріалів, а й сприяє розвитку циркулярної економіки та забезпеченню сталого розвитку інфраструктури.

Матеріали та методи. В роботі в якості мінеральних компонентів дорожніх гідралічних в'язучих були використані добавки різної природи активності, що відповідають вимогам ДСТУ EN 13282-2:2021 - цеоліти природний та синтетичний, метакаолін, вапняк, золошлакові відходи Дарницької та Ладизинської ТЕС, а також випалена зола соняшника (BC3). Хімічний склад добавок наведений на рисунку 1.

Дорожні гідралічні в'язучі одержували в результаті змішування партландцементу СЕМ І 42,5 R з попередньо розмеленими мінеральними компонентами у відповідному співвідношенні в лабораторному кульовому млині.

Для одержання цеолітомісткого дорожнього в'язучого використовували добавку 25 мас.% цеоліту Сокиринського родовища цеолітових туфів Закарпатської області, який приймаючи участь в процесах гідратації, покращує властивості в'язучих та бетону на їх основі [4, 5, 6].

Оскільки на початкових етапах тверднення добавки цеолітів можуть виступати осередками зародження гідратних новоутворень та сприяти ущільненню структури дорожніх гідралічних в'язучих, в роботі була досліджена добавка 0,5-2,0 мас.% синтетичного цеоліту NaP_1 , який одержують з відходів виробництва [7, 8].

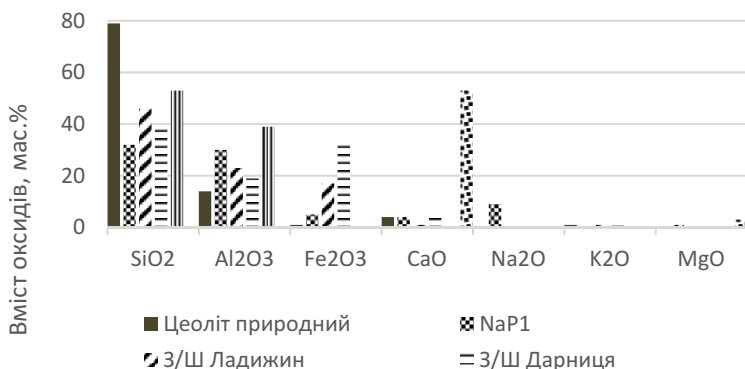


Рис.1. Хімічний склад мінеральних компонентів

Метакаолін, вміст якого в системі становив 25 мас%, використовувався як активна мінеральна добавка пуцоланічного типу, що забезпечує активізацію гідратаційних процесів гідралічних дорожніх в'язучих та підвищення міцності укочуваних бетонів [9].

В якості мінерального компоненту, який відіграє не лише роль мікронаповнювача в складі в'язучих, а проявляє також активну структуроутворюючу роль в процесі гідратації портландцементу [3], був використаний вапняк Добрянського родовища Львівської області в кількості 25 мас%.

Використання золошлакових відходів (З/Ш Дарниця, З/Ш Ладижин) в якості активних мінеральних добавок в складі дорожніх цементів, впливає на хід процесів гідратації і тверднення, підвищує тріщиностійкість дорожніх укочуваних бетонів [10]. Вміст золошлакових відходів становив також 25 мас%. Це дозволить провести уніфіковане порівняння властивостей дорожніх гідралічних в'язучих з різними мінеральними компонентами.

Випалена соняшникова зола (BC3) є біогенним мінеральним компонентом. Рис.2.



Рис.2. Загальний вигляд випаленої соняшникової золи

Випалена зола соняшника не належить до поширених мінеральних добавок, але набуває все ширшого застосування [1]. Як показали дослідження соняшникової золи на рентгенівському дифрактометрі AERIS Research (Malvern PANalytical) (Рис 3), основні фазоутворюючі сполуки в складі представлені SiO_2 , CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4 .

