

УДК 691.5

**ШЛЯХИ АКТИВІЗАЦІЇ
ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ**

МАЛОКЛІНКЕРНОГО

**ПУТИ АКТИВИЗАЦИИ
ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА**

МАЛОКЛИНКЕРНОГО

**THE WAYS OF ACTIVATION OF LOW CLINKER SLAG PORTLAND
CEMENT**

Дворкін Л. Й., д.т.н., професор, Степасюк Ю.О., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Дворкин Л. И., д.т.н., профессор, Степасюк Ю.А., аспирант (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

Dvorkin L. J., doctor of technical sciences, professor, Stepasyuk Y. O., post-graduate student (National university of water management and nature resources us, Rivne)

В статті наведені результати досліджень шлакопортландцементу зі вмістом клінкеру 5-19 %. Визначені оптимальні склади і параметри виробництва та запропоновані способи активізації для отримання шлакопортландцементу з активністю до 50 МПа.

В статье приведены результаты исследований шлакопортландцемента с содержанием клинкера 5-19 %. Определены оптимальные составы и параметры производства, предложены способы активизации для получения шлакопортландцемента с активностью до 50 МПа.

In the article are presented the results of Slag Portlandcement studies with clinker content 5-19%. The optimal compositions and technological parameters and methods of activation for low clinker Slag Portlandcement with activity up to 50 MPa are proposed.

Ключові слова:

Енергозбереження, шлакопортландцемент, клінкер, фосфогіпс, добавки-активатори.

Энергосбережения, шлакопортландцемент, клинкер, фосфогипс, добавки-активаторы.

Energy, resistant slag Portland cement, clinker, phosphogypsum additives activators.

Виробництво цементного клінкеру, як напівфабрикату для виготовлення портландцементу, вимагає високих витрат палива та енергії, що призводить до значного збільшення собівартості цементу. Зменшення витрати клінкеру досягається використанням композиційних цементів, які містять значну кількість активних мінеральних добавок. З цементів цієї групи найбільш широко використовують шлакопортландцемент (ШПЦ). У будівництві поширений ШПЦ, що містить 40...50% цементного клінкеру. На нього припадає понад 20% усього світового виробництва цементу. Економічна доцільність використання такого в'язучого не викликає сумнівів. Енерговитрати на отримання клінкеру складають 120...140 кг ум.п/т для заводів сухого способу і до 240 кг для заводів мокрого способу. При економії 50% клінкеру зменшення енерговитрат на його отримання в перерахунку на витрати умовного палива становлять 60...120 кг ум.п./т. [1].

Український стандарт ДСТУ Б В.2.7-46:2010 гармонізований з європейським стандартом на цемент EN 197-1 передбачає виробництво шлакопортландцементу з вмістом клінкеру 5...19%. Такий цемент, а також параметри його виробництва і застосування вивчені недостатньо і потребують додаткових досліджень.

Активність ШПЦ формується за рахунок активності клінкерної складової, а також гідравлічної активності шлаків, що проявляється при взаємодії шлаків з продуктами гідратації клінкеру. Відомо, що поряд зі складом і структурою шлаків на якість ШПЦ впливає також хіміко-мінералогічний склад клінкеру. Найбільший ефект у поєднанні з доменним гранульованим шлаком дає застосування клінкеру з підвищеним вмістом активних мінералів [2].

Для підвищення активності ШПЦ, особливо з максимальним вмістом шлаку, велике значення має встановлення оптимального вмісту сульфатного компоненту, який служить не тільки регулятором тужавлення але й добавкою активізатором твердіння доменного шлаку, а також тонкості помелу складових цементу. Позитивний ефект досягається при введенні в процесі помелу шлакових цементів добавок пластифікаторів і прискорювачів тверднення [3].

Метою даної роботи було пошук шляхів активізації малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ), які б забезпечували отримання в'язучого високої якості з вмістом клінкеру менше 19 %.

