

*Д-р техн. наук Л.Й. Дворкін,
канд. техн. наук Ю.В. Гарницький,
асп. В.В. Марчук,
студ. І.В. Фірсов (НУБГП)*

*L.I. Dvorkin, Y.V. Harnitskij, V.V. Marchuk,
I.V. Firsov*

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ ЗОЛОВМІСНИХ ЦЕМЕНТІВ НИЗЬКОЇ ВОДОПОТРЕБИ

OPTIMIZATION OF CURING CONDITIONS OF CONCRETE, BASED ON THE CEMENTS OF LAW WATER DEMAND USING FLY-ASH

Важливим технологічним процесом, який впливає на структуру й експлуатаційні властивості бетонних та залізобетонних конструкцій є тепловологісна обробка (ТВО). Ця технологічна стадія в сучасних умовах є ефективним методом прискорення твердіння, що забезпечує скорочення процесу виробництва та підвищення продуктивності. Вона багато в чому зумовлює кінцеві фізико-механічні властивості бетону, і застосування певних режимів дозволяє в тій чи іншій мірі керувати процесами структуроутворення. Це особливо важливо для бетонів виробів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, наприклад для дорожнього чи водогосподарського будівництва. У цьому випадку слід застосовувати "м'які", низькотемпературні режими, і в той же час необхідно досягти достатньої розпалубочної і передаточної міцності.

Як відомо, тепла обробка значною мірою прискорює твердіння бетонів на малоактивних цементах, ніж на в'язучих підвищеної активності. Однак у заводському виробництві для одержання максимально можливої абсолютної міцності бетону в короткі терміни доцільно застосовувати швидкотверднучі цементы та цементы підвищених марок. Тому досить

ефективними можуть бути цементы низької водопотреби (ЦНВ) з нормальною густиною цементного тіста 17...19 %. Використання ЦНВ дозволяє економити до 70 % найбільш дорогого компоненту портландцементу – клінкеру, або, при потребі, збільшувати міцнісні показники [1, 2]. Бетони на основі пропонованого в'язучого характеризуються високою морозостійкістю, водонепроникністю і тріщиностійкістю. Їх водопоглинання нижче, ніж у звичайних бетонах в 2,0-2,5 рази, а деформація усадки і повзучості – на 10-20 % [1]. Ці фактори обумовлюють високу довговічність конструкцій з використанням таких бетонів. Найвища активність ЦНВ та міцність бетонів на їх основі були отримані при використанні у цементі поряд з клінкером активних мінеральних добавок - доменного шлаку та золи-виносу [2,3]. Застосування золи-виносу доцільне також через те, що її висока дисперсність та розмелююча здатність суттєво знижують енергозатрати на помел.

Оскільки ЦНВ належить до швидкотверднучих в'язучих, то відомі на сьогодні їх дослідження проводилися тільки при твердінні в нормальних умовах. Однак, на наш погляд, цікаво було б дослідити особливості твердіння ЦНВ в умовах ТВО, тому що це може бути

використано як резерв підвищення міцності або можливого подальшого зниження вмісту клінкеру, що дозволить ще більше здешевити пропонувані в'язучі. При цьому найбільш доцільними є низькоенергоємні режими ТВО.

Метою даної роботи було встановлення оптимальних параметрів режиму ТВО, а також його вплив на кінетику набору міцності й експлуатаційні властивості бетонів на основі золівмісних ЦНВ.

Як вихідні матеріали використовували:

- як компоненти ЦНВ: портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 з таким мінералогічним складом клінкеру: C_3S – 57,1 %; C_2S – 21,27 %; C_3A – 6,87 %; C_4AF – 12,19 %; золу-виносу Бурштинської ТЕС, комплексний модифікатор у складі:

суперпластифікатор (СП) полікарбоксилатного типу SikaViscoCrete 225 та інтенсифікатор помелу – пропіленгліколь;

- крупний заповнювач - базальтовий щебінь з $D_{\max}=20$ мм,

- дрібний заповнювач – кварцовий пісок з $M_k=1,9$.

