

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДОБАВКИ ЯК ЗАМІННИКА МІКРОКРЕМНЕЗЕМУ В РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНАХ**EFFICIENCY OF USING A COMPLEX ADMIXTURE AS A MICROSILICA REPLACEMENT IN REACTIVE POWDER CONCRETE**

Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Коваль М.О., магістрант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Bordiuzhenko O., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Dvorkin L., doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Koval M., master's student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Наведено результати досліджень міцнісних властивостей реакційно-порошкових бетонів з використанням різних активних мінеральних добавок. Продемонстровано, що заміна вартісного мікрокремнезему на комплексну добавку, що включає метакаолін та золу-виносу є можливою і дозволяє при незначному зменшенні міцності суттєво знизити сумарну вартість бетону.

One of the most important ways to use resource-saving technologies in producing concrete and reinforced concrete products is to use active mineral admixtures. Microsilica is one of the most popular and effective admixtures of this type. However, the use of microsilica is not always economically reasonable due to its high cost. This paper presents the results of comparative studies of the effect of various active mineral admixtures on the properties of reactive powder concrete. Five different admixtures were investigated: ground quartz sand, blast furnace slag, fly ash, metakaolin and microsilica. The highest strength values were achieved for RPCs containing microsilica and fly ash together with metakaolin. The RPC compositions containing fly ash and metakaolin reached an average compressive strength of approximately 100 MPa and a flexural strength of over 16 MPa after 28 days. This is only on average 10-20% less than concrete containing microsilica. In particular, it shows the possibility of replacing the costly microsilica by the proposed composite mineral admixture consisting of fly ash and metakaolin. It has been shown that using such an admixture makes it possible to produce reactive powder concretes with strengths similar to those of concrete with silica fume. At the same time, the cost of such an admixture is significantly

lower.

Ключові слова:

Реакційно-порошковий бетон, активні мінеральна добавка, мікрокремнезем, комплексна добавка, міцність.

Reactive powder concrete, active mineral admixture, microsilica, complex admixture, strength.

Вступ. Аналіз досліджень. До ефективних різновидів дрібнозернистого бетону, що володіють підвищеною однорідністю, міцністю, деформативністю належить розроблений у Франції в 90-х роках ХХ ст. реакційно-порошковий бетон (РПБ) [1]. Міцність при стисненні РПБ зазвичай знаходиться в межах 150...200 МПа, а за спеціальних умов може досягати 500...800 МПа [2].

Однією з умов забезпечення високих механічних властивостей РПБ є поліпшення властивостей цементувальної матриці шляхом введення високоактивної мінеральної добавки – мікрокремнезему у поєднанні з добавкою суперпластифікатора, що має високий водоредукуючий ефект [3-6].

Уже першими дослідженнями РПБ було встановлено, що для створення бетонів з високою міцністю вміст мікрокремнезему має становити 25...30% від маси цементу. У зв'язку зі зниженням інгібуючої дії арматури в малолужному середовищі бетону з підвищенням вмісту мікрокремнезему рекомендовано обмежити його вміст до 10...15% від маси цементу [7].

Поряд із високим технічним ефектом, введення мікрокремнезему у високоміцні бетони, зокрема й РПБ, пов'язане з певними проблемами: обмеженістю виробництва товарного продукту зі стабільними фізичними властивостями та хімічним складом, високою вартістю, складнощами, пов'язаними з його транспортуванням, зберіганням і дозуванням [8]. Це призводить до доцільності визначення можливості використання в РПБ альтернативних мінеральних добавок.

Метою даної роботи є порівняння міцнісних властивостей РПБ з різними мінеральними добавками та оцінка можливості часткової або повної заміни мікрокремнезему більш доступними добавками. Новизною даного дослідження є розробка комплексної добавки, компоненти якої мають синергетичний вплив на властивості РПБ. З цією метою використано золу-винесення, яка має низьку пуццоланову активність і водопотребу, та метакаолін, який має високу пуццоланову активність і водопотребу. Передбачалося, що комбінація цих домішок матиме синергетичний ефект на властивості РПБ.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження виконані з використанням портландцементу СЕМ-І-42,5 з вмістом C_3A – 6,5%, C_3S – 61,5%, питомою поверхнею 380 м²/кг. В якості заповнювача використовували кварцовий пісок фракції 0,16...1,25 мм.

