УДК 666.9.022

МЕХАНОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ З ДОБАВКАМИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ

Кірсанов М. В.[1], Стрельцов К. О.[1], Барабаш І. В.[1]
[1]*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Розглянуті у статті експериментальні результати пов'язані з визначенням впливу механохімічної активації змішаного портландцементу в присутності суперпластифікуючої добавки $SP-5$ на міцність цементного каменю на стиск у віці 3-х та 7-и діб. Такий цемент отримували змішуванням портландцементу ПЦ-І 500 з меленим кварцовим піском $(S = 350\, м^2/кг)$ в кількості від 30 до 60 %. Перспективним методом покращення міцності на стиск цементного каменю є інтенсивна механохімічна активація змішаного цементу в швидкісному активатору турбулентного типу в присутності суперпластифікуючої добавки, кількість якої варіювалася в діапазоні від 0 до 1 % маси змішаного в'яжучого.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням Д-оптимального математичного плану з варіюванням наступних факторів: X_1 – витрата меленого кварцового піску (45±15) % від маси змішаного в'яжучого; X_2 – кількість суперпластифікуючої добавки $SP-5$ – $(0,5 \pm 0,5)$ % від маси змішаного в'яжучого. Одержані математичні моделі свідчать про те, що максимальний вплив (із перерахованих факторів) на міцність цементного каменю надає вміст меленого піску у змішаному в'яжучому. Наступним за впливом на міцність цементного каменю є витрата суперпластифікатору $SP-5$. Сумісний вплив механохімічної активації та суперпласифікатору дозволяє підвищити міцність цементного каменю в діапазоні від 23 до 42 %, що дозволяє в значній мірі підвищити діапазон витрати меленого кварцового піску, як мінеральної добавки до цементу.

Ключові слова: механоактивація, портландцемент, суперпластифікатор, мінеральна добавка, міцність на стиск, фактори варіювання.

MECHANOCHEMICAL ACTIVATION OF PORTLAND CEMENT WITH THE ADDITION AND THEIR INFLUENCE ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE

M. Kirsanov[1], K. Streltsov[1], I. Barabash[1]
[1]*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: The experimental results considered in the article are related to determining the influence of mechanochemical activation of mixed Portland cement in the presence of a superplasticizing additive on the compressive strength of cement stone at the age of 3 and 7 days. Such cement was obtained by mixing Portland cement PC-I 500 with ground quartz sand in an amount of 30 to 60%. A promising method for improving the compressive strength of cement stone is intensive mechanochemical activation of mixed cement in a high-speed activator of a turbulent type in the presence of a superplasticizing additive, the amount of which varied in the range from 0 to 1% by weight of the mixed binder.

Experimental studies were conducted using the D-optimal mathematical plan with variations in the following factors: X_1 – consumption of ground quartz sand (45±15) % of the mass of the mixed binder; X_2 – amount of superplasticizer additive $SP-5$ – $(0,5 \pm 0,5)$ % from the mass of the mixed binder. The obtained mathematical models indicate that the maximum influence (of the listed factors) on the strength of cement stone is exerted by the content of ground sand in the mixed binder. The next

in influence on the strength of cement stone is the consumption of superplasticizer $SP-5$. The combined effect of mechanochemical activation and superplasticizer allows to increase the strength of cement stone in the range from 33 to 42 %, which allows to significantly increase the range of consumption of ground quartz sand as a mineral additive to cement.

Keywords: mechanical activation, Portland cement, superplasticizer, mineral additive, compressive strength, variation factors.

1 ВСТУП

Важливою проблемою в технології виготовлення змішаних цементів є створення оптимальних комбінацій портландцементу з мінеральними добавками, наявність яких надає можливість підвищити потенційні можливості в'яжучого. В якості мінеральної добавки до цементів широке розповсюдження одержали кварцові піски, наявність яких у їх складі забезпечує не тільки зниження собівартості змішаного в'яжучого, але і надає йому ряд позитивних властивостей (зменшення величини екзотермічного розігріву, зниження усадки та ін.). В статті розглядаються питання, які пов'язані з розглядом впливу механохімічної активації портландцементу, кількості добавки меленого кварцового піску та суперпластифікатору на міцність на стиск цементного каменю. Сумісне використання меленого кварцового піску, суперпластифікатору $SP-5$ та механохімічної активації змішаного в'яжучого сприяє отриманню цементного каменю з покращеною міцністю на стиск.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одним з найбільш розповсюджених способів зниження собівартості портландцементу є введення до його складу тонкомелених інертних мінеральних добавок, зокрема, меленого піску [1-5]. Технологічно такий цемент отримують як сумісним помелом портландцементного клінкеру, двоводного гіпсу та мінеральної добавки так і ретельним змішуванням портландцементу з меленою мінеральною добавкою [6-9].