В дослідженнях використовували гранульований доменний шлак Криворізького металургійного комбінату, який можна віднести до основних шлаків ($M_o=1,09$) [4], клінкер Здолбунівського заводу "ПАТ Волинь-Цемент" ($C_3S=57,1$ %, $C_2S=21,27$ %, $C_3A=6,87$ %, $C_4AF=12,19$ %), який за мінералогічним складом можна віднести до типових середньоалюмінатних

клінкерів що випускаються цементними заводами України. В якості сульфатного компоненту ШПЦ застосовували фосфогіпс-дигідрат (ФГ) Рівненського ПАТ "Азот". Хімічний склад вихідних матеріалів наведений в табл.1.

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних матеріалів

Вид матеріалів	Вміст оксидів, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅
Доменний гранульований шлак	39,52	6,49	0,12	47,13	3,10	1,74	1,15	-
Фосфогіпс	-	0,36	0,15	38,4	0,003	59,7	-	0,67
Клінкер	22,47	5,26	4,07	66,18	0,64	0,46	0,29	-

Перший етап досліджень присвячений встановленню впливу величини питомої поверхні на міцнісні характеристики малоклінкерного ШПЦ, а також шляхам зниження енерговитрат при помелі. Для цього було проведено ряд дослідів, пов'язаних з порівнянням одностадійного та двохладійного способів помелу, а також виконанні дослідження по визначенню впливу добавки інтенсифікатора помелу – пропіленгліколю та добавок суперпластифікаторів – Sika VC 225 та СП-1 на кінетику помелу в'язучого. При цьому також порівнювалась ефективність використання добавок суперпластифікаторів при помелі в'язучого і при замішування розчину. Результати досліджень наведені на рис.1 і в табл. 2.