З урахуванням речовинного складу портландцементу склад отриманого в'язучого був такий: клінкер – 50 %, шлак – 12 %, зола-виносу – 38 %, СП – 0,4...1,0 %, пропіленгліколь – 0,04 %.

З метою досягнення заданого рівня значущості при мінімальній кількості дослідів використовували математичне планування експерименту. Був реалізований трирівневий чотирифакторний план B_4 [4], умови планування якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодовий вид	-1	0	+1	
Вміст добавки СП у ЦНВ, %	X_1	0,4	0,7	1,0	0,3
Водоцементне відношення В/Ц	X_2	0,25	0,3	0,35	0,05
Час ізотермічної витримки, τ_{i3} , год	X_3	4	6	8	2
Максимальна температура T_{i3} , $^{\circ}C$	X_4	60	75	90	15

У ході досліджень у кожній точці плану для оцінки впливу факторів та ефективності ТВО на міцність бетонів виготовляли стандартні зразки-куби (10x10 см), які тверділи у нормальних умовах. Водопотреба бетонної суміші в усіх точках була однаковою. Теплова обробка проводилась у лабораторній пропарювальній камері за таким режимом: попереднє витримання – 2 год; піднімання температури зі швидкістю $25^{\circ}C/год$; ізотермічна витримка – згідно з умовами планування (табл. 1); «термосне»

охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків на стиск через 4 год та у віці 28 діб, а також зразків, які тверділи без ТВО.

Матриця планування та отримані експериментальні результати наведені в табл. 2. У графі 10 зазначена витрата портландцементного клінкеру на 1 м^3 бетону, а в графі 11 – її відношення до міцності бетону після ТВО. Цей показник можна вважати одним із критеріїв енергоефективності бетону в цілому [5] та режиму його ТВО зокрема.

Матриця планування та експериментальні результати

№ п/п	Фактори впливу				Рухливість*	Міцність на стиск, МПа у віці:			Витрата клінкеру (Кл), ³ кг/м ³	$\frac{Kл}{R_{ТВО}}$, кг/МПа
	СП, %	В Ц	T _{із} , год	t _{із} , °С		4 год після ТВО	28 діб після ТВО	28 діб НТ**		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,0	0,35	8	90	РК 60	57,3	59,0	43,0	160	2,8
2	1,0	0,35	8	60	РК 59,5	52,8	56,0	42,8	160	3,0
3	1,0	0,35	4	90	РК 58,5	55,1	57,6	44,9	160	2,9
4	1,0	0,35	4	60	РК 59	47,9	56,9	41,8	160	3,3
5	1,0	0,25	8	90	РК 50	77,6	81,5	68,8	260	3,4
6	1,0	0,25	8	60	РК 50,5	71,9	79,0	68,1	260	3,6
7	1,0	0,25	4	90	РК 49	74,0	80,1	68,8	260	3,5
8	1,0	0,25	4	60	РК 49,5	70,1	77,4	67,3	260	3,7
9	0,4	0,35	8	90	ОК 5,5	56,2	60,6	44,9	160	2,8
10	0,4	0,35	8	60	ОК 5	51,4	60,2	43,9	160	3,1
11	0,4	0,35	4	90	ОК 5,5	53,4	60,7	44,7	160	3,0
12	0,4	0,35	4	60	ОК 6	47,9	59,1	44,2	160	3,3
13	0,4	0,25	8	90	Ж 3	80,0	82,1	71,2	260	3,3
14	0,4	0,25	8	60	Ж 4	74,6	80,2	70,5	260	3,5
15	0,4	0,25	4	90	Ж 5	77,9	80,1	70,8	260	3,3
16	0,4	0,25	4	60	Ж 4	72,8	78,9	70,2	260	3,6
17	1,0	0,3	6	75	РК 55	56,3	64,2	54,5	216	3,8
18	0,4	0,3	6	75	ОК 3	57,1	65,1	55,0	216	3,8
19	0,7	0,35	6	75	ОК 13	50,5	60,2	44,3	160	3,2
20	0,7	0,25	6	75	ОК 7	74,3	78,5	69,2	260	3,5
21	0,7	0,3	8	75	ОК 10,5	60,0	66,3	55,1	216	3,6
22	0,7	0,3	4	75	ОК 10,5	58,4	65,2	55,6	216	3,7
23	0,7	0,3	6	90	ОК 11	62,4	66,2	56,5	216	3,5
24	0,7	0,3	6	60	ОК 10	58,1	62,9	55,0	216	3,7

* - РК – розпалання конуса, см; ОК – осідання конуса, см; Ж – жорсткість, с.