В якості мінеральних добавок при проведенні експериментальних досліджень було використано мелений кварцовий пісок з питомою

поверхнею $S_n=3786 \text{ см}^2/\text{г}$, доменний гранульований шлак ($S_n=273 \text{ м}^2/\text{кг}$), зола виносу Бурштинської ТЕС ($S_n=252 \text{ м}^2/\text{кг}$), метакаолін ($S_n=1012 \text{ м}^2/\text{кг}$). Для порівняння був також отриманий реакційно-порошковий бетон на мікрокремнеземі SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_n=23158 \text{ см}^2/\text{г}$).

Під час проведення експериментів визначали водопотребу бетонної суміші до досягнення необхідної рухомості текучої суміші. Рухомість контролювалась шляхом вимірювання розпливу за віскозиметром Сутгарда (25...30 см). З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ та балки $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$. Склади бетону наведені у табл. 1. В усіх точках експерименту було використано поліакрилатний суперпластифікатор Marec Dupamon SP3. Визначали міцність при стиску та при згині у віці 1, 7, 28 діб твердіння у нормальних умовах. Також для вибору ефективних складів реакційно-порошкових бетонів було розраховано показник питомої ефективності використання цементу на одиницю міцності бетону: $\mathcal{C}_f = \mathcal{C} / f_{cm}$.

Експериментальні результати та їх аналіз. Результати виконаних експериментів по порівнянню впливу різних мінеральних добавок на міцнісні властивості РПБ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технологічні показники та міцнісні властивості реакційно-порошкових бетонів

Витрата основних компонентів, кг/м ³	Позначення РПБ				
	РПБ1	РПБ2	РПБ3	РПБ4	РПБ5
Порландцемент	700	700	700	700	700
Пісок кварцовий 0,16...1,25 мм	1130	1130	1130	1130	1130
Пісок кварцевий мелений	350				
Шлак доменний гранульований мелений		350			
Зола			350	275	
Метакаолін				75	350
СП, % від цементу	1,5	1,35	1,65	1,42	1,62
В/Ц	0,271	0,277	0,289	0,273	0,279
Міцність при стиску, МПа					
f_{cm}^1	32,6	31,5	32,4	34	39,6
f_{cm}^7	65,9	68,1	63,5	72,2	76,2
f_{cm}^{28}	96,2	94,3	93,5	101,6	118,6
Міцність на розтяг при згині, МПа					
$f_{c,tf}^1$	8,5	8,2	7,9	8,4	11,6
$f_{c,tf}^7$	10,2	11,1	10,5	11,1	14,3
$f_{c,tf}^{28}$	14,2	14,9	14,92	16,2	18,7
Відносні та питомі показники					
$f_{cm}^{28} / f_{c,tf}^{28}$	6,77	6,33	6,11	6,27	6,34
$\mathcal{C} / f_{c,tf}^{28}$, кг/МПа	49,3	47,0	45,8	43,2	37,4
$\mathcal{C} / f_{cm}^{28}$, кг/МПа	7,3	7,4	7,5	6,9	5,9

Аналіз отриманих даних вказує на те, що найкращими міцнісними характеристиками відзначається реакційно-порошковий бетон п'ятого складу (РПБ5). Використання мікрокремнезему в якості активного мінерального наповнювача дозволило отримати міцність при стиску у віці 28 діб 119 МПа а міцність при згині – понад 18 МПа Введення добавки у вигляді композиції зола + метакаолін (275+75 кг/м³) виявилось більш ефективним у порівнянні з меленим кварцовим піском, шлаком і золюю. Середнє значення міцності при стиску у віці 28 діб для бетону такого складу склало майже 102 МПа а міцності при згині – понад 16 МПа (рис. 1).

Синергетичний ефект цієї композиційної добавки можна пояснити позитивним впливом сферичних частинок золи на легкоукладальність бетонних сумішей, що певною мірою компенсує підвищення в'язкості, викликане додаванням метакаоліну.