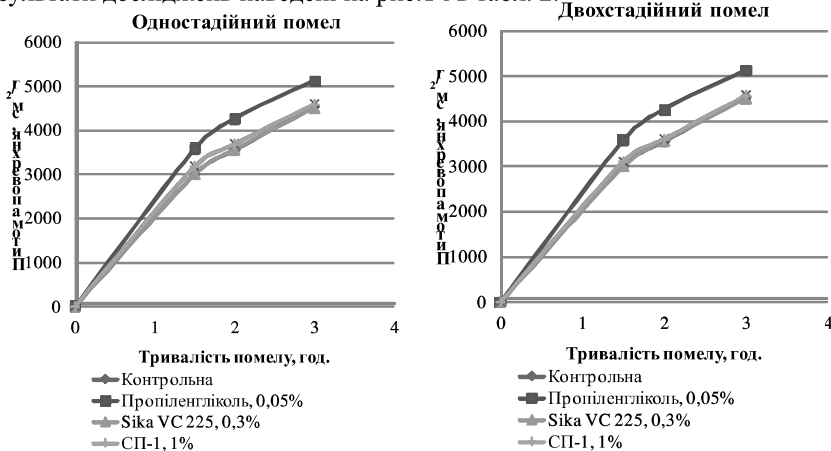


Рис. 1. Вплив різних добавок на кінетику помелу в'язучого

Таблиця 2

Вплив способу помелу на міцність малоклінкерного шлакопортландцементу

№	Добавка		Одностадійний помел				Двохстадійний помел			
			Питома поверхня, см ² /г	В/В _ж , %	Міцність при стиску, Мпа		Питома поверхня, см ² /г	В/В _ж , %	Міцність при стиску, Мпа	
	7 діб	28 діб			7 діб	28 діб				
Вид	Тривалість помелу, год									
1	Без добавок (контрольний)	1,5	3221	26,5	4,3	21,1	3011	24	4,5	29,4
		2	3657	25	7,2	26,0	3547	22	8,0	37,0
		3	4537	25	12,2	31,3	4534	23	15,6	41,9
2	Пропіленгліколь (0,05%)	1,5	3361	25,5	11,0	23,9	3580	24,5	19,2	29,4
		2	4410	25	13,6	34,4	4266	24,5	21,2	29,5
		3	5189	31	14,8	32,0	5136	29	22,2	32,0
3	Sika VC 225 (0.3%) при помелі	1,5	3109	20	3,5	13,8	3002	19	19,6	34,6
		2	3562	18,5	6,2	19,4	3558	17	25,2	38,0
		3	4433	17	15,6	30,1	4501	17	28,6	41,4
4	Sika VC 225 (0.3%) при замішуванні	1,5	3221	26,5	6,3	22,4	3011	24	10,8	39,6
		2	3657	25	9,0	27,0	3547	22	14,8	48,1
		3	4537	25	12,2	36,4	4534	23	19,5	55,2
5	СП-1 (0.5%) при помелі	1,5	3183	25	8,5	20,9	3109	23	9,3	21,5
		2	3691	23	11,6	26,5	3602	21	13,8	32,2
		3	4601	23,5	13,0	33,3	4573	22	22,5	47,6
	СП-1 (0.5%) при замішуванні	1,5	3221	26,5	9,8	23,3	3011	24	10,5	30,8
		2	3657	25	11,6	27,2	3547	22	16,3	39,2
		3	4537	25	14,8	33,5	4534	23	32,8	48,3

В якості в'язучого в дослідженнях використовувався малоклінкерний ШПЦ з вмістом клінкеру 12% та вмістом фосфогіпсу 7,5 % (4,5 % в перерахунку на SO_3). Помел в'язучого здійснювався в лабораторному кульовому млині. При одностадійному помелі відбувався сумісний помел всіх компонентів в'язучого, а при двохстадійному – спочатку окремо здійснювався помел цементного клінкеру до питомої поверхні 2500 $\text{см}^2/\text{г}$, а потім сумісний помел всіх компонентів в'язучого.

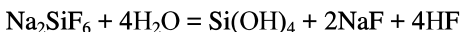
Отримані результати вказують на те, що питома поверхня є суттєвим фактором, який впливає на активність малоклінкерного ШПЦ. При її збільшенні від 3000-3200 $\text{см}^2/\text{г}$ до 4500 $\text{см}^2/\text{г}$ активність збільшується в середньому на 25-30%. Також було встановлено те, що більш ефективним є двохстадійний спосіб помелу, при якому спочатку окремо здійснюється помел цементного клінкеру, а потім спільний помел клінкеру і шлаку. При цьому активність в'язучого збільшується на 30 % в порівнянні з одностадійним помелом. Це можна пояснити тим, що при одностадійному помелі, у зв'язку з налипанням зерен шлаку на зерна клінкеру, не домелюється клінкерна складова. Ці результати співпадають з даними Г. М. Людвіга та Ф. Шнека, які встановили, що при двохстадійному помелі вдається суттєво зменшити розміри зерен клінкеру, що суттєво відбивається на активності ШПЦ [5].

Другий етап досліджень був пов'язаний з встановленням впливу добавок активаторів тверднення на міцнісні характеристики в'язучого з різною величиною питомої поверхні. В якості добавок активаторів твердіння в наших дослідженнях використовували наступні: кремнійфторид натрію, хлорид кальцію та феруму, карбонат та гідроксид натрію. В якості контрольних складів в'язучого використали МШПЦ з питомою поверхнею 320-350 $\text{м}^2/\text{кг}$ та активністю 25,4 МПа, а також МШПЦ з питомою поверхнею 400-450 $\text{м}^2/\text{кг}$ та активністю 48,3 МПа (склад, мас. %: ДГШ – 88, ФГ – 7,5, КЛ – 12), для регулювання інтенсивності твердіння яких в подальшому використовували вищевказані добавки (табл. 3.). Для зниження витрати води, необхідної для досягнення розчином стандартної величини розпливу конусу 106...115 мм, у всіх точках при замішуванні було введено добавку суперпластифікатор СП-1 в кількості 1% від маси в'язучого.