** - зразки нормального твердіння.

Після обробки й статистичного аналізу експериментальних даних отримали рівняння регресії міцності пропареного бетону:

- через 4 год після ТВО:

$$R_{ст}^{ТВО} = 58,3 - 0,46 \cdot x_1 - 11,24 \cdot x_2 + 1,36 \cdot x_3 + 2,6 \cdot x_4 + 0,8 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 + 0,26 \cdot x_2 x_3 - 1,7 \cdot x_1^2 + 4,0 \cdot x_2^2 + 0,8 \cdot x_3^2 + 1,85 \cdot x_4^2;$$

- у віці 28 діб:

$$R_{ст}^{28} = 65,04 + 0,46 \cdot x_1 - 10,5 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,97 \cdot x_4 - 0,49 \cdot x_1 x_2 + 0,24 \cdot x_1 x_4 - 0,3 \cdot x_2 x_3 - 0,16 \cdot x_2 x_4 - 0,5 \cdot x_1^2 + 4,2 \cdot x_2^2 + 0,6 \cdot x_3^2 - 0,6 \cdot x_4^2.$$

Графічні залежності міцності пропареного бетону на основі золівмісних ЦНВ від технологічних факторів через 4 год. після ТВО наведені на рис. 1, а у віці 28 діб – на рис. 2.

Їх аналіз дозволяє розмістити фактори впливу у такий ряд за значущістю: $x_2 > x_4 > x_3 > x_1$. Як і очікувалось, найбільш впливовим є фактор В/Ц, однак

простежується його деяка взаємодія з параметрами теплової обробки – тривалістю та максимальною температурою. Серед цих двох факторів температура є більш впливовою, однак збільшення тривалості ізотермічної витримки на 2 год дозволяє компенсувати зниження максимальної температури на 15°C (точки 22 і 24) за інших рівних умов.

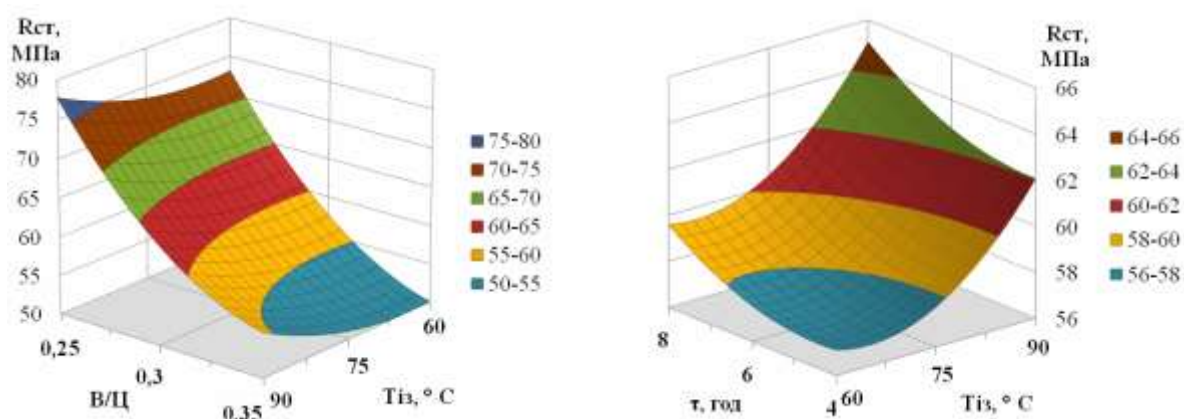


Рис. 1. Вплив технологічних факторів на міцність бетону на основі золівмісних ЦНВ після ТВО

