

Іван БАРАБАШ,

д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0003-0241-4728

Микола КІРСАНОВ,

аспірант кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів

ORCID: 0009-0009-2377-159X

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

МЕХАНОАКТИВАЦІЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ З МЕЛЕНИМ КВАРЦОВИМ ПІСКОМ І ЇЇ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ НА СТИСК

У виробництві бетонних та залізобетонних виробів широке розповсюдження отримали портландцементи з тонкодисперсними мінеральними добавками. До найбільш розповсюджених мінеральних добавок слід віднести мелені кварцові піски. Такі змішані цементні можливо отримувати за технологіями, які пов'язані: а) з сумісним помелом портландцементного клінкера, двоводного гіпсового каменю та кварцового піску; б) із змішуванням портландцементу з висушеним до постійної маси меленим кварцовим піском. Для покращення механічних характеристик як цементного каменю так і бетону на його основі, широке розповсюдження отримала інтенсивна механохімічна активація змішаного в'язучого в швидкісних змішувачах примусової дії. Отримані у статті експериментальні результати відображають вплив механохімічної активації портландцементу з добавкою меленого кварцового піску в присутності суперпластифікатора SP-5 на міцність бетону на стиск у віці 3-х, 7-и та 28-и діб твердіння в н.у. Активованій портландцемент отримували шляхом швидкісного змішування висококонцентрованої суспензії портландцементу ПЦ І-500 з віддозованою кількістю меленого кварцового піску. Витрата меленого піску варіювалася в діапазоні від 30 до 60 % маси змішаного в'язучого.

Блок експериментальних досліджень проводився з використанням Д-оптимального математичного плану з варіюванням наступних незалежних факторів: X_1 – витрата змішаного в'язучого в діапазоні (370 ± 50) кг/м³; X_2 – витрата меленого кварцового піску (45 ± 15) % від маси змішаного в'язучого; X_3 – витрата суперпластифікуючої добавки SP-5 $(0,5 \pm 0,5)$ % від маси змішаного в'язучого.

Математичні моделі свідчать про те, що максимальний вплив на міцність бетону в 3-х, 7-и та 28-и добовому віці надають фактори X_2 та X_3 . Зростання вмісту меленого кварцового піску у складі змішаного в'язучого від 30 до 60 % викликає зменшення міцності бетону для всіх визначених термінів твердіння, тоді як підвищення витрати SP-5 від 0 до 1 % забезпечує практично такий же процент підвищення міцності бетону. Сумісний вплив від використання механоактивації портландцементу з меленим кварцовим піском та використання SP-5 в кількості 1,0 % сприяє підвищенню міцності бетону (в порівнянні з контролем – механоактивація відсутня) в середньому на 25...50 %.

Ключові слова: змішаний портландцемент; механоактивація; портландцемент; суперпластифікатор; мелений кварцовий пісок; міцність на стиск.

Вступ. Однією з важливих проблем в технології приготування бетонних сумішей є створення оптимальних співвідношень між портландцементом та витратою мінеральних добавок, наявність яких забезпечує підвищення потенційних можливостей змішаних портландцементів та бетонів на їх основі. Серед найбільш розповсюджених мінеральних добавок до цементів є мелені вапняки, золи-виносу, мелені доменні та кварцові піски. Наявність їх у складі змішаного в'язучого надає йому цілий ряд позитивних властивостей, а саме, знижену усадку, знижений екзотермічний розігрів та ін. Відомо, що зростання ціни на мінеральні в'язучі надає особливе значення дослідженням, які направлені на вирішення питань, пов'язаних із зниженням матеріало- і енергоємності виробництва бетонних і залізобетонних виробів. Зниження енергетичних та матеріальних витрат в процесі їх виробництва може бути досягнуто також за рахунок прискорення процесів структуроутворення цементновмішуючих композицій. Одним із перспективних методів інтенсифікації процесів структуроутворення є механохімічна активація портландцементу в швидкісних змішувачах турбулентного типу. Питання, які розглядаються в роботі, пов'язані з визначенням впливу механохімічної активації портландцементу з добавкою меленого кварцового піску та суперпластифікатору SP-5 на міцність на стиск важкого бетону в 3-х, 7-и та 28-и добовому віці. Сумісне використання вказаних рецептурно-технологічних факторів, як показують експериментальні результати, сприяє отриманню бетонів з покращеною міцністю на стиск.