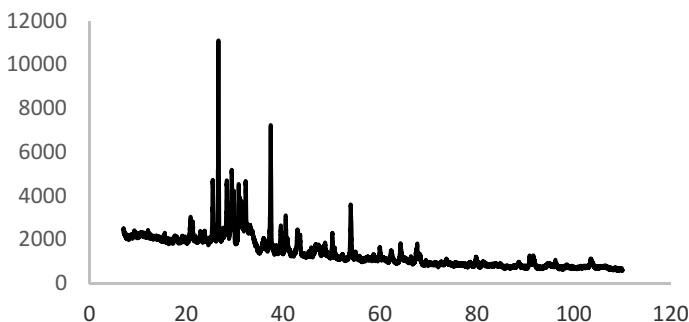


Рис 3. Дифрактограма випаленої соняшникової золи

ВСЗ вводилася до складу дорожнього гідралічного в'язучого у кількості 5-10 мас%, що дозволить відслідкувати ефективність заміщення нею частини портландцементу в складі в'язучого та її вплив на водопотребу, активність процесів гідратації і формування структури в'язучого.

У зв'язку з тим, що в технології одержання укочуваного бетону, де для досягнення високої щільності та довговічності необхідним є контроль водоцементного відношення, в роботі використовувалася добавка комплексної дії (ДКД), яка поєднує пластифікуючий та повітровтягувальний ефект.

Результати досліджень. Фізичні властивості дорожніх гідралічних в'язучих з мінеральними компонентами різного складу визначали згідно ДСТУ Б EN 196-3:2015.

Таблиця 1

Фізичні властивості дорожнього гідралічного в'язучого

Мінеральні компоненти		Тонина помолу, залишок на ситі 90 мкм, мас%	Початок тужавіння, хв.	Рівномірність зміни об'єму, мм
Вид	Вміст, мас.%			
Цеоліт природний	25,0	10,0	165	1,0
Метакаолін	25,0	5,5	160	1,0
Вапняк	25,0	10,8	165	1,0
З/Ш Дарниця	25,0	14,0	155	1,0
З/Ш Ладижин	25,0	13,5	150	1,0
Цеоліт синтетичний NaP ₁	0,5	12,0	170	0,0
	1,0		175	0,0
	2,0		175	0,0
ВСЗ	5,0	13,2	165	1,0
	10,0		160	2,0

Як видно з отриманих результатів, дорожні гідралічні в'язучі всіх досліджуваних складів відповідають вимогам ДСТУ EN 13282-2:2021.

Міцність в'язучих з мінеральними компонентами різного складу визначали на зразках розміром 2×2×2 см в тісті 1:0. В табл. 2 наведено отримані результати.

На ранньому етапі тверднення (1 доба) найвищу міцність продемонстрували зразки з додаванням метакеоліну (42,9 МПа) та зразок з СЕМ І 42,5 R з ДКД (49,7 МПа). Портландцемент без добавок характеризувався міцністю на стиск 41,6 МПа.

На 28 добу всі зразки з мінеральними добавками демонстрували суттєве зростання міцності, проте найвищий результат у 97,6 МПа отриманий для каменю з вмістом 25% метакеоліну, що підтверджує його високу пуцоланічну активність за низьких значень В/Ц. Зразки з ДКД характеризуються міцністю на стиск 89,6 МПа, природний цеоліт — 89,0 МПа, у той час, як склади з вмістом З/Ш мали значно нижчу міцність — 54,1 і 64,5 МПа для Дарницької та Ладизинської відповідно, що свідчить про значно нижчу активність у порівнянні з іншими досліджуваними пуцоланічними матеріалами.

Результати визначення міцності цементних композицій з ВСЗ свідчать про активну участь даної добавки у процесі гідратації, особливо при низьких дозуваннях: 94,6 МПа при заміні 5 мас.% портландцементу на 28 добу тверднення, та 99,2 МПа – на 56 добу.

Таблиця 2

Міцність цементних композицій

Мінеральні компоненти		Вміст ДКД, мас.%	В/Ц	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
Вид	Вміст, мас.%			1	28	56
СЕМ І 42,5 R	-	-	0,2	41,6	85,2	91,5
СЕМ І 42,5 R	-	0,6	0,2	49,7	89,6	99,3
Цеоліт природний	25,0	0,6	0,2	39,7	89,0	90,9
Метакеолін		0,6	0,2	42,9	97,6	99,7
Вапняк		0,6	0,2	33,6	75,8	77,1
З/Ш Дарниця		0,6	0,2	25,1	54,1	67,1
З/Ш Ладизин		0,6	0,2	36,1	64,5	73,7
Цеоліт синтетичний NaP ₁		0,6	0,2	44,8	75,9	79,6
	0,5	0,6	0,2	44,8	75,9	79,6
	1,0	0,6	0,2	36,3	71,3	77,3
	2,0	0,6	0,2	28,9	60,2	67,4
ВСЗ	5,0	0,6	0,2	46,1	94,6	99,2
	10,0	0,6	0,2	26,4	73,4	80,4