Отримані результати вказують на те, що із збільшенням питомої поверхні вплив активаторів твердіння на міцнісні характеристики в'язучого стає незначним. Проте, вони дозволяють підвищити міцність в'язучого з питомою поверхнею 320-350 $\text{м}^2/\text{кг}$. Наші дослідження показали, що найбільш ефективним активатором твердіння при такій величині питомої поверхні для малоклінкерного шлакопортландцементу є кремнійфтористий нарій (Na_2SiF_6), який відноситься до групи солей-флюоритів.

Міцність малоклінкерного шлакопортландцементу з добавкою Na_2SiF_6 , при питомій поверхні цементу $S_{\text{пит}}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$ збільшилась більш чим в 1,5 рази у порівнянні із міцністю контрольного складу, при цьому більш сильний

вплив Na_2SiF_6 на міцність МШПЦ, у порівнянні з іншими добавками можна пояснити появою значних кількостей гелю $\text{Si}(\text{OH})_4$ при гідролізі Na_2SiF_6 у воді за реакцією:



Таблиця 3

Вплив добавок активаторів твердіння на міцність малоклінкерного шлакопортландцементу

№	Добавка		Питома поверхня 350 м ² /кг				Питома поверхня 450 м ² /кг					
			В/В _ж	Міцність при згині, МПа		Міцність при стиску, Мпа		В/В _ж	Міцність при згині, МПа		Міцність при стиску, Мпа	
	Вид	Вміст, мас. %		7 діб	28 діб	7 діб	28 діб		7 діб	28 діб	7 діб	28 діб
1	Без добавок (контрольний)	-	0,33	5,1	0,33	16,3	25,4	0,32	7,4	32,8	10,8	48,3
2	Na_2SiF_6	1,0	0,35	7,1	9,5	28,4	33,2	0,34	6,5	9,0	26,0	44,1
3	Na_2SiF_6	2,0	0,38	6,8	9,5	29,6	44,3	0,37	7,4	9,0	21	45,6
4	CaCl_2	1,0	0,31	4,0	8,2	15	23,6	0,35	5,1	9,9	16,5	41,8
5	CaCl_2	2,0	0,32	4,7	8,6	22	23,4	0,36	5,1	10,0	26,0	41,3
6	FeCl_3	1,0	0,34	4,9	8,6	19	23,8	0,34	9,2	10,2	31,4	45,1
7	FeCl_3	2,0	0,35	4,7	8,9	19,2	19,7	0,36	8,1	10,7	29,2	47,4
8	Na_2CO_3	1,0	0,38	5,0	10,8	20,8	37,5	0,34	6,7	9,2	23,0	25,8
9	Na_2CO_3	2,0	0,4	5,4	8,1	16	28,4	0,37	6,7	9,6	19,2	33,0
10	NaOH	1,0	0,34	8,8	27,2	10,2	41,5	0,34	8,2	11,0	27,2	39,8
11	NaOH	2,0	0,36	9,8	28,4	11,3	39,6	0,36	9,1	11,0	28,4	41,1

Отриманий гелю $\text{Si}(\text{OH})_4$ сприяє процесу кристалізації гідратних новоутворень МШПЦ. Плавикова кислота HF добре розчинна у воді (концентрація водних розчинів досягає понад 50% [6]) і, активно розчиняє поверхневий шар зерен шлаку сприяючи їх гідратації.

Таким чином, використання відносно недорогої та поширеної солі Na_2SiF_6 дозволяє суттєво (на 35..40%) збільшити міцність МШПЦ при помірній витраті добавок та величині питомої поверхні вяжучого.

Метою роботи на третьому етапі досліджень було вивчення комплексного впливу на міцність малоклінкерного шлакопортландцементу вмісту клінкеру, активаторів твердіння, питомої поверхні і суперпластифікатора.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований трьохрівневий п'ятифакторний план На-5[7], умови планування якого наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Вміст клінкеру, %	X_1	5	12	19	7
2	Вміст фосфогіпсу в перерахунку на SO_3 , %	X_2	3,03	4,5	5,97	1,47
3	Питома поверхня в'язучого, m^2/kg	X_3	350	450	550	100
4	Вміст інтенсифікатора твердіння (Na_2SiF_6), %	X_4	0	1	2	1
5	Вміст суперпластифікатора СП-1, %	X_5	0	0,5	1	0,5

У ході досліджень в кожній точці плану виготовляли цементно-піщаний розчин складу складу в'язуче:пісок 1:3, визначали водоцементне відношення для досягнення розпливу конуса розчину на струшуючому столику не менше 106 мм, та міцність зразків-балочок на стиск і згин у віці 7 і 28 діб.