Аналіз останніх досліджень. Використання тонкодисперсного, з високою питомою поверхнею кварцового піску, в якості мінеральної добавки до цементу є одним із найбільш ефективних рецептурно-технологічних прийомів, який застосовується в технології виготовлення будівельних розчинів та бетонів [1-4]. Відомо, що тонкомелені зерна кварцового піску в цементному каміні сприяють зниженню об'ємних деформацій і підвищенню його корозійної стійкості [5, 6]. Сумісний помел портландцементу з кварцовим піском утворює змішаний цемент, який при твердінні має менше усадкові деформації в порівнянні з бездобавочними цементами [7, 8]. При традиційній технології приготування бетонної суміші мелений кварцовий пісок практично не вступає в хімічну взаємодію з новоутвореннями гідратуючого цементу і виконує тільки роль затравки, провокуючим, тим самим, прискорення процесів гідратації [9]. Ефективне підвищення реакційної здатності в'язучого досягається за рахунок використання швидкісних змішувачів турбулентного типу [10-12]. Основна ідея в використанні таких швидкісних змішувачів полягає в значному зростанні поверхневої енергії тонкодисперсних часток в'язучого та мінеральних добавок до нього, що приводить до появи пластичної деформації, які змінюються появою тріщин з утворенням нових поверхонь. Внаслідок цього можливо розглядати використання швидкісних змішувачів як одним із способів зростання активності змішаного в'язучого, що в кінцевому випадку, приводить до підвищення міцності бетону та зниженню його собівартості.

Постановка мети і задач дослідження. Результатом літературного огляду наукових робіт попередників є визначення мети роботи, яка полягає в розробці технології виготовлення бетонних сумішей на змішаному портландцементу та одержанню бетону на його основі з підвищеною міцністю на стиск за рахунок механохімічної активації змішаного в'язучого та використання суперпластифікатору SP-5.

В експериментальних дослідженнях в якості мінерального в'язучого використовувався портландцемент ПЦ І-500 ПАТ «Волинь-Цемент», який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Цементи загальнобудівного

призначення. Технічні умови» та однорідна суміш портландцементу з добавкою меленого кварцового піску в ній.

Механохімічна активація водної композиції портландцементу з добавкою меленого кварцового піску в кількості $(45 \pm 15) \%$ від маси змішаного в'язучого здійснювалася в швидкісному активаторі ($n=1800$ об/хв) протягом 120 сек. Активація суміші здійснювалася в присутності суперпластифікатора SP-5, витрата якого варіювалася в діапазоні від 0 до 1 % маси змішаного в'язучого. В якості дрібного заповнювача для приготування бетонної суміші використовувався кварцовий пісок з $M_k=2,1$. В якості крупного заповнювача використовувався гранітний щебінь фракцій 5...10 та 10...20 мм в співвідношенні 40:60 %. Для сумісного визначення впливу досліджуваних факторів на міцність на стиск бетону був проведений 3-х факторний плановий експеримент, де в якості незалежних факторів були прийняті: а) витрата змішаного портландцементу у складі бетонної суміші; б) витрата меленого кварцового піску у складі змішаного в'язучого; в) витрата суперпластифікуючої добавки SP-5. Досліджувалася міцність бетонних зразків у 3-х, 7-и та 28-и добовому віці твердіння в н. у. як на механоактивованому змішаному в'язучому так і на в'язучому, яке не підлягало механоактивації (контроль).