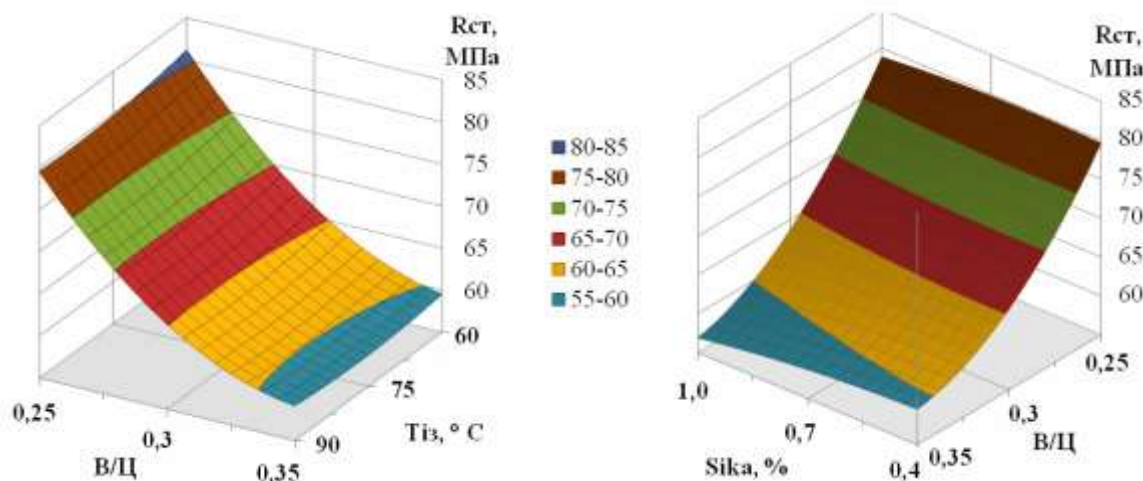


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на міцність пропареного бетону у віці 28 діб на основі золівмісних ЦНВ

У випадку збільшення ізотермічної витримки з 4 до 8 год спостерігаємо зростання міцності в межах 10...15 %, так само, як і при збільшенні температури ТВО

на $25...30^{\circ}\text{C}$. Слід урахувати, що підвищення температури ТВО більш суттєво підвищує енергозатрати, ніж збільшення тривалості, до того ж "м'які"

режими необхідні з точки зору підвищення довговічності виробів. Підвищення кількості суперпластифікатора у в'язучому з 0,4 до 0,7...1,0 % може супроводжуватись незначним зниженням міцності пропареного бетону (рис.2), але при цьому отримуємо суміші литої консистенції з розпливанням конуса до 60 см, що є позитивним моментом при виготовленні сучасних високотехнологічних бетонів, здатних до самоущільнення.

У віці 28 діб міцність бетону з різними режимами ТВО практично вирівнюється за інших рівних умов. Міцність зразків нормального твердіння в усіх випадках нижча, ніж пропарених (до 25 %) навіть при низькотемпературних режимах ТВО. Це можна пояснити більш суттєвою інтенсифікацією процесів твердіння під час ТВО бетонів на основі

золівмісних ЦНВ, ніж бетонів на звичайних портландцементях.

Для оцінки ефективності використання цементного клінкеру в пропареному бетоні можна використати відношення його витрати на 1 м³ бетону до міцності бетону через 4 год після ТВО (кілограм на мегапаскаль). Зменшення цього показника свідчить про вищу ефективність використання клінкеру. Для бетонів міцністю 35-40 МПа нормального твердіння цей критерій, як правило, знаходиться в межах 12...14 [5], для бетонів міцністю 60-80 МПа з використанням сучасних суперпластифікаторів і мікрокремнезему 7...10. Для досліджених складів зазначений коефіцієнт лежить у межах 2,8...3,8 (табл. 2 та рис. 3), що свідчить про високу ефективність ТВО при використанні в бетоні золівмісних цементів низької водопотреби.

