

УДК 666.952

*Дворкін Л.Й., доктор технічних наук, професор,
Дворкін О.Л., доктор технічних наук, професор,
Мироненко А. В., кандидат технічних наук, доцент,
Степасюк Ю.О., аспірант,
Національний університет водного господарства та
природокористування,
33028, м. Рівне, вул. Чорновола, 49, корпус №6, к. 610
тел. +38(0362)40-05-10, e-mail: l.i.dvorkin@nuwm.rv.ua*

МІЦНІСТЬ БЕТОНУ НА МАЛОКЛІНКЕРНОМУ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ

В статті розглянуто результати досліджень бетонів, виготовлених на основі малоклінкерного шлакопортландцементу зі вмістом клінкеру менше 20 %. Визначено вплив різних пластифікуючих добавок та тепловологісної обробки на міцнісні характеристики бетону. Запропоновано методику розрахунку складів бетону на малоклінкерному ШПЦ міцністю до 60 МПа.

Ключові слова: активність, бетон, клінкер, механо-хімічна активація, міцність, портландцемент, шлак.

Однією з найактуальніших проблем сучасної будівельної галузі є розробка і впровадження ресурсозберігаючих технологій, що сприяє широкому застосуванню промислових відходів як сировини для виробництва будівельних матеріалів.

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 - 20%. Малоклінкерні цементы, наповнені промисловими відходами (шлак, зола-винесення), мають ряд позитивних особливостей. Вони характеризуються низькою вартістю, їх виробництво менш енергоємне, дозволяє утилізувати накопичені відходи, знизити шкідливі викиди в атмосферу. Однак такі цементы поки не надто популярні серед виробників головним чином через відносно низьку активність (найбільш поширена марка М400), повільного набору міцності і підвищеної водопотреби.

Одним з перспективних напрямів підвищення активності та інших будівельно-технічних властивостей малоклінкерних композиційних цементів є механо-хімічна активація [4], що досягається комплексним застосуванням тонкого помелу в'язучих в поєднанні з введенням ефективних хімічних добавок.

Метою даної роботи було вивчення комплексного впливу на міцність бетону, виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ) витрати цементу, при відомому значенні водопотреби і заданій рухомості бетонної суміші, та різних пластифікуючих добавок.

В дослідженнях використовували гранульований доменний шлак Криворізького металургійного комбінату, який можна віднести до основних шлаків ($M_0=1,09$) [1], 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 МШПЦ застосовували фосфогіпс-дигідрат (ФГ) Рівненського ПАТ «Азот». Хімічний склад вихідних матеріалів наведений в табл.1. Пластифікуючими добавками служили: ЛСТ, суперпластифікатор СП-1 (С-3); гіперпластифікатор на полікарбоксилатній основі Sika VK 225. В якості заповнювачів для бетону використовувались гранітний щебінь Клесівського родовища з максимальною крупністю зерен 20 мм та пісок Нетішинського кар'єру з $M_{кр}=1,9$.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований трирівневий двохфакторний план [4]. Умови планування

експериментів наведені в табл.2. Всі заміси бетонної суміші були виконані на однаковому вяжучому наступного складу: клінкер - 12 %, шлак - 88 %, фосфогіпс - 7,5% ($SO_3 - 4,5$ %). Активність вяжучого з питомою поверхнею 5534 cm^2/g складала 48 МПа. Рухомість бетонної суміші у всіх точках плану складала 7-13 см.

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	-

Таблиця 2

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Витрата в'язучого, кг/м ³ (Ц)	X ₁	300	400	500	100
2	Вміст пластифікуючи добавок, %: С-3, Sika VK 225, Sika VK 225+ЛСТ(1:1)	X ₂	0	0,3	0,6	0,3

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі водопотреби бетонної суміші та міцності на стиск стандартних бетонних кубів на основі досліджуваних в'язучих у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Також були отримані математичні моделі міцності бетону на стиск у віці 28 діб, в яких в якості варійованих факторів були обрані водоцементне відношення (X₁) та витрата пластифікуючої добавки (X₂). Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Експериментально-статистичні моделі водопотреби та міцності бетонів на малоклінкерному шлакопортландцементі