Результати досліджень. Сумісний вплив механоактивації, а також складу бетонної суміші на міцність бетону на стиск у 3-х, 7-и та 28-и добовому віці визначався за допомогою 3-х факторного експерименту, де в якості незалежних перемінних були використані наступні фактори: X_1 - витрата змішаного в'язучого (370 ± 50) кг/м³; X_2 - витрата меленого кварцового піску (45 ± 15) % від маси змішаного в'язучого; X_3 - витрата SP-5 ($0,5 \pm 0,5$) % від маси змішаного в'язучого.

Кількість води замішування приймалася з розрахунку одержання рухливості бетонної суміші для кожної строчки математичного плану в діапазоні 7...8 см осідання стандартного конусу. Рухливість суміші приймалася однаковою як для всіх строчок математичного плану, так і для порівнювальних технологій. Математичний план експерименту і складу досліджуваних бетонних сумішей (в перерахунку на 7 л бетонної суміші) для двох порівнювальних технологій наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Трифакторний план експерименту і складу бетонних сумішей з розрахунку на 7 л (для двох порівнювальних технологій виготовлення бетонних сумішей)

№	Рівні незалежних факторів			Портланд-цемент, г	Мелений кв. пісок, г	Кварцевий пісок, г	Гранітний щебінь фракцій		Супер-пластифікатор, г	Вода, Г (контроль)	Вода, г (механоактивація)
	X_1	X_2	X_3				5...10 мм	10-20 мм			
1	-	-	-	1568	672	5110	3510	5265	0	1523	1344
2	-	+	-	896	1344	5110	3510	5265	0	1501	1322
3	0	0	-	1424,5	1165,5	4984	3404	5106	0	1373	1217
4	+	-	-	2058	882	4865	3330	4995	0	1294	1176
5	+	+	-	1176	1764	4865	3330	4995	0	1499	1352
6	-	0	0	1232	1008	5110	3512	5268	11,2	1456	1277

Продовження табл. 1

№	Рівні незалежних факторів			Портланд-цемент, г	Мелений кв. пісок, г	Кварцевий пісок, г	Гранітний шибень фракцій		Супер-пластифікатор, г	Вода, Г (контроль)	Вода, г (механоактивація)
	X ₁	X ₂	X ₃				5...10 мм	10-20 мм			
7	0	-	0	1813	777	4984	3418	5127	12,9	1191	1062
8	0	0	0	1424,5	1165,5	4984	3418	5127	12,9	1243	1088
9	0	+	0	1036	1554	4980	3330	4995	12,9	1399	1243
10	+	0	0	1617	1323	4860	3512	5268	14,7	1352	1205
11	-	-	+	1568	672	5110	3512	5268	22,4	1299	1142
12	-	+	+	896	1344	5105	3514	5271	22,4	1299	1142
13	0	0	+	1424,5	1165,5	4980	3414	5121	25,9	1217	1062
14	+	-	+	2058	882	4867	3334	5001	29,4	1176	1058
15	+	+	+	1176	1764	4867	3334	5001	29,4	1205	1088

Міцність бетону на стиск у досліджуваному інтервалі часу на механоактивованому змішаному в'язучому ($f_{ск.cube}^M$) та в'язучому, яке не піддавалося механоактивації ($f_{ск.cube}^K$), наведена у табл. 2.