Міцність зразків з синтетичним цеолітом вказує на недоцільність його застосування у якості кристалоутворюючої добавки, оскільки на 1 та 28 добу тверднення зразки з NaP₁ характеризувались значно нижчою міцністю порівняно з портландцементом без мінеральних добавок.

На 56 добу максимальну міцність продемонстрував зразок з метакеоліном — 99,7 МПа, що дещо перевищує результат, отриманий для цементу з ДКД та в'язучого з 5 мас.% ВСЗ — 99,3 і 99,2 МПа відповідно. Гідравлічні в'язучі з вмістом природного цеоліту характеризуються міцністю на стиск 90,9 МПа, суттєво нижчі результати спостерігались у зразків з золами: 67,1; 73,7 та 80,4 МПа для складів «З/Ш Дарниця», «З/Ш Ладижин» та з 10 мас.% ВСЗ відповідно.

Таким чином, за критеріями міцності, у складі дорожніх гідравлічних в'язучих найбільш доцільно застосовувати метакеолін, природний цеоліт та ВСЗ у дозуванні до 10 мас.%.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено вплив мінеральних компонентів різного складу на рівномірність зміни об'єму, початок тужавіння та міцність дорожніх гідравлічних в'язучих при низьких водоцементних відношеннях.

Показано, що використання природного та синтетичного цеолітів, метакеоліну та випаленої соняшникової золи дає змогу отримати ефективні швидкоотверднучі дорожні гідравлічні в'язучі, що має важливе практичне значення для укочуваних бетонів.

1. Selvam M., Debbarma S., Singh S. Industrial and Agro-Based Wastes as Alternative Binders in Roller Compacted Concrete Pavements: A Comprehensive Review. Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore, 2023. P. 79–89. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3142-2_7 (дата звернення: 18.04.2025).

2. B.A.V.R. K., G. R. Performance evaluation of sustainable materials in roller compacted concrete pavements: a state of art review. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2022. Vol. 7, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00212-y> (дата звернення: 18.04.2025).

3. Analysis of Structure Formation Peculiarities during Hydration of Oil-Well Cement with Zeolitic Tuff and Metakaolin Additives / K. Sobol et al. Chemistry & Chemical Technology. 2014. Vol. 8, no.

4. P. 461–465. URL: <https://doi.org/10.23939/chcht08.04.461> (дата звернення: 18.04.2025). 4. Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, О. М. Гуняк. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів: Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2019. - № 912. - С. 175-182. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/nov/19688/191030budiv-175-182.pdf> (дата звернення: 18.04.2025).

5. Марків, Т. Є., Соболев, Х. С., Бліхартський, З. Я., & Гуняк, О. М. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів: Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва, 2015 - №823. - с. 222-228. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4224/36108.pdf> (дата звернення: 18.04.2025).

6. Mlonka-Mędrala A. Recent Findings on Fly Ash-Derived Zeolites Synthesis and Utilization According to the Circular Economy Concept. Energies. 2023. Vol. 16, no. 18. P. 6593. URL: <https://doi.org/10.3390/en16186593> (дата звернення: 18.04.2025).

7. Mainganye D., Ojumu T., Petrik L. Synthesis of Zeolites Na-P1 from South African Coal Fly Ash: Effect of Impeller Design and Agitation. Materials. 2013. Vol. 6, no. 5. P. 2074–2089. URL: <https://doi.org/10.3390/ma6052074> (дата звернення: 18.04.2025).

8. Dinakar P., Sahoo P. K., Sriram G. Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2013. Vol. 7, no. 3. P. 215–223. URL: <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0045-0> (дата звернення: 18.04.2025).

9. Magdziarz A., Dalai A. K., Koziński J. A. Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes. Fuel. 2016. Vol. 176. P. 135–145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.069> (дата звернення: 18.04.2025).