Вид пластифікатора	Статистичні моделі
<i>Водопотреба бетону</i>	
С-3	$B=177,3+6,168X_1-13,169X_2+0,936X_1^2-0,064X_2^2-3,5X_1X_2;$ (1)
Sika VK 225	$B=145,3+1,667X_1-32,507X_2+5,894X_1^2+11,894X_2^2-7,0X_1X_2;$ (2)
Sika VK 225+ЛСТ	$B=157,1+3,334X_1-28,172X_2+3,285X_1^2+7,785X_2^2-10,75X_1X_2;$ (3)
<i>Міцність на стиск у віці 7 діб</i>	
С-3	$R_{cm}^7=16,118+6,985X_1+2,217X_2+3,014X_1^2+1,114X_2^2+1,2X_1X_2;$ (4)
Sika VK 225	$R_{cm}^7=17,656+7,552X_1+6,651X_2+6,969X_1^2+1,369X_2^2+1,2X_1X_2;$ (5)
Sika VK 225+ЛСТ	$R_{cm}^7=25,372+5,251X_1+3,817X_2-3,618X_1^2-2,118X_2^2-0,2X_1X_2;$ (6)

Вид пластифікатора	Статистичні моделі
<i>Міцність на стиск у віці 28 діб</i>	
С-3	$R_{cm}^{28}=29,612+10,252X_1+2,517X_2-1,764X_1^2+0,236X_2^2+0,2X_1X_2;$ (7)
	$R_{cm}^{28}=29,702-15,663 X_1'+0,139(X_1')^2-0,191(X_2')^2;$ (8)
Sika VK 225	$R_{cm}^{28}=42,659+12,036X_1+12,736X_2+1,275X_1^2-4,625X_2^2+1,2X_1X_2;$ (9)
	$R_{cm}^{28}=31,953-21,844 X_1'-0,016(X_1')^2-0,016(X_2')^2;$ (10)
Sika VK 225+ЛСТ	$R_{cm}^{28}=38,988+9,519X_1+6,851X_2-5,451X_1^2-2,351X_2^2+1,575X_1X_2;$ (11)
	$R_{cm}^{28}=30,922-15,568 X_1'-0,02(X_1')^2-0,015X_2')^2;$ (12)
<i>Міцність на стиск у після ТВО</i>	
С-3	$R_{cm}^{TBO}=27,31+10,035X_1+2,851X_2-3,313X_1^2+0,637X_2^2+1,625X_1X_2;$ (13)
Sika VK 225	$R_{cm}^{TBO}=36,076+7,451X_1+7,968X_2-4,123X_1^2-2,473X_2^2-2,45X_1X_2;$ (14)
Sika VK 225+ЛСТ	$R_{cm}^{TBO}=29,921+6,118X_1+3,934X_2-5,789X_1^2+0,761X_2^2+0,8X_1X_2;$ (15)
<i>Міцність на стиск у після ТВО та 28 діб нормального твердіння</i>	
С-3	$R_{cm}^{TBO 28}=33,435+14,086X_1+3,701X_2-2,92X_1^2+3,53X_2^2+2,05X_1X_2;$ (16)
Sika VK 225	$R_{cm}^{TBO 28}=54,041+14,236X_1+15,636X_2-2,576X_1^2-5,736X_2^2+2,55X_1X_2;$ (17)
Sika VK 225+ЛСТ	$R_{cm}^{TBO 28}=45,727+10,969X_1+6,168X_2-7,346X_1^2-1,146X_2^2-2,4X_1X_2;$ (18)

*Тепловологісна обробка бетонів (ТВО) здійснювалась шляхом пропарювання при температурі 80°С. Швидкість підйому температури та охолодження складала 30°С за годину. Тривалість ізотермічної витримки – 6 год.

Графічні залежності, які ілюструють вплив технологічних факторів на водопотребу бетонної суміші та міцність бетону на стиск після ТВО, у віці 28 діб та після ТВО та 28 діб нормального твердіння наведені на рис. 1, 2, 3, 4.

Дослідження показали, що найбільш суттєво на водопотребу бетонної суміші впливає витрата пластифікатора (рис. 1). При збільшенні вмісту пластифікатора до 0,6% від маси цементу водопотреба бетонної суміші знижується на 20% при використанні в якості пластифікуючої добавки С-3, та на 35 % при використанні пластифікуючих добавок Sika VC 225 та Sika VC 225+ЛСТ. Також встановлено, що при вмісті пластифікатора 0,3 % від маси цементу найбільший водоредукуючий ефект спостерігається при використанні добавки Sika VC 225, гірший при використанні добавок Sika VC 225 і ЛСТ в кількостях 1:1, найгірший при використанні добавки С-3.