Таблиця 2

Показники міцності бетону на стиск у досліджуваному інтервалі часу

№	Рівні незалежних факторів			Відгуки					
				$f_{ск.cube}^K$, МПа			$f_{ск.cube}^M$, МПа		
	X ₁	X ₂	X ₃	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
1	-	-	-	8,2	12,2	16,0	12,0	16,8	21,0
2	-	+	-	5,7	8,3	10,9	8,6	11,3	14,3
3	0	0	-	9,3	13,4	17,4	13,8	17,9	22,5
4	+	-	-	10,6	15,6	20,6	15,3	20,0	24,9
5	+	+	-	7,7	11,3	14,8	11,4	15,2	19,5
6	-	0	0	8,4	11,8	15,2	11,9	15,3	18,9
7	0	-	0	11,4	16,2	21,4	16,1	21,5	26,5
8	0	0	0	9,9	13,9	18,0	14,0	18,4	22,7
9	0	+	0	8,5	11,9	15,5	12,0	15,7	19,2
10	+	0	0	11,1	15,9	20,6	15,7	20,7	25,5
11	-	-	+	11,6	16,5	21,2	16,2	21,9	27,2
12	-	+	+	9,1	13,3	16,9	12,9	17,0	21,7
13	0	0	+	11,9	17,6	22,7	16,7	22,8	28,5
14	+	-	+	14,3	20,9	26,9	19,7	27,3	33,7
15	+	+	+	10,4	14,9	19,3	14,5	19,5	23,9

Примітка: $f_{ск.cube}^K$ – міцність на стиск бетону у 3-х, 7-и та 28-и добову віці на змішаному в'язучому, яке не піддавалося механоактивації, МПа; $f_{ск.cube}^M$ – міцність на стиск бетону у 3-х, 7-и та 28-и добовому віці на механоактивованому змішаному в'язучому, МПа.

Вплив технології приготування бетонної суміші та варійованих факторів її складу на міцність на стиск бетону у задані терміни часу відображається за допомогою математичних моделей (1...6).

$$f_{ск.cube}^{к.3}(\text{МПа}) = 10,2 + 1,1X_1 - 0,5X_1^2 - 0,2X_1X_2 - 1,5X_2 - 0,3X_2^2 + 1,6X_3 + 0,3X_3^2 \quad (1)$$

$$f_{ск.cube}^{к.7}(\text{МПа}) = 14,4 + 1,7X_1 - 0,7X_1^2 - 0,4X_1X_2 - 2,2X_2 - 0,5X_2^2 + 2,2X_3 + 0,9X_3^2 \quad (2)$$

$$f_{ск.cube}^{к.28}(\text{МПа}) = 18,7 + 2,2X_1 - 1,0X_1^2 - 0,5X_1X_2 - 2,9X_2 - 0,5X_2^2 + 2,7X_3 + 1,1X_3^2 \quad (3)$$

$$f_{ск.cube}^{м.3}(\text{МПа}) = 14,5 + 1,5X_1 - 0,8X_1^2 - 0,3X_1X_2 - 2,0X_2 - 0,5X_2^2 + 1,9X_3 + 0,7X_3^2 \quad (4)$$

$$f_{ск.cube}^{м.7}(\text{МПа}) = 18,9 + 2,0X_1 - 1,1X_1^2 - 0,3X_1X_2 - 0,3X_2X_3 - 1,5X_2 - 0,3X_2^2 + 1,6X_3 + 0,3X_3^2 \quad (5)$$

$$f_{ск.cube}^{м.28}(\text{МПа}) = 23,4 + 2,4X_1 - 1,3X_1^2 - 0,4X_1X_2 - 0,4X_2X_3 - 3,5X_2 - 0,7X_2^2 + 3,3X_3 + 2,0X_3^2 \quad (6)$$

Математичні моделі (1...6) свідчать про те, що фактори варіювання (X_1 , X_2 , X_3) по-різному впливають на міцність бетону при стиску. Аналіз коефіцієнтів моделей свідчить про те, що як на механоактивованому змішаному в'язучому, так і на змішаному в'язучому, яке не підлягало механоактивації, визначальний вплив на міцність бетону на стиск у марочному, 28-и добовому віці, надає рецептурний фактор X_2 . Зростання його кількості від 30 до 60% у складі змішаного в'язучого, як і передбачалося, призводить до зниження міцності бетону в середньому на 30...35 %, рис. 1.