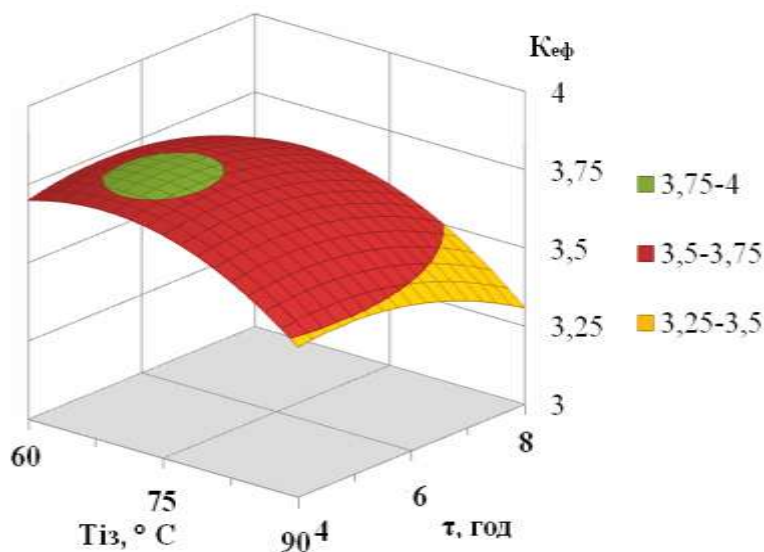


Рис. 3. Вплив технологічних факторів на ефективність використання клінкеру в бетонах на основі золівмісних ЦНВ

Цікавим є той факт, що збільшення тривалості ізотермічної витримки зменшує показник навіть більше, ніж підвищення її температури. Тому можна вважати, що низькотемпературні режими ТВО є не тільки менш енергоємними, але й більш

ефективними для бетонів на золівмісних ЦНВ.

Висновки

1. Установлено, що бетони на основі золівмісних цементів низької водопотреби, які пройшли тепловологісну обробку,

характеризуються міцністю, яка на 7...25 % вища від міцності зразків, які тверділи за нормальних умов. Теплова обробка в температурному інтервалі 60...75 °С супроводжує зростання міцності на 7...12 % в порівнянні з нормальним режимом твердіння, а в температурному інтервалі 75...90 °С – на 10...24 % при різній тривалості ізотермічної витримки.

2. Серед параметрів теплової обробки вплив її температури на міцність безпосередньо після ТВО є більш значним, ніж тривалість теплової обробки. Однак збільшення тривалості ізотермічного витримання дозволяє компенсувати зниження температури без підвищення сумарних енергозатрат. Через 4 год після ТВО для досліджених бетонів навіть при мінімальних її параметрах досягається відпускна міцність більше 90 % від марочної.

3. У віці 28 діб вплив параметрів ТВО на міцність нівелюється. Використання в бетоні золовмісних ЦНВ дозволяє

досягти марочної міцності пропареного бетону 56...60,7 МПа при витраті в'язучого 320 кг/м³ та 77,4...82,1 МПа при витраті в'язучого 520 кг/м³.

4. Одним із критеріїв ефективності використання портландцементного клінкеру в бетоні є відношення його витрати на 1 м³ до досягнутої міцності бетону. Цей же показник можна використати для оцінки ефективності теплової обробки, якщо враховувати міцність після ТВО. Обробка отриманих даних свідчить про те, що для підвищення ефективності ТВО доцільне збільшення обох її параметрів – тривалості та температури і визначальним фактором при цьому стають можливі енергозатрати.

5. Для виробів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, доцільною є ТВО бетонів на основі золовмісних ЦНВ при температурі не більше 60⁰С з тривалістю ізотермічної витримки 4...6 год.

Список літератури

1. Цементы низкой водопотребности: новые результаты и перспективы [Текст] / Б.Э. Юдович [и др.] // Цемент и его применение. – 2006. – Июль-август. – С. 80-84.
2. Високоміцні бетони на цементах низької водопотреби з використанням пиловидних відходів промисловості [Текст] / Л.Й. Дворкін [та ін.]. // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб.; Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів «НДІБМВ». – К.: Знання, 2012. – Вип. 43. – С. 73-80.
3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст]. – М.: 1998. – 768 с.
4. Дворкін, Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту [Текст] / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
5. Дворкин, Л.И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона [Текст]. – К.: Вища шк., 1985.

Ключові слова: цементы низької водопотреби, зола-виносу, тепловологісна обробка