В роботах [10-14] переконливо показано, що ефект від введення в портландцемент мінеральних добавок значно підсилюються в турбулентних потоках, які досягаються в процесі механохімічної активації змішаного цементу. Застосування швидкісних змішувачів для активації цементу в поєднанні з використанням меленого кварцового піску та суперпластифікатору, на наш погляд, забезпечить прискорення процесів тверднення цементу, що дозволить відмовитись як від термовологої обробки так і від використання дефіцитних швидкотверднучих цементів.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вище викладене зумовило мету досліджень, яка полягає у визначенні впливу механохімічної активації портландцементу з добавкою меленого кварцового піску (30…60 %) та суперпластифікатору $SP-5$ $(0\ldots1\,\%)$ на міцність на стиск цементного каменю у 3-х та 7-и добовому віці.

Активація портландцементу здійснювалася за рахунок інтенсивного впливу на водну цементу та цементно-піщану суміш $(S_{піску} = 350\ м^2/кг)$ у швидкісному змішувачі турбулентного типу впродовж 2-х хвилин. Використання швидкісного змішувача сприяє фізико-хімічній активації поверхневого шару як тонкодисперсних зерен портландцементу так і меленого кварцового піску. Наявність такої активації забезпечує інтенсифікацію процесів гідратації цементу, що віддзеркалюється на зростанні міцності цементного каменю, особливо в ранні терміни твердіння. Турбулентний змішувач характеризується високою швидкістю обертів робочого органу, яка складає 1800 об/хв.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням в якості в'яжучого портландцементу марки ПЦ-І 500 ПАТ «Волинь Цемент». За своїми властивостями портландцемент відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Цементи загальнобудівного призначення. Технічні умови». Цементно-піщане в'яжуче

отримували шляхом ретельного змішування портландцементу та меленого кварцового піску, витрата якого коливалося в діапазоні від 30 до 60 % маси змішаного в'яжучого. Питома поверхня меленого кварцового піску приймалася рівною $350\,м^2/кг$. Пластифікація суміші здійснювалася за рахунок використання суперпластифікатору $SP-5$, витрата якого, як відмічалося раніше по тексту, коливається в діапазоні від 0 до 1 % маси змішаного в'яжучого.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для визначення сумісного впливу механоактивації, а також добавки до цементу меленого кварцового піску та витрати суперпластифікатору $SP-5$ на міцність цементного каменю у віці 3-х та 7-и діб, був проведений 2-х факторний експеримент, де в якості незалежних перемінних були прийняті: X_1 – витрата меленого кварцового піску (45±15) % від маси змішаного в'яжучого; X_2 – кількість суперпластифікуючої добавки $SP-5$ – $(0,5\pm0,5)$ % від маси змішаного в'яжучого. Для контролю умовами експерименту передбачалося одержання для всіх рядків математичного плану рівнов'язких сумішей (діаметр розпливу їх на приборі Сутторда складав 120 мм), які не були піддані механохімічній активації, табл. 1.

Таблиця 1

План експерименту та витрати компонентів

№	Рівні варіювання		Витрата компонентів цементного тіста на один заміс, г				В/Т	Розплив цементного тіста, мм	
	X_1	X_2	Портландцемент, г	Мелений пісок, г	SP-5, г	Вода замішування, г		контроль	Механо-активація
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	-1	-1	1400	600	0	757	0,38	122	139
2	-1	0	1400	600	10	672	0,34	120	145
3	-1	1	1400	600	20	623	0,31	120	156
4	0	-1	1100	900	0	736	0,37	119	137
5	0	0	1100	900	10	640	0,32	120	141
6	0	1	1100	900	20	582	0,29	118	151
7	1	-1	800	1200	0	720	0,36	120	136
8	1	0	800	1200	10	617	0,31	121	140
9	1	1	800	1200	20	579	0,30	122	148

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 1, свідчить про те, що механохімічна активація протягом 2-х хвилин цементно-вміщуючої композиції з добавкою меленого кварцового піску (45±15 % від маси змішаного в'яжучого) сприяє зростанню діаметру розпливу суміші в середньому на 14…21 %.