Такий характер впливу вмісту меленого кварцового піску на міцність бетону як на механоактивованому так і на змішаному в'язучому, яке не підлягало механоактивації, спостерігається для всього діапазону витрати суперпластифікуючої добавки SP-5 (від 0 до 1 %). В той же час слід відмітити, що керуючи вмістом SP-5, а саме зростанням його кількості від 0 до 1 %, можливо компенсувати зниження міцності бетону (на 75...80 %) від введення до складу меленого кварцового піску (30...60 %). Що стосується впливу витрати змішаного портландцементу (в перерахунку на 1 м³ бетону) на міцність бетону в 28-и добовому віці, то слід відмітити той факт, що зростання його кількості від 320 до 420 кг/м³ викликає підвищення його міцності в середньому на 23...26 % – це характерно для всіх вивчених концентрацій суперпластифікатору.

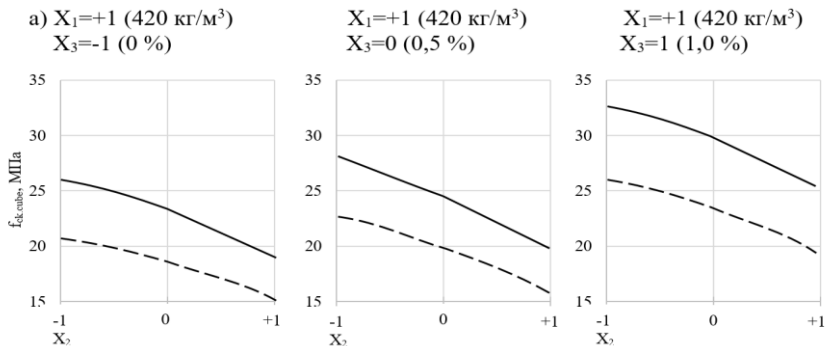


Рис.1 Вплив вмісту меленого піску X_2 у змішаному в'язучому на міцність бетону:

- - бетон на механоактивованому змішаному в'язучому;
- - - - - бетон на змішаному в'язучому, яке не підлягало механоактивації (контроль)

Зафіксувавши фактор X_2 на нульовому рівні отримуюмо графічні залежності, які наведені на рис. 2.

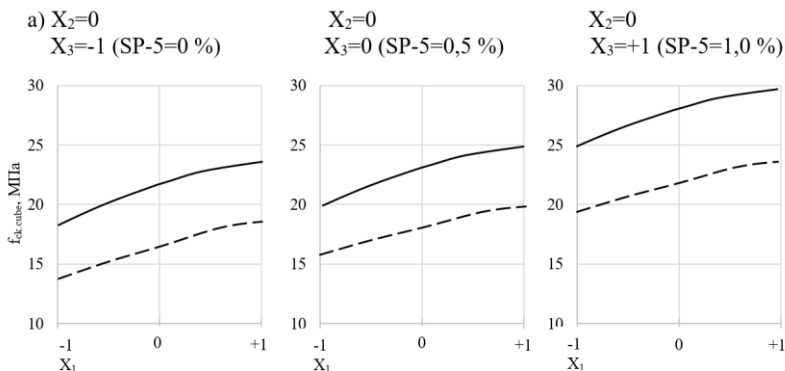


Рис.2 Вплив вмісту змішаного в'язучого X_1 на міцність бетону:

- - бетон на механоактивованому змішаному в'язучому;
- - - - - бетон на змішаному в'язучому, яке не підлягало механоактивації (контроль)

Графічні залежності дозволяють зробити висновок про те, що використання механоактивації в поєднанні з 1 % SP-5 забезпечує зростання міцності бетону в марочному віці (в порівнянні з контролем - механоактивація відсутня, витрата SP-5 дорівнює 0 %) з 18,3 до 29,8 МПа, тобто більше ніж на 60 %.

Висновки і рекомендації:

1. Використання механохімічної активації змішаного в'язучого є ефективним технологічним прийомом, який за інших рівних умов забезпечує зростання міцності бетону на стиск як в ранньому (3 доби), так і в марочному віці.