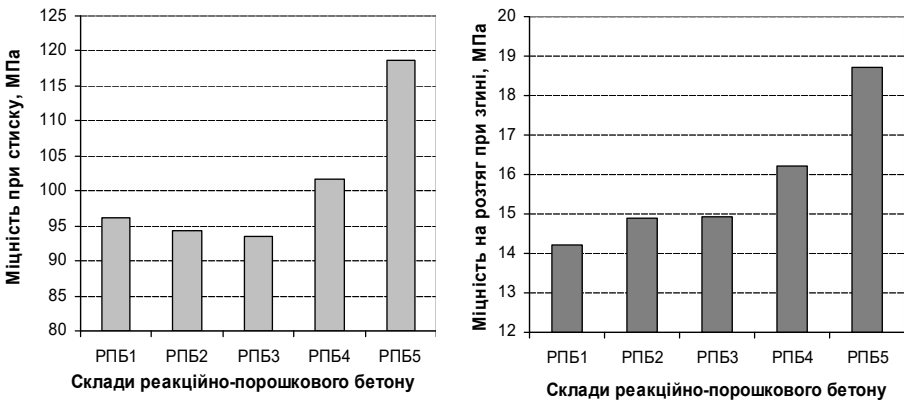


Рис. 1. Вплив виду та складу реакційно-порошкових бетонів на їх міцнісні властивості у віці 28 діб

При цьому характерно, що склад бетонної суміші із золюю та метакаоліном у порівнянні зі складом лише із золюю (РПБ4 і РПБ3) характеризувався меншою водопотребою і витратою суперпластифікатора та, відповідно, водо-цементним відношенням. Суміші на РПБ4 характеризувалися кращою легкоукладальністю а випробувані зразки візуально містили меншу кількість пор. Значення В/Ц знаходилось в межах 0,27...0,29, а водо-тверде відношення – 0,087...0,093.

Кінетика зміни міцності РПБ (рис. 2) відповідає відомим даним [9]. Загалом міцність при стиску досліджуваних РПБ у віці 1 доба складає в середньому 33...35% від міцності у 28 діб, а у 7 діб – близько 70%. Міцність при згині росте більш стрімкіше у початкові терміни твердіння і у віці 1 доба складає 50...60% від міцності у віці 28 діб.

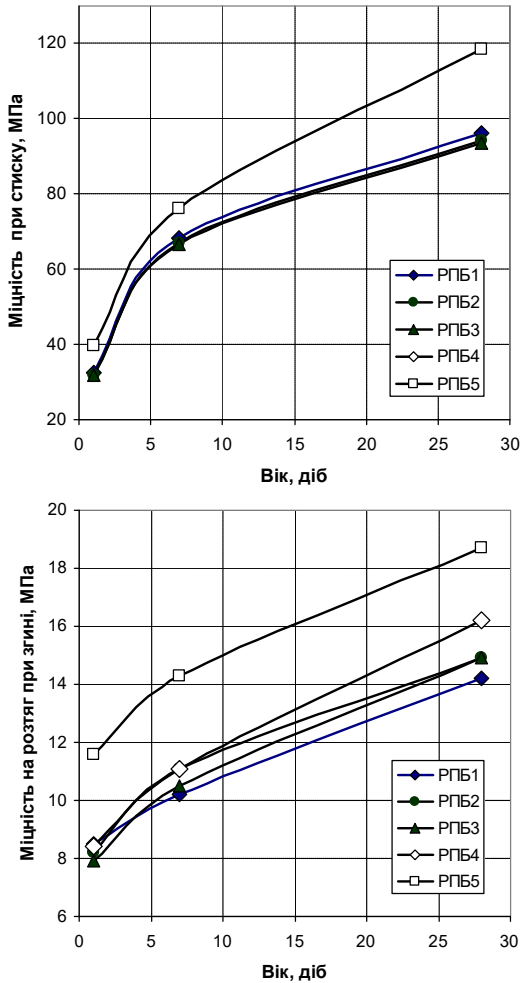


Рис. 2. Кінетика міцності реакційно-порошкових бетонів

Для всіх складів реакційно-порошкових бетонів співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$, що визначає дуктильний (пластичний) характер руйнування зразків [10] складає в середньому 6,5 (табл. 1), тоді як для високоміцних дрібнозернистих бетонів цей показник знаходиться в межах 10...11 [11].

Відношення показника питомої ефективності використання цементу складає (по міцності у віці 28 діб) 37...49 кг/МПа міцності на розтяг при згині та 6...7.5 по міцності при стиску.