Міцність цементного каменю на стиск у 3-х та 7-и добовому віці як на механоактивованому змішаному в'яжучому так і на в'яжучому, яке не підлягало механоактивації (контроль), наведені у табл. 2.

Таблиця 2

План експерименту та міцність цементного каменю на стиск тривалістю 3-и та 7-м діб

№	Рівні варіювання		Відгуки			
			$R_{cm}^{к}$, *МПа*		$R_{cm}^{м}$, *МПа*	
	X_1	X_2	3 доби	7 діб	3 доби	7 діб
1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	20,1	32,3	26,4	43,2
2	-1	0	24,2	36,6	33,5	48,2
3	-1	1	26	40,3	36,2	54,3
4	0	-1	15,8	23,4	20,3	32,7
5	0	0	18,5	28,5	24,6	36,9
6	0	1	21	32,1	29,7	42,4
7	1	-1	12,7	21,1	16,4	28,4
8	1	0	15,3	23,6	21,1	32,3
9	1	1	17,1	27,0	23,9	36,1

Примітка: $R_{cm}^{к}$ – міцність цементного каменю на змішаному в'яжучому, яке не підлягало механоактивації, *МПа*; $R_{cm}^{м}$ – міцність цементного каменю на механоактивованому змішаному в'яжучому, *МПа*.

Внаслідок статистичної обробки експериментальних даних були отримані математичними моделі (1…4), які з високою вірогідністю (≥0,95) відображають вплив досліджуємих факторів на міцність на стиск цементного каменю як на звичайному (немеханоактивованому) змішаному в'яжучому (1, 2) так і на механоактивованому змішаному в'яжучому (3, 4):

$$R_{cm}^{к.3}(МПа) = 18,8 - 4,2X_1 + 0,8X_1^2 - 0,4X_1X_2 + 2,6X_2 - 0,6X_2^2 \quad (1)$$

$$R_{cm}^{к.7}(МПа) = 28,3 - 6,3X_1 + 2,2X_1^2 - 0,5X_1X_2 + 3,8X_2 - 0,2X_2^2 \quad (2)$$

$$R_{cm}^{м.3}(МПа) = 25,7 - 5,8X_1 + 1,4X_1^2 - 0,6X_1X_2 + 4,5X_2 - 0,9X_2^2 \quad (3)$$

$$R_{cm}^{м.7}(МПа) = 37,1 - 8,2X_1 + 3,1X_1^2 - 0,9X_1X_2 + 4,8X_2 + 0,4X_2^2 \quad (4)$$

де $R_{cm}^{к.3}, R_{cm}^{к.7}$ – міцність на стиск цементного каменю на змішаному в'яжучому, яке не підлягало механоактивації, *МПа*;
$R_{cm}^{м.3}, R_{cm}^{м.7}$ – міцність на стиск цементного каменю на механоактивованому змішаному в'яжучому, *МПа*.

Аналіз математичних моделей (1…4) дозволяє зробити висновок про те, що максимальний вплив на міцність цементного каменю як на механоактивованому змішаному в'яжучому так і на змішаному в'яжучому, яке не піддавалося механоактивації, надає витрата меленого кварцового піску. Як і передбачалося, зростання його кількості в змішаному в'яжучому для цементного каменю тривалістю в 7-м діб з 30 до 60 % (механоактивація відсутня) сприяє зниженню міцності цементного каменю з 32,3 МПа до 20,2 МПа, тобто майже на 63 % (суперпластифікатор відсутній). Для цементного каменю на механоактивованому в'яжучому, зростання кількості

меленого піску з 30 до 60 % також викликає зниження міцності цементного каменю, але вже з 43,1 до 26,7 МПа. Слід визначити, що в цьому разі механоактивація сприяє підвищення міцності цементного каменю з 20,2 МПа (контроль) до 26,7 МПа, тобто більше ніж на 32 %. Сумісне використання механоактивації та 1 % суперпластифікатору забезпечує отриманню міцності на стиск цементного каменю тривалістю в 7-м діб становить 38,6 МПа (при наявності 60 % меленого піску у змішаному в'яжучому), тобто майже на 20 % більшою у порівнянні з контролем.