2. Сумісне використання механоактивації змішаного в'язучого та суперпластифікуючої добавки SP-5 (1 %) забезпечує зростання міцності бетону в 28-и добовому віці (в порівнянні з контролем) більше ніж на 60 %.

Список літератури:

1. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Ivashchyshyn H., Rykhlitska O. Eco-efficient blended cements with high volume of supplementary cementitious materials. *Budownictwo i Architektura*. 2019. 18(4). Pp. 5-14. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.816>

2. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів: навч. посіб. Київ. Аспект- Поліграф. 2010. 228 с.

3. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк У.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони: монографія. Львів: ТОВ «Простір-М». 2021. 206 с.

4. Токарчук В.В. Сокольцев В.Ю. Свідерський В.А. Особливості твердіння композиційних цементів з силікатними добавками різного походження. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2015, 3/11 (75), 9-14. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43460

5. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.С. Модифіковані композиційні цементи: монографія. Львів: Вид-во Львів. політехніки. 2010. 132 с.

6. 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.

7. Енергозберігаючі мінеральні в'язучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі / К.К. Пушкарьова, М.М. Зайченко, А.А. Плугін та ін. Монографія. Київ: Задруга. 2014. 272 с.

8. Рунова Р.Ф., Носовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. Київ: КНУБА. 2007. 236с.

9. 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.

10. Шпирько М.В., Дубов Т.М. Дослідження впливу електромагнітної активації концентрованої цементної суспензії на властивості цементного каменю та бетону. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020, 2 (263-264), 102-107. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.107.627

11. Гарашенко Д.П. Дисперсно-армований самоущільнюючий бетон на механоактивованому портландцементі: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Одеса, 2021. 156 с.

12. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин: навч. посіб. Одеса: «Астропринт». 2002. 156 с.

Ivan BARABASH, Mykola KIRSANOV

Mechanical activation of portland cement with ground quartz sand and its effect on the compressive strength of concrete

In the production of concrete and reinforced concrete products, Portland cements with finely dispersed mineral additives have become widely used. Ground quartz sands are among the most common mineral additives. Such blended cements can be produced using technologies involving: a) the joint grinding of Portland cement clinker, dihydrate gypsum, and quartz sand; b) the mixing of Portland cement with ground quartz sand dried to a constant mass. To improve the mechanical characteristics of both the cement stone and the resulting concrete, intensive mechanochemical activation of the blended binder in high-speed forced-action mixers has become widely adopted. The experimental results obtained in this article reflect the influence of the mechanochemical activation of Portland cement with the addition of ground quartz sand in the presence of the SP-5 superplasticizer on the compressive strength of concrete at the ages of 3, 7, and 28 days of curing under normal conditions. The activated Portland cement was obtained by high-speed mixing of a highly concentrated suspension of PC I-500 Portland cement with a metered amount of ground quartz sand. The consumption of ground sand varied in the range of 30 to 60% by weight of the blended binder.

The block of experimental research was conducted using a D-optimal mathematical plan with the variation of the following independent factors: X_1 – consumption of the blended binder in the range of (370 ± 50) kg/m³; X_2 – consumption of ground quartz sand at (45 ± 15) % by weight of the blended binder; X_3 – consumption of the SP-5 superplasticizing additive at (0.5 ± 0.5) % by weight of the blended binder.

Mathematical models indicate that factors X_2 and X_3 have the maximum impact on the strength of concrete at 3, 7, and 28 days of age. An increase in the ground quartz sand content in the blended binder from 30 to 60% causes a decrease in concrete strength for all specified curing periods, while increasing the SP-5 consumption from 0 to 1% provides virtually the same percentage of increase in concrete strength. The combined effect of using mechanochemical activation of Portland cement with ground quartz sand and using SP-5 in an amount of 1.0% contributes to an increase in concrete strength (compared to the control, where mechanical activation is absent) by an average of 25–50%.

Keywords: blended Portland cement; mechanical activation; Portland cement; superplasticizer; ground quartz sand; compressive strength.