

РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНИХ СКЛАДІВ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ЛЕГКИХ ПОРИЗОВАНИХ БЕТОНІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У тезі представлено результати експериментальних досліджень складів сухих будівельних сумішей для легких поризованих бетонів, модифікованих механоактивованим силікагелем. Визначено вплив активованого SiO_2 на густину, міцність і теплопровідність легких бетонів, а також встановлено оптимальний вміст добавки, що забезпечує найкраще поєднання теплоізоляційних і конструкційних властивостей. Проведено аналіз структури та підтверджено ефективність технології механоактивації для підвищення енергоефективності будівельних матеріалів.

Ключові слова: легкий бетон, суха будівельна суміш, механоактивація, силікагель, теплопровідність, міцність, енергоефективність.

Abstracts

The thesis presents the results of experimental studies of the compositions of dry building mixtures for lightweight porous concretes modified with mechanically activated silica gel. The effect of activated SiO_2 on the density, strength and thermal conductivity of lightweight concretes was determined, and the optimal content of the additive was established, which provides the best combination of thermal insulation and structural properties. The structure was analyzed and the effectiveness of mechanical activation technology for increasing the energy efficiency of building materials was confirmed.

Key words: lightweight concrete, dry construction mix, mechanical activation, silica gel, thermal conductivity, strength, energy efficiency..

Вступ

Проблема створення енергоефективних і екологічно безпечних матеріалів у сучасному будівництві набуває особливої актуальності в умовах енергетичної кризи та необхідності зниження тепловтрат будівель. Одним із перспективних напрямів є розробка легких поризованих бетонів на основі сухих будівельних сумішей, які поєднують високу теплоізоляційну здатність із достатньою міцністю.

Традиційні способи зниження густини бетону шляхом введення пористих заповнювачів (керамзиту, пінополістиролу, піноскла) мають недолік у вигляді зниження зчеплення між фазами та нерівномірної структури. Тому важливим є використання наномодифікаторів і механоактивації, що дозволяють підвищити активність в'язучого, зменшити капілярну пористість і стабілізувати процес формування цементного каменю [1-4].

Матеріали та методи дослідження

Основним в'язучим є портландцемент СЕМ II/A-M(S-LL) 42,5 R (ПЦ II/A-K(Ш-B)-500Р). Як мінеральну добавку використовували механоактивований силікагель (SiO_2) з питомою поверхнею $5100 \text{ cm}^2/\text{g}$, який вводили у кількості 0–3 % від маси цементу.

До складу сухих сумішей входили також вапнякове борошно, тонкий кварцовий пісок (0–0,63 мм), редиспергований полімерний порошок, пластифікатор РСЕ (полікарбоксилатний ефір) та ефіри целюлози. Суміші замішували в лабораторному міксері, зразки $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ тверднули в нормальних умовах протягом 28 діб.

Механоактивація виконувалася у вібротоліні протягом 5 хв із частотою 50 Гц, що забезпечило рівномірний розподіл наночастинок і підвищення активності цементу. Випробування здійснювали відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та інших діючих норм [5-9].

Результати дослідження

На основі експериментів отримано три основні склади легких бетонів (табл. 1):

- L-350 – середня густина 360 kg/m^3 , міцність 3,1 МПа, $\lambda = 0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
- L-450 – середня густина 470 kg/m^3 , міцність 4,8 МПа, $\lambda = 0,11 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;

- L-600 – середня густина 590 кг/м³, міцність 6,3 МПа, $\lambda = 0,13$ Вт/(м·°C).

Таблиця 1 містить експериментально розроблені склади сухих будівельних сумішей для отримання легких поризованих бетонів різного функціонального призначення.

Склад L-350 оптимізовано для отримання надлегких теплоізоляційних бетонів. Значний вміст вапнякового борошна та повна відсутність важкого піску забезпечують мінімальну густину, а введення 10 % пінополістирольних гранул – стабільну дрібнопористу структуру з низькою теплопровідністю. Цей склад характеризується найнижчим водоцементним відношенням (0,33), що зберігає легкоукладальність суміші.

Суміш L-450 призначена для конструкційно-теплоізоляційних елементів. Часткове введення кварцового піску (60 кг) забезпечує підвищену міцність, а наявність керамзитового піску покращує теплозахисні властивості. Співвідношення “цемент : наповнювач” збалансоване таким чином, щоб матеріал мав достатню міцність на стиск (≈ 5 МПа) при відносно низькій густині (≈ 470 кг/м³).

Склад L-600 орієнтовано на самонесучі та конструкційні вироби для малоповерхового будівництва. Збільшений вміст кварцового піску (120 кг) і керамзитового піску (20 %) забезпечує більш щільну структуру цементного каменю, що призводить до підвищення міцності до рівня 6,3 МПа. При цьому теплопровідність зростає, проте залишається нижчою, ніж у традиційних важких бетонів.