Для оцінки економічної ефективності запропонованої заміни мікрокремнезему на комплексну добавку, що включає метакаолін та золу-винесення, було проведено порівняння складів РПБ4 та РПБ5 (табл. 1). При однаковій витраті цементу та аналогічній витраті заповнювача і суперпластифікатора, ці композиції відрізняються лише використовуваними добавками – мікрокремнезем для РПБ5 і комплексна добавка (метакаолін + зола-винесення) для РПБ4. Приймаючи вартість золи-виносу 1,5 грн/кг, метакаоліну 25 грн/кг і мікрокремнезему 80 грн/кг (вартість мікрокремнезему залежить від багатьох факторів і може досягати 150 грн/кг і навіть більше) а також при значеннях витрат добавок, наведених в табл. 1, були отримані наступні вартості компонентів для отримання 1 м³ бетону:

- мікрокремнезем – 8960 грн; - комплексна добавка – 2287 грн.

Таким чином, нехтуючи іншими незначними відмінностями у складах бетонів RPC4 та RPC5, можна зазначити, що заміна мікрокремнезему на комплексну добавку дозволяє знизити вартість бетону щонайменше на 6670 грн на 1 м³ бетону.

Висновки

1. Результати дослідження впливу різних видів активних мінеральних домішок на міцнісні властивості РПБ показують можливість отримання бетонів зі значеннями міцності при стиску понад 100 МПа та міцності при згині понад 16 МПа.

2. Встановлено, що комбінація метакаоліну із золою-виносу є ефективною композиційною мінеральною добавкою. РПБ із цією добавкою показали міцність на стиск та згин, які відрізняються лише на 10-20% залежно від складу та строків тверднення.

3. Отримані результати дозволяють запропонувати використання композиційної добавки, що містить золу-виносу та метакаолін, як заміну високовартісного мікрокремнезему, що, в свою чергу, призведе до значної економії коштів та підвищення ефективності будівництва

1. Richard, P, Cheyreyzy, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 1995, 25.7: 1501-1511.

2. Liu, S. H., Yan, P. Y., Feng, J. W. Research and application of RPC in the bridge engineering. *Highway*, 2009, 58.3: 149-154.

3. Shaheen, E., Shrive, N.G. Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*, 2006, 103.6: 444.

4. Richard, P., Cheyreyzy, M. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *Special Publication*, 1994, 144: 507-518.

5. Rebentrost, M., Wight, G. Perspective on UHPCs from a specialist construction company. *Designing and Building with UHPFRC*, 2011, 189-208.

6. Kadhum, M. M. Studying of some mechanical properties of reactive powder concrete using local materials. *Journal of Engineering*, 2015, 21.07: 113-135.

7. Šoukal, F., et al. The Effects of Silica Fume and Superplasticizer Type on the Properties and Microstructure of Reactive Powder Concrete. *Materials*, 2023, 16.20: 6670.

8. Дворкін, Л. Й. Модифіковані золовмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. В. Гарніцький НУВГП. Рівне. 2013. 325 с.

Dvorkin, L.Y. Modified ash-containing dry building mixtures for masonry and adhesive mortars / L.Y. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Y.V. Garnitsky. NUWHP. Rivne. 2013. 325 p.

9. Collepardi, M., et al. Innovative concretes (SCC, HPC and RPC) in the field of architectural, civil and environmental engineering. In: *Proceedings of the Workshop on New Technologies and Material in Civil Engineering, Milan*. 2003. p. 1-8.

10. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі : монографія / Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко, В. В. Житковський [та ін.] ; за ред. д-ра техн. наук, проф. Л. Й. Дворкіна. Рівне : НУВГП, 2020. 305 с.

Reactive powder concretes and materials on their basis: a monograph / L. Dvorkin, O. Bordiuzhenko, V. Zhytkovsky [et al]: NUWHP, 2020. 305 p.

11. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія / Л. Й. Дворкін, С. М. Бабич, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко [та ін.]. Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.

High-strength rapid-hardening concretes and fibre concretes: monograph / L. Dvorkin, E. Babych, V. Zhytkovsky, O. Bordiuzhenko [et al]: NUWGP. 2017. 331 p.