Після проведення, обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі водоцементного відношення та міцності на стиск стандартних розчинів на основі досліджуваних в'язучих у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл.5.

Таблиця 5

Експериментально-статистичні моделі міцності розчинів на малоклінкерному шлакопортландцементі

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Водоцементне відношення	$V/C=0,36+0,01X_3+0,01X_4-0,03X_5-0,01X_2^2+0,02X_3^2-0,02X_4^2+0,01X_1X_2$ (1);
Міцність на стиск у віці 28діб, МПа	$f_m^{28}=32,19+5,73X_1-0,7X_2+1,49X_3+0,22X_4+1,19X_5-6,32X_1^2-2,42X_2^2-3,22X_3^2-4,17X_4^2+1,33X_5^2-0,65X_1X_2-1,53X_1X_3-2,69X_1X_4-0,55X_1X_5+1,28X_2X_3+0,4X_2X_4-3,65X_2X_5-0,86X_3X_4+0,2X_3X_5+2,91X_4X_5$ (2).

Графічні залежності, що ілюструють вплив технологічних факторів на водоцементне відношення і міцність малоклінкерного ШПЦ на стиск у віці 28 діб, наведено на рис. 2, 3.

Аналізуючи рівняння 2 (табл. 5.) та графічні залежності, наведені на рис. 2., приходимо до висновку, що збільшення вмісту клінкеру суттєво не впливає на водоцементне відношення розчинів виготовлених на МШПЦ. Суттєвий вплив на нього має величина питомої поверхні в'язучого. При збільшенні питомої поверхні до величини 420-450 м²/кг водопотреба в'язучого знижується, що пов'язано із збільшенням пластичності розчинів при збільшенні дисперсності частинок в'язучого, проте надмірне її збільшення призводить до різкого зростання В/Ц. Також до деякого зростання водопотреби призводить збільшення вмісту добавки кремнійфториду натрію. Вплив даних двох факторів носить екстремальний характер. Збільшення вмісту фосфогіпсу до величини 7,5 % (4,5 % у перерахунку на SO₃) у загальній масі в'язучого призводить до незначного збільшення В/Ц, це збільшення пов'язане з утворенням підвищеної кількості еtringіту в результаті взаємодії алюмінатної складової цементного клінкеру з сульфатною складовою фосфогіпсу. Проте коли алюмінатна складова повністю витрачається на його утворення, то подальше збільшення вмісту фосфогіпсу веде до незначного зниження В/Ц.