Міцність бетону на МШПЦ у віці 7 і 28 діб зростає із зменшенням В/Ц, що пов'язане зі збільшенням вмісту вяжучого і добавки суперпластифікатора. Дослідженнями встановлено, що із зменшенням В/Ц в умовах незначної зміни водопотреби домінуючим фактором який впливає на міцність бетону є витрата вяжучого. Збільшення вмісту добавки Sika VC 225 до величини 0,6% від маси цементу дозволяє максимально знизити В/Ц та відповідно збільшити міцність бетону в 2-ва рази. При цьому міцність бетону складає близько 40 МПа у віці 7 діб, та більше 60 МПа у віці 28 діб. При введенні добавок Sika VC 225 і ЛСТ у віці 7 діб вона складає близько 30 МПа, а у віці 28 діб більше 45 МПа, для добавки суперпластифікатора С-3 відповідно 30 МПа та 40 МПа у віці 7 та 28 діб.

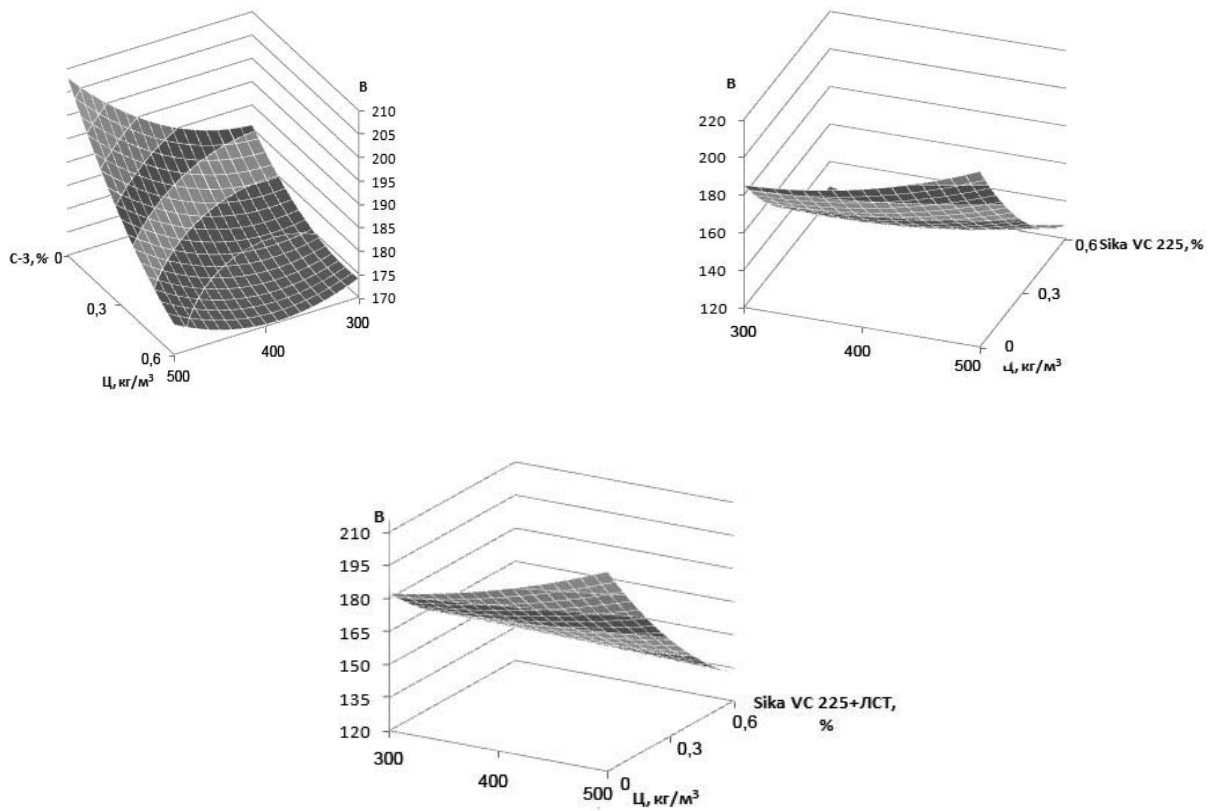


Рисунок 1. Вплив технологічних факторів на водопотребу бетону виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу

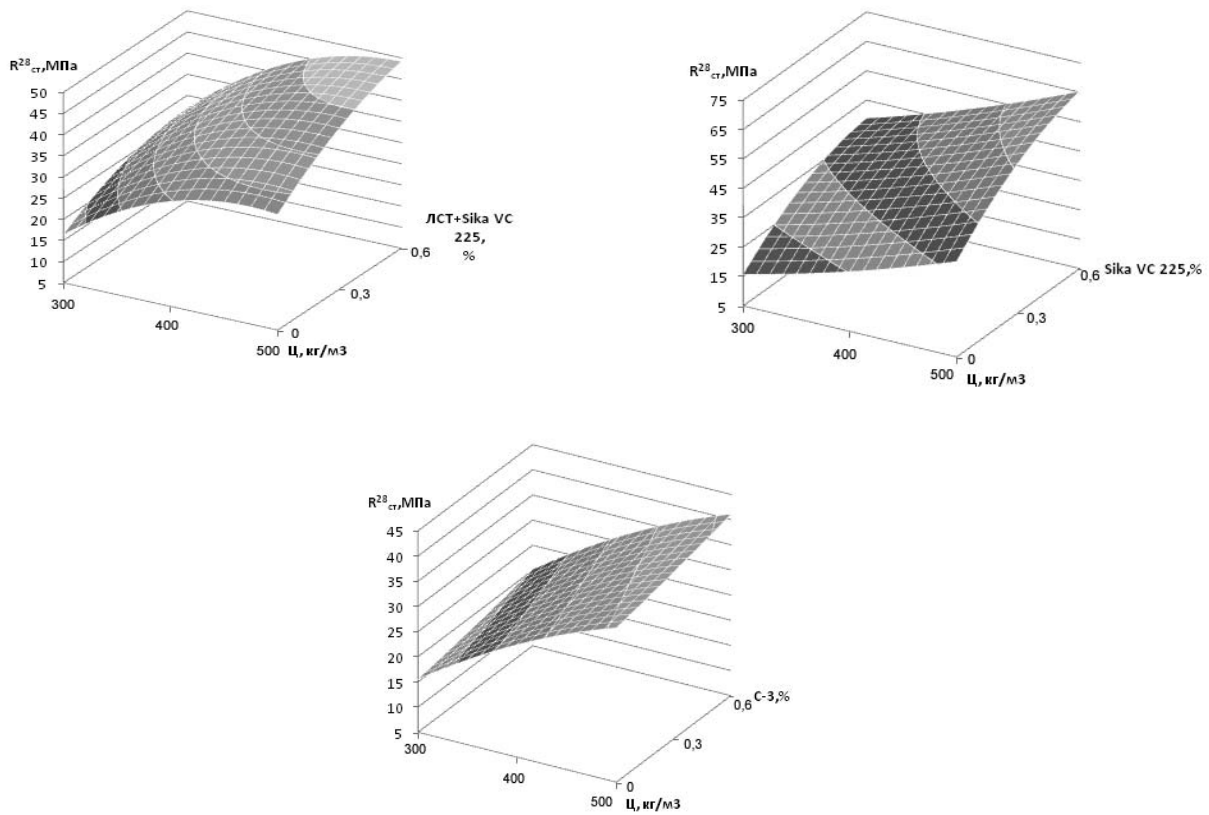


Рисунок 2. Вплив технологічних факторів на міцність бетону у віці 28 днів виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу

Відносно високу міцність бетону, при застосуванні малоклінкерного шлакопортландцементу, можна пояснити високою реакційною здатністю в'язучого, яке має підвищену тонкість помелу, що сприяє більшому активізуючому впливу цементної та сульфатної складових в'язучого на доменний шлак. Досягнення низьких значень водоцементного відношення за рахунок застосування пластифікуючих добавок сприяє гідратації цементу в «стислих умовах», що призводить до більш швидкого утворення перенасиченого розчину, з таким ступенем перенасичення, при якому формування гідратних новоутворень та структури тверднення відбувається найбільш швидко.[1]