Аналізуючи вплив варійованих факторів на міцність цементного каменю слід відзначити, що сумісне застосування механоактивації змішаного в'яжучого у сукупності з використанням суперпластикуючої добавки дозволяє в широкому діапазоні керувати міцністю цементного каменю на стиск тривалістю в 3-и та 7-м діб.

Аналіз математичних моделей (1-4) дозволяє визначити значення варійованих факторів X_1 та X_2, при використанні яких забезпечуються максимальна та мінімальна міцність цементного каменю в досліджуваному інтервалі часу, табл. 3.

Таблиця 3

Значення факторів X_1 та X_2, які забезпечують досягнення максимальної та мінімальної міцності цементного каменю

а)

	В'яжуче механоактивоване					
	Термін твердження					
	3 доби		$R_{ст}, МПа$	7 діб		$R_{ст}, МПа$
	X_1	X_2		X_1	X_2	
min	+1	-1	16,5	+1	-1	28,5
max	-1	+1	37,1	-1	+1	54,5

б)

	Механоактивація в'яжучого відсутня (контроль)					
	Термін твердження					
	3 доби		$R_{ст}, МПа$	7 діб		$R_{ст}, МПа$
	X_1	X_2		X_1	X_2	
min	+1	-1	12,6	+1	-1	20,7
max	-1	+1	26,2	-1	+1	40,9

Аналізуючи вплив варійованих факторів на міцність цементного каменю як на механоактивованому змішаному в'яжучому так і на в'яжучому, яке не підлягало механоактивації слід відмітити, що за рахунок варіювання факторами впливу (механохімічна активація, витрата меленого кварцового піску та концентрація суперпластифікатору) можливо регулювати міцність цементного каменю на стиск в 3-х добовому віці з 12,6 МПа до 37,1 МПа, а в 7-и добовому віці – від 20,7 МПа до 54,5 МПа.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одержані експериментальні результати свідчать про те що:

а) механохімічна активація водної цементно-вміщуючої композиції з добавкою меленого кварцового піску (45±15 %) забезпечує зростання діаметру розпливу суміші в середньому на 14…21 %(в порівнянні з контролем);

б) механохімічна активація портландцементу з добавкою меленого кварцового піску (45±15 %) та суперпластифікатору SP-5 (1%) забезпечує зростання міцності

цементного каменю трилістю в 3-и та 7-м діб в середньому на 23…42 % (в порівнянні з контролем).

6 ВИСНОВКИ

Механохімічна активація портландцементу з добавкою меленого кварцового піску (30…60 %) в присутності Суперпластифікатору SP-5 є ефективним рецептурно-технологічним впливом, який забезпечує зростання міцності цементного каменю на стиск в ранньому віці (3…7 діб) в середньому на 23…42 % (в порівняні з контролем).