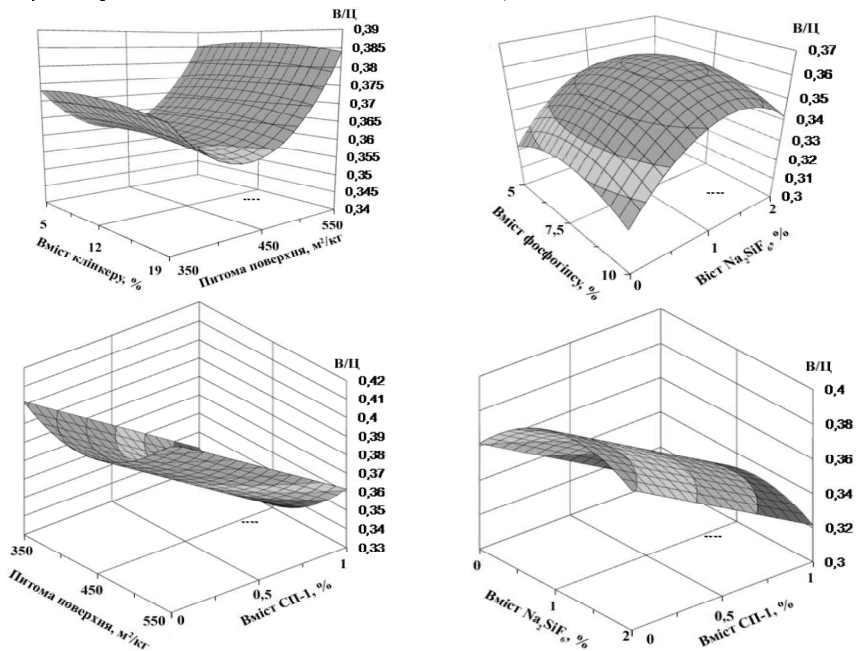


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на водоцементне відношення розчинів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу.

Найбільш значний ефект зменшення В/Ц без зміни консистенції розчину досягається при введенні суперпластифікатора. Суперпластифікатор СП-1 дозволяє зменшити В/Ц розчину на малоклінкерном ШПЦ від 0,39 до 0,33 і, відповідно, збільшити міцність зразків. Вплив суперпластифікатора на В/Ц, як випливає з аналізу отриманої моделі, має практично лінійний характер.

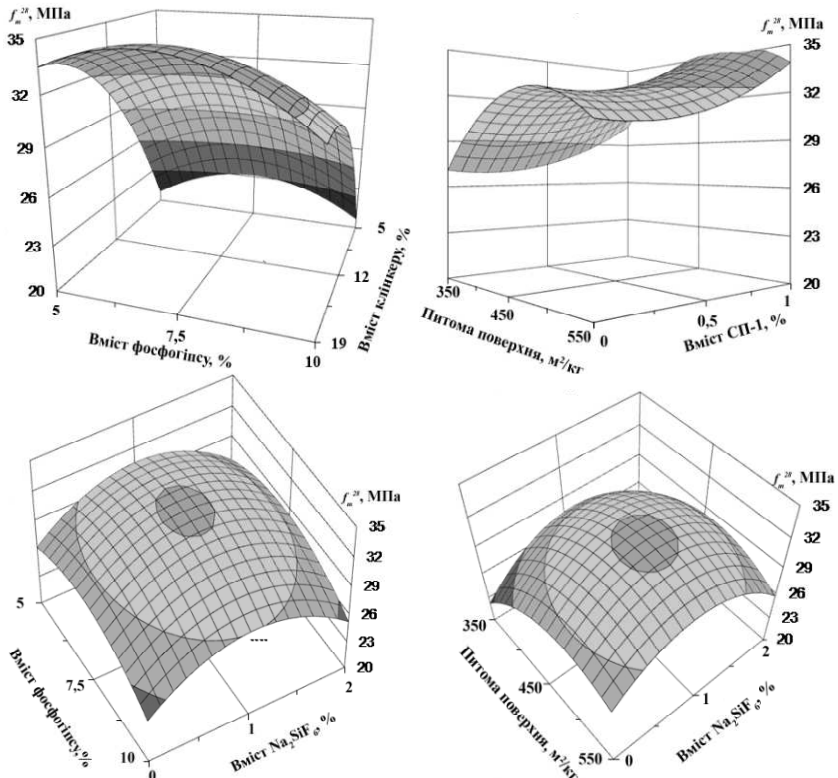


Рис. 3. Вплив технологічних факторів на міцність розчинів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу у віці 28 діб.

Однчасне збільшення вмісту клінкеру, фосфогіпсу та кремнійфториду натрію в загальній масі в'язучого, при підвищенні його питомої поверхні, позитивно впливають на марочну міцність МШПЦ (рис. 3). Це пов'язано з тим, що в присутності іонів Ca^{2+} і SO_4^{2-} і високої дисперсності частинок прискорюється гідратація склоподібної фази доменного гранульованого шлаку, внаслідок чого відбувається утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію. Однак слід зазначити, що при подвійній активації шлаків гідроксидом кальцію і сульфатним компонентом можливі й деструктивні

процеси - уповільнення твердіння і деяке падіння міцності, викликане процесами перекристалізації гідросульфоалюмінатів [3]. Тому, як впливає з аналізу отриманої моделі, необхідно враховувати оптимальне кількісне співвідношення використаних активізаторів.