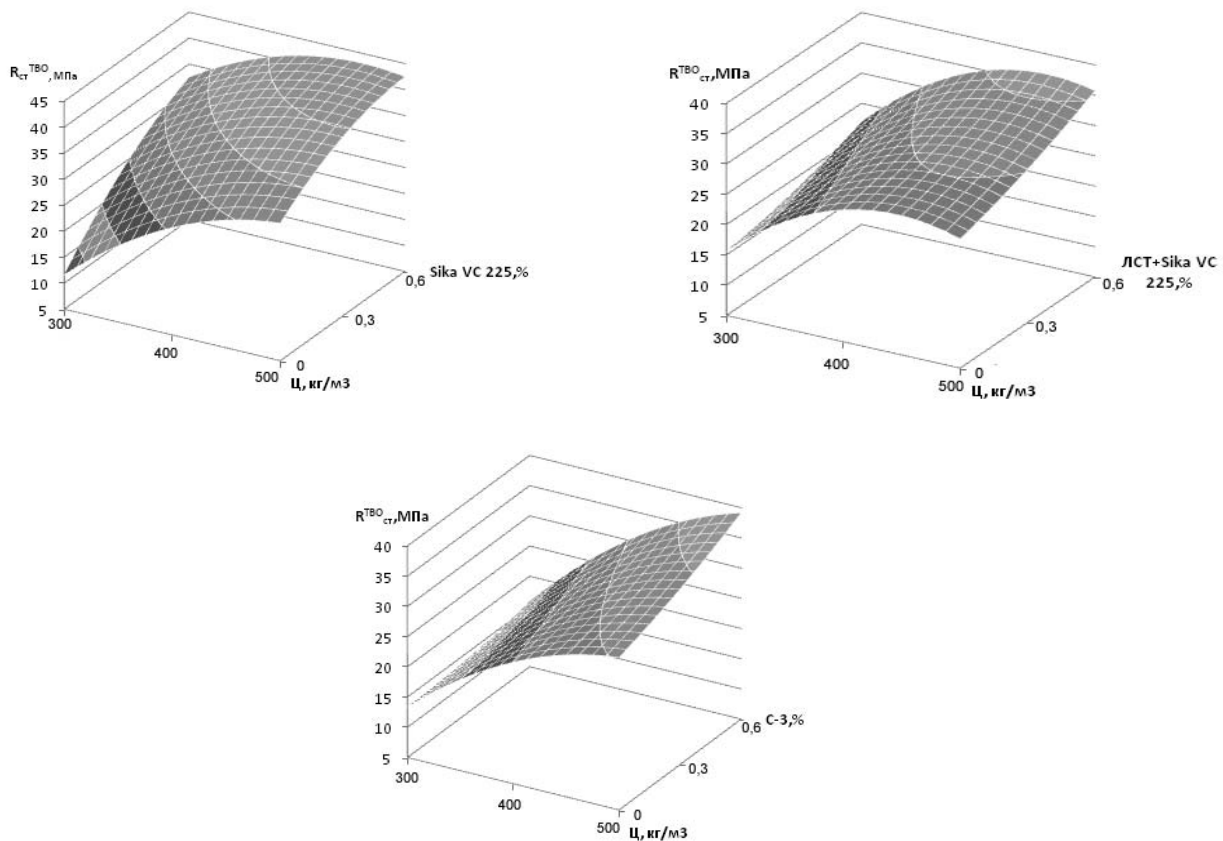


Рисунок 3. Вплив технологічних факторів на міцність бетону після тепловологісної обробки виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу.

Ще більш суттєвий ефект застосування тонкомеленого малоклінкерного шлакопортландцементу спостерігається при тепловологісній обробці (рис.3, 4). Характерною особливістю бетонів на МШПЦ є інтенсивніше зростання міцності після пропарювання. Якщо міцність зразків через 4 години після пропарювання складала 45 МПа, то у віці 28 діб раніше пропарені зразки мають міцність 80 МПа при використанні в якості добавки суперпластифікатора добавки Sika VC 225, 35 МПа та 50 МПа при використанні суміші добавок Sika VC 225 та ЛСТ, і 40 МПа та 50 МПа при використанні С-3.