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Гоц В.І. Бетони і будівельні розчини. Київ: УВПК «ЕксОб». 2003. 468с.
2. Рунова Р.Ф., Гоц В.І., Саницький М.А. та ін. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво. К.:УВПК «ЕксОб». 2008. 360с.
3. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Гарніцький Ю.В. Модифіковані золовмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів. НУВГП. Рівне. 2013. 325с.
4. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк У.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони. Монографія. Львів: ТОВ «Простір-М». 2021. 206с.
5. Кондратьєва Н.В. Нанотехнології у виробництві будівельних матеріалів. Будівництво України. № 6. 2012. С.2-9.
6. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Рихліцька О.В., Яніцький О.Б. Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Вип. 38. Рівне. 2020. С.258-266.
7. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В. та ін. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: Монографія. Рівне: НУВГП. 2017. 424с.
8. Саницький М.А., Позняк О.Р., Кіракевич І.І., Топилко Н.І. Сучасні бетони на основі комплексних модифікаторів нової генерації. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2008. №2(29). С.98-102.
9. Рунова Р.Ф., Косовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. Київ: КНУБА. 2007. 236с.
10. Хайніке Г. Трибохімія. Переклад з нім. 1987. 584с.
11. Барабаш І.В., Пірогов Д.О. Активація цементу і її вплив на структуроутворення цементновміщуючих композицій. Зб. наукових праць «Сучасне будівництво та архітектура». Вип. 6. Одеса, ОДАБА. 2023. С.82-89.
12. Linbo Jiang, Zhi Wang, Xueliang Gao. Effect of nanoparticles and surfactans on properties and microstructures of foam and foamed concrete. Construction and Building Materials. 2024. Vol.411.
13. Barabash I.V., Babiy I.M., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-Water compositions, solutions and concretes on their basis. Modern construction and architecture. Issue № 2. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2022. P.44-51.
14. Вировой В.М. та ін. Механоактивація в технології бетонів. ОДАБА. 2014. 148с.

References

1. Гоц, В. І. (2003). *Бетони і будівельні розчини*. Київ: УВПК «ЕксОб».
2. Рунова, Р. Ф., Гоц, В. І., Саницький, М. А., та ін. (2008). *Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво*. Київ: УВПК «ЕксОб».

3. Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., & Гарніцький, Ю. В. (2013). *Модифіковані золовмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів*. Рівне: НУВГП.
4. Саницький, М. А., Кропивницька, Т. П., & Гев'юк, У. М. (2021). *Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони* [Монографія]. Львів: ТОВ «Простір-М».
5. Кондратьєва, Н. В. (2012). Нанотехнології у виробництві будівельних матеріалів. *Будівництво України, № 6*, 2–9.
6. Саницький, М. А., Кропивницька, Т. П., Рихліцька, О. В., & Яніцький, О. Б. (2020). Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць, Вип. 38*, 258–266.
7. Дворкін, Л. Й., Житковський, В. В., Марчук, В. В., та ін. (2017). *Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини* [Монографія]. Рівне: НУВГП.
8. Саницький, М. А., Позняк, О. Р., Кіракевич, І. І., & Топилко, Н. І. (2008). Сучасні бетони на основі комплексних модифікаторів нової генерації. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка, №2*(29), 98–102.
9. Рунова, Р. Ф., & Косовський, Ю. Л. (2007). *Технологія модифікованих будівельних розчинів*. Київ: КНУБА.
10. Хайніке, Г. (1987). *Трибохімія* [Переклад з нім.].
11. Барабаш, І. В., & Пірогов, Д. О. (2023). Активація цементу і її вплив на структуроутворення цементновміщуючих композицій. Сучасне будівництво та архітектура, Вип. 6, 82–89.
12. Jiang, L., Wang, Z., & Gao, X. (2024). Effect of nanoparticles and surfactants on properties and microstructures of foam and foamed concrete. Construction and Building Materials, 411, Article 125678. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.125678
13. Barabash, I. V., Babiy, I. M., & Streltsov, K. O. (2022). Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-water compositions, solutions and concretes on their basis. Modern Construction and Architecture, Issue 2, 44–51.
14. Вировой, В. М., та ін. (2014). Механоактивація в технології бетонів. Одеса: ОДАБА.

Кірсанов Микола Володимирович
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірант
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
niki.reserve@gmail.com
ORCID: 0009-0009-2377-159X
Стрельцов Костянтин Олександрович
Одеська державна академія будівництва та архітектури
к.т.н., доцент,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
0989051837@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5463-7395
Барабаш Іван Васильович
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
dekansti@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0241-4728

Для посилань:
Кірсанов М. В., Стрельцов К. О., Барабаш І. В. Механохімічна активація портландцементу з добавками та їх вплив на міцність цементного каменю. Механіка та математичні методи, 2025. Т. VII. № 2. С. 58–65.

For references:
M. Kirsanov, K. Streltsov, I. Barabash (2025). Mechanochemical activation of portland cement with the addition of ground quartz sand and superplasticizer SP-5 and their influence on the strength of cement stone. Mechanics and Mathematical Methods. VII (2). 58–65.