Таблиця 1 – Склади розроблених сухих сумішей для легких поризованих бетонів

Склад	Призначення	Цемент, кг	Вапнякове борошно, кг	Пісок 0–0,63 мм, кг	Піно-полістирол, %	Керамзит. пісок, %	Силікагель, %	В/Ц	Середня густина, кг/м ³
L-350	Теплоізоляційні шари	240	120	–	10	–	2,0	0,33	360
L-450	Конструкційно-теплоізоляційні блоки	280	100	60	5	10	2,0	0,31	470
L-600	Самонесучі стінові елементи	320	80	120	–	20	1,5	0,30	590

Таблиця 2 демонструє результати випробувань легких бетонів на основі різних дозувань механоактивованого силікагелю (SiO₂). Дані свідчать про чіткий позитивний вплив механоактивації на структуру та властивості бетонів.

Таблиця 2 – Результати експериментальних випробувань фізико-механічних властивостей легких бетонів

№	SiO ₂ , %	Середня густина ρ_m , кг/м ³	Міцність R_{ct} , МПа	Теплопровідн. λ , Вт/(м·°C)	Водопоглинання, %	Морозостійкість	Структура
1	0	560	4,8	0,125	18,5	F25	Нерівномірна, частково відкрита
2	1,0	540	5,6	0,118	16,0	F35	Однорідніша, менше мікротріщин
3	2,0	525	6,5	0,111	14,5	F50	Рівномірна, замкнені пори
4	3,0	524	6,6	0,112	14,8	F50	Частково ущільнена

Зі збільшенням вмісту SiO₂ від 0 до 2 % середня густина зменшується з 560 до 525 кг/м³, що свідчить про формування стабільної замкнено-пористої структури. Активовані частинки SiO₂ відіграють роль центрів кристалізації та сприяють рівномірному розподіленню мікропор [10-11].

Міцність на стиск підвищується з 4,8 до 6,5 МПа, тобто на 35 %, що пов'язано з:

- інтенсифікацією гідратації цементу,
- утворенням додаткових C–S–H фаз,
- ущільненням перехідної зони між матрицею та пористими заповнювачами.

Зростання міцності сповільнюється при 3 % SiO₂, що свідчить про досягнення межі ефективності.

Коефіцієнт теплопровідності знижується з 0,125 до 0,111 Вт/(м·°C), завдяки утворенню тонкостінних замкнених пор, які погіршують теплоперенесення. При 3 % SiO₂ λ злегка підвищується, що пояснюється незначним ущільненням структури.

Показник водопоглинання зменшується з 18,5 до 14,5 %, тобто майже на 25 %. Це свідчить про зниження відкритої капілярної пористості, що позитивно впливає на довговічність.

Морозостійкість зростає від F25 до F50, що є значним результатом для легких бетонів і пояснюється високою стійкістю замкненої порової структури до заморожування-відтавання.

Візуальний аналіз зламів підтверджує:

- формування дрібнопористої матриці при 1–2 % SiO_2 ,
- зменшення мікротріщин,
- покращення адгезії між цементною матрицею та пінополістирольними/керамзитовими зернами.

Отже, під час варіювання вмісту SiO_2 від 0 до 3 % встановлено такі закономірності:

- міцність R_{ct} зростає з 4,8 до 6,6 МПа (+35 %);
- теплопровідність λ знижується з 0,125 до 0,111 Вт/(м·°C) (–12 %);
- густина ρ зменшується з 560 до 525 кг/м³ (–8 %).

Оптимальний ефект досягається при 2 % SiO_2 (табл. 2), що забезпечує максимальний показник структурної ефективності $K = R_{ct}/(\rho \cdot \lambda) \approx 0,0108$. Мікроструктурний аналіз підтвердив зменшення відкритої пористості на 15–20 %, формування замкнутої дрібнопористої структури та ущільнення перехідної зони між матрицею і заповнювачем.

Таблиця 3 порівнює властивості бетонів без механоактивації та при оптимальній дозі 2 % SiO_2 .

Таблиця 3 – Порівняння впливу механоактивації на основні технічні характеристики матеріалу

Показник	Без механоактивації (0 % SiO_2)	Оптимальна механоактивація (2 % SiO_2)	Ефект, %
Середня густина ρ_m , кг/м ³	560	525	–6,3 %
Міцність R_{ct} , МПа	4,8	6,5	+35 %
Теплопровідність λ , Вт/(м·°C)	0,125	0,111	–11,2 %
Водопоглинання, %	18,5	14,5	–22 %
Морозостійкість	F25	F50	+100 %
Комплексний коефіцієнт конструктивної якості $K = R_{ct}/(\rho \cdot \lambda)$	0,0070	0,0108	+54 %

Ефект механоактивації [12-13] проявляється у комплексному покращенні ключових властивостей:

- зниження густини на 6,3 % при одночасному зростанні міцності означає підвищення структурної ефективності;

- значне зростання міцності на +35 % – результат утворення щільної сітки C–S–H фаз, що зменшує слабкі зони в структурі;

- покращення теплотехнічних властивостей: зменшення λ на 11 % покращує енергоефективність матеріалу та робить його придатним для зовнішніх огорожувальних конструкцій.