Математичні моделі міцності бетону на стиск у віці 28 діб, в яких в якості варійованих факторів були обрані водоцементне відношення (X_1) та витрата пластифікуючої добавки (X_2) (табл. 3), дозволяють розраховувати склади важкого бетону виготовленого на МШПЦ із заданою міцністю та рухомістю.

При цьому методика розрахунку полягає в наступному:

1. Обираємо вид та кількість суперпластифікатора та необхідну рухомість бетонної суміші.
2. За спеціально побудованими еспериментальними графіками наведеними на рис. 5, при

заданому значенні рухомості бетонної суміші та визначеному виді та кількості пластифікатора, визначаємо витрату води.

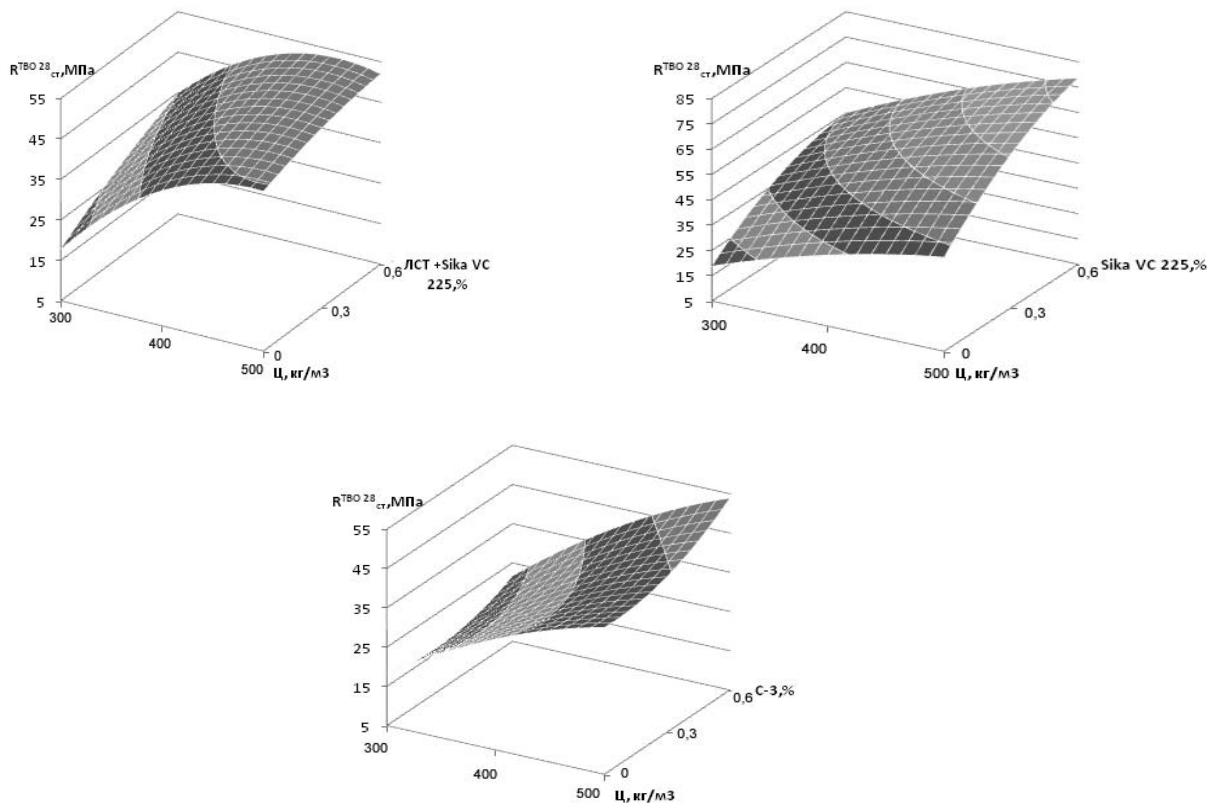


Рисунок 4. Вплив технологічних факторів на міцність бетону після тепловологісної обробки та 28 діб нормального твердіння виготовленого на основі малоклінкерного шлакопортландцементу

3. Для визначення водоцементного відношення бетонної суміші можна застосовувати рівняння 8, 10, 12 (табл. 3), коли розрахунок ведеться в кодованих значеннях варійованих факторів, або рівняння 19, 20, 21, при їх натуральних значеннях.

$$\text{С-3} \quad R_{cm}^{28} = 66,03 - 80,4B/C + 0,62(B/C)^2 - 3000(D/100)^2 + 18D/100 \quad (19)$$

$$\text{Sika VC 225} \quad R_{cm}^{28} = 82,8 - 111,7B/C - 0,42(B/C)^2 - 1777,8(D/100)^2 + 10,7D/100 \quad (20)$$

$$\text{Sika VC 225+ЛСТ} \quad R_{cm}^{28} = 67,1 - 79,32B/C - 0,53(B/C)^2 - 1666,7(D/100)^2 + 10D/100 \quad (21)$$

4. За формулою 22, знаючи витрату води та водоцементне відношення, знаходимо витрату цементу.

$$C = \frac{B}{B/C} \quad (22)$$

5. Витрати заповнювачів знаходимо за відомими рівняннями 23, 24.

$$W = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{\text{щ}}^{\text{н}}}{\rho_{\text{нщ}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}} \quad (23)$$

$$\Pi = \left(1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + B + \frac{ШЦ}{\rho_{ш}} \right) \right) \cdot \rho_{н} \quad (24)$$

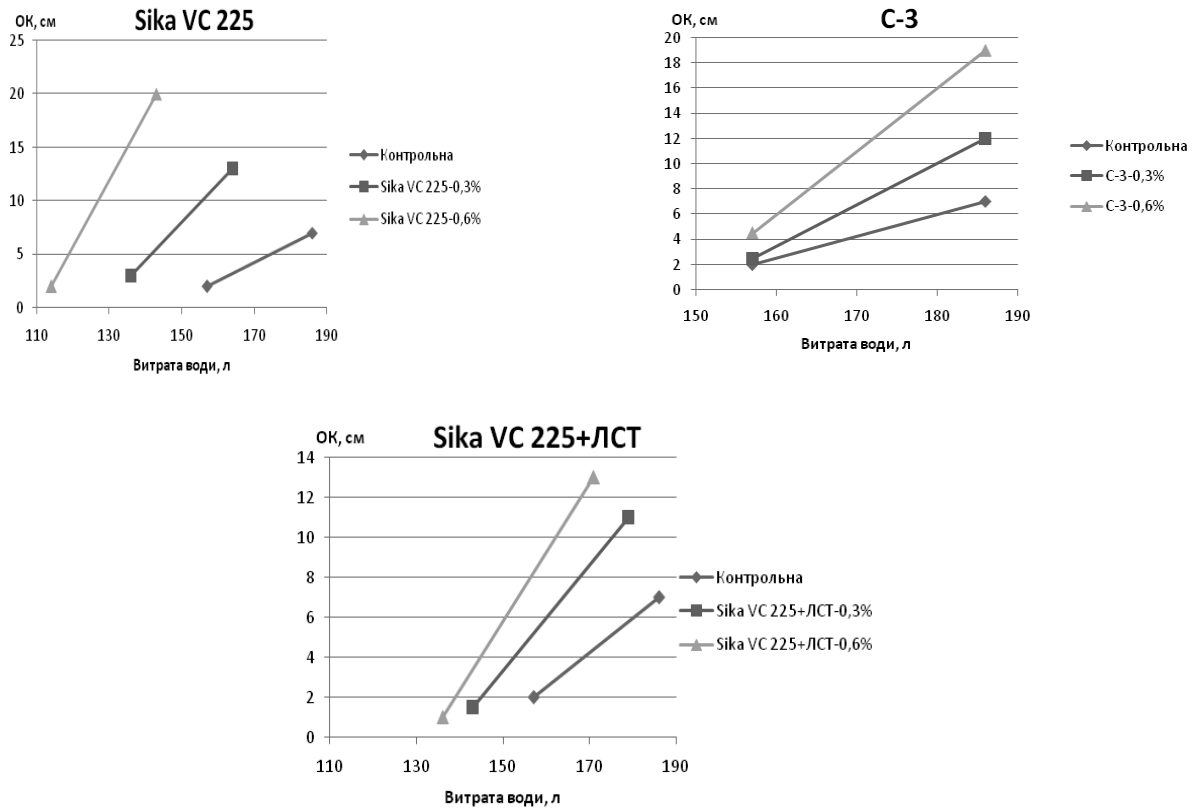


Рисунок 5. Графіки залежності рухливості бетонної суміші, виготовленої на малоклінкерному ШПЦ в залежності від витрати води на м³

Приклад розрахунку

Розрахувати склад важкого бетону виготовленого на МШПЦ з 28-добовою міцністю на стиск 40 МПа. Рухомість бетонної суміші рівна 7 см. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор С-3 в кількості 0,3 % від маси цементу.