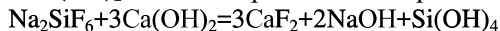
Негативно на міцність МШПЦ впливає надмірне збільшення величини питомої поверхні в'язучого, а також витрати добавки активізатора твердіння - кремнійфториду натрію, що пов'язано з різким збільшенням В/Ц. Дослідженнями встановлено, що найбільша міцність зразків спостерігається при величині питомої поверхні 450 м²/кг, при цьому оптимальна витрата фосфогіпсу та кремнійфториду натрію у в'язучому становить 7,5% (4,5% в перерахунку на SO₃) і 1% відповідно.

Як і слід було очікувати, зниження водопотреби досліджених в'язучих за рахунок введення добавки суперпластифікатора та підвищення питомої поверхні дозволяє збільшити їх міцність. Однак збільшення загальної кількості як суперпластифікатора так і фосфогіпсу в масі в'язучого вище певної межі негативно впливає на міцність.

З результатів виконаних досліджень випливає, що введення в в'язучу систему речовин, переважно іонних по хімічній природі зв'язку, а також речовин з окислювальними властивостями сприяє активуванню гідратації і підвищенню міцності каменю в'язучого. Проте, недоліком попередньо описаних видів активації МШПЦ є низькі значення рН бетонів і розчинів виготовлених на даному в'язучому, які не забезпечують пасивацію арматурної сталі.

Як відомо, ефективним способом активації шлакових в'язучих, при одночасному збільшенні рН, є введення їдких лугів. Проте основним недоліком даного способу є надто швидке тужавлення в'язучої системи, що призводить до різкого зниження термінів придатності бетонів та розчинів, виготовлених на такому в'язучому. Було встановлено[8], що модифікація лужного шлакопортландцементу добавкою напівводного гіпсу дозволяє подовжити терміни тужавлення в'язучого.

Представляє інтерес можливість підсилення ефекту сульфатно-фторидної активації шляхом додаткового введення Ca(OH)₂ у в'язучу систему. Із загально хімічних позицій в МШПЦ активованому добавкою Na₂SiF₆ при додатковому введенні Ca(OH)₂ повинна пройти хімічна реакція:



Тобто в розчині тверднучого цементу поряд з фторидом кальцію (CaF₂) утворюється їдкий луг (NaOH), який і забезпечує додаткову лужну активацію. Результати дослідження ефективності сульфатно-фторидно-лужної (СФЛ) активації наведені в табл.6.

Всі дослідження виконувалися на однаковому в'язучому наступного складу: портландцементний клінкер - 12 %, доменний гранульований шлак - 88%, фосфогіпс дигідрат - 7,5 % (4,5 % в перерахунку на SO₃).

Таблиця 6

Результати випробувань СФЛ активованого МШПЦ

№	Вид в'язучого	В/Ц	РК, мм	$f_{m,tf}^7$, МПа	f_m^7 , МПа	$f_{m,tf}^{28}$, МПа	f_m^{28} , МПа
1	МШПЦ	0,4	130	2,0	3,3	5,6	19,4
2	МШПЦ	0,5	215	2,6	7,0	3,2	14,1
3	МШПЦ+Вапно(3%)	0,4	120	3,6	9,9	8,2	29,3
4	МШПЦ+Вапно(3%)	0,5	205	2,9	6,3	5,9	20,8
5	МШПЦ+Вапно(7%)	0,4	200	3,0	7,8	6,9	20,2
6	МШПЦ+Вапно(7%)	0,5	120	2,8	5,5	6,1	21,4
7	МШПЦ+ Na ₂ SiF ₆ (2%)	0,4	120	4,4	14,7	6,7	28,3
8	МШПЦ+ Na ₂ SiF ₆ (2%)	0,5	205	3,9	11,3	6,7	20,5
9	МШПЦ+Вапно(3%)+ Na ₂ SiF ₆ (2%)	0,4	115	6,7	24,9	7,2	36,7
10	МШПЦ+Вапно(3%)+ Na ₂ SiF ₆ (2%)	0,5	200	6,4	14,3	7,5	29,2
11	МШПЦ+Вапно(7%)+ Na ₂ SiF ₆ (2%)	0,4	115	7,1	14,9	8,5	34,9
12	МШПЦ+Вапно(7%)+ Na ₂ SiF ₆ (2%)	0,5	195	5,4	13,3	7,2	25,4