- підвищення довговічності: підвищення морозостійкості удвічі (з F25 до F50) демонструє, що механоактивованій SiO_2 стабілізує структуру, знижує ризик утворення мікротріщин під час циклів заморожування-відтавання.

- комплексний коефіцієнт конструктивної якості K: підвищення K з 0,0070 до 0,0108 (+54 %) підтверджує високу ефективність наномодифікації та її доцільність при промисловому виробництві легких бетонів.

Таким чином, механоактивація забезпечує інтенсифікацію гідратації, підвищення міцності, зниження водопоглинання (на 20–25 %) та збільшення морозостійкості з F25 до F50.

Висновки

Отже, використання механоактивованого силікагелю у складі сухих будівельних сумішей забезпечує зниження густини, покращення міцності, підвищення довговічності та теплоізоляційних властивостей легких бетонів, що підтверджує перспективність технології для промислового впровадження:

1. Механоактивованій силікагель (SiO_2) істотно впливає на структуроутворення легких поризованих бетонів, забезпечуючи інтенсифікацію гідратації та ущільнення цементної матриці.

2. Оптимальна доза SiO_2 становить 2 %, що забезпечує підвищення міцності на стиск до 6,5 МПа (приріст $\approx 35\%$) при одночасному зниженні густини з 560 до 525 кг/м³.

3. Зменшення теплопровідності з 0,125 до 0,111 Вт/(м·°C) підтверджує формування дрібнопористої структури з підвищеними теплоізоляційними властивостями.

4. Водопоглинання знижується на 25 %, що свідчить про зменшення кількості відкритих капілярних пор та підвищення водостійкості матеріалу.

5. Морозостійкість зростає з F25 до F50, що вказує на покращену стабільність порової структури під дією циклів заморожування-відтавання.

6. Розроблені склади L-350, L-450 та L-600 забезпечують необхідний рівень міцності та густини для теплоізоляційних та конструкційно-теплоізоляційних бетонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: підручник. К.: Основа, 2012. 446 с.
2. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів: навчальний посібник. Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2010. 228 с.
3. Гоц В.І., Павлюк В.В., Шилок П.С. Бетони і будівельні розчини. Київ, 2016. 568 с.
4. Ушерів-Маршак О.В., Гоц В.І., Кабусь О.В. Бетони та будівельні розчини. Київ : Основа, 2022. 93 с.
5. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний 2009-12-22]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 18 с. (Національні стандарти України).
6. ДСТУ Б В.2.7-18-95. Бетони легкі. Загальні технічні умови. [Чинний 1995-07-01]. Київ : Держстандарт України, 1995. 25 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-96-2000. Суміші бетонні. Технічні умови. [Чинний 2000-02-23]. – Київ : Держстандарт України, 2000. 40 с.
8. ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Суміші бетонні. Методи випробувань. [Чинний 2002-01-31]. Київ : Держстандарт України, 2002. 32 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Будівельні матеріали. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. [Чинний 2011-01-06]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 26 с. (Національні стандарти України).
10. Booshehrian A., Hosseini P. *Effect of nano-SiO₂ particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements*. Concrete Research Letters, 2(1), 2011, pp. 167-180. URL: [https://www.researchgate.net/publication/277720907_Effect_of_nano-SiO₂ particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements](https://www.researchgate.net/publication/277720907_Effect_of_nano-SiO2_particles_on_properties_of_cement_mortar_applicable_for_ferrocement_elements)
11. Li H., Xiao H., Yuan J., Ou J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. Composites Part B: Engineering, 35(2), 2004, pp. 185-189. DOI:10.1016/S1359-8368(03)00052-0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836803000520>
12. Вировий В. Н. та ін. Механоактивація в технології бетонів. ОДАСА. 2014. 148 с.
13. Барабаш І. В., Давідчук В. Г., Стрельцов К.О. Механоактивація портландцементу та її вплив на характеристики будівельних композицій різного призначення ів. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. №. 2. С. 77–87.

Присяник Максим Леонідович – студент групи 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: max.prosyanik@gmail.com

Маєвська Ірина Вікторівна – доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com

Prosyanyk Maksym – student of group 1B-24m, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: max.prosyanik@gmail.com

Maievskaya Irina – associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com