1. За графіком наведеним на рис. 5. при заданому значенні рухомості бетонної суміші (7 см) та визначеному виді (С-3) та кількості пластифікатора (0,3% від маси цементу), визначаємо витрату води (170 л) на м³.

2. З рівняння 19 визначаємо В/Ц, яке забезпечить необхідну міцність бетону (40 МПа).

$$40 = 66,03 - 80,4В/Ц + 0,62(В/Ц)^2 - 3000(0,3/100)^2 + 18 \times 0,3/100$$

$$0,62(В/Ц)^2 - 80,4В/Ц + 26,057 = 0$$

Розв'язавши отримане квадратне рівняння отримуємо: В/Ц=0,32

3. За формулою 22 визначаємо витрату цементу

$$Ц = \frac{170}{0,32} = 530 \text{ кг / м}^3$$

4. За формулами 23, 24 знаходимо витрати заповнювачів при коефіцієнті розсуву зерен $\alpha=1,46$ (насипна густина щебеню $\rho_{нц}=1,65 \text{ г/см}^3$, істинна густина щебеню $\rho_{ц}=2,85 \text{ г/см}^3$, істинна густина піску $\rho_n=2,65 \text{ г/см}^3$). [2]

$$\Pi = \frac{1000}{1,46 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,85}} = 1042 \text{ кг/м}^3$$

$$\Pi = \left(1000 - \left(\frac{530}{2,22} + 170 + \frac{1042}{2,85} \right) \right) \cdot 2,65 = 600 \text{ кг/м}^3$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 530 кг/м³, вода – 170 л/м³, щебінь – 1042 кг/м³, пісок – 600 кг/м³. Витрата суперпластифікатора С-3 складає 0,3 % від маси цементу.

Висновки

1. Дослідження показали можливість отримання високоміцних бетонів використовуючи в якості вяжучого МШПЦ, який містить у своєму складі менше 20 % клінкеру.
2. Використовуючи сучасні гіперпластифікатори на полікарбоксилатній основі типу Sika VC після тепловологісної обробки при температурі 80°C на МШПЦ можна отримувати бетони з міцністю до 80 МПа.
3. Отримані експериментально-статистичні моделі дозволяють розраховувати склади важких бетонів, виготовлених на МШПЦ нормального та прискороного твердіння, з заданою міцністю та рухомістю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. Вяжучі речовини: Підручник. - К.: Основа, 2012.
2. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства - К.: Основа, 2007.
3. Цементные бетоны с минеральными наполнителями /Л. И. Дворкин, В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, С. М. Чудновский. Под. ред. Л. И. Дворкина, - К.: Будивельник, 1991.
4. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. - Рівне: НУВГП, 2011

ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА НА МАЛОКЛИНКЕРНОМ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ

©Дворкин Л. Й., Дворкин О.Л., Мироненко А. В., Степасюк Ю.О.

В статье рассмотрены результаты исследований бетонов, изготовленных на основе малоклинкерного шлакопортландцемента с содержанием клинкера менее 20%. Определено влияние различных пластифицирующих добавок и тепловлажностной обработки на прочностные характеристики бетона. Предложена методика расчета составов бетона на малоклинкерном ШПЦ прочностью до 60 МПа.

Ключевые слова: активность, бетон, клинкер, механо-химическая активация, прочность, портландцемент, шлак.

STRENGTH OF CONCRETE ON LOW CLINKER SLAG PORTLAND CEMENT

© Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Myronenko A.V., Stepasyuk J.O.

In article the results of research of concrete made on the basis of low clinker slag Portland cement containing less than 20% of clinker are given. The influence of different plasticizers and thermal treatment on strength characteristics of concrete is studied. The method of calculation of concrete compositions on low clinker slag Portland cement with strength up to 60 MPa is proposed.

Keywords: activity, concrete, clinker, mechanical and chemical activation, strength. Portland cement, slag.