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що введення в склад МШПЦ комплексної добавки у вигляді суміші кремнійфториду натрію (Na₂SiF₆), та вапна дозволяє суттєво покращити властивості в'язучого. При цьому зростає рН середовища (з 9-10 до 12-13); активність МШПЦ у віці 7 та 28 дб збільшується майже вдвічі. Забезпечення даних характеристик суттєво розширює межі застосування даного цементу, а саме, його можна використовувати для виготовлення як бетонних так і залізобетонних конструкцій.

Висновок: 1. Дослідженнями було встановлено, що більш ефективним є двох стадійний спосіб помелу, при якому спочатку окремо здійснюється помел цементного клінкеру, а потім спільний помел клінкеру і шлаку. Збільшення вмісту добавки інтенсифікатора помелу – пропіленгліколю до величини 0,05% від маси в'язучого дозволяє знизити тривалість помелу і відповідно енергозатрати на 1/3, також це дозволяє збільшити ранню міцність зразків, що пов'язано із збільшенням кількості дрібних частинок, які швидше гідратуються. Зниження питомої поверхні малоклінкерного шлакопортландцементу до 320-350 м²/кг при забезпеченні його активності більше 40 МПа досягається застосуванням добавок - активаторів твердіння, з яких найбільш ефективною є кремнійфторид натрію.

2. Дослідження показали можливість отримання малоклінкерного шлакопортландцементу активністю більше 50 МПа із застосуванням двохкомпонентних добавок-модифікаторів: суперпластифікатора СП-1 та активатора твердіння кремнійфториду натрію (Na_2SiF_6). При цьому в'язуче має наступний склад: вміст клінкеру – 12%, вміст доменного гранульованого шлаку – 88%, вміст фосфогіпсу – 7,5% (в перерахунку на SO_3 - 4,5%). Питома поверхня в'язучого складає 400-450 м²/кг, витрата добавки суперпластифікатора СП-1 – 1%, та добавки активатора твердіння кремнійфториду натрію (Na_2SiF_6) – 1% від загальної маси в'язучого.

3. Комплексна сульфатно-фторидно-лужна активація МШПЦ дозволяє суттєво скоротити строки тужавлення в'язучого, збільшити рН середовища, а також активність МШПЦ у віці 7 та 28 діб майже вдвічі.

1. Дворкин Л.И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона. - Киев: Вища школа, 1985. 2. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные минеральные вяжущие материалы. - Москва: Инфра-Инженерия, 2011. - 544с. 3. Модифіковані гіпсові і сульфатно-шлакові в'язучі та матеріали на їх основі: монографія / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, А. В. Мироненко, Т. О. Поліщук-Герасимчук, М. Г. Кундос/, під ред. Л. Й. Дворкін.– Рівне: 2011.– 188 с. 4. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: Підручник. - К.: Основа, 2012. 5. Штарк Й., Вихт Б. – Киев: Оранта, 2004. – 301 с. 6. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Изд. 2-е, испр. и доп.- М.: Химия, 1978 – 392 с. 7. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. - New York: Nova Science Publishers, 2012. - 173 pp. 8. Ефективність використання лужного шлакопортландцементу з добавкою сульфату кальцію / В. І. Гоц, О. В. Ластівка, І. І. Руденко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2013. - Вип. 25. - С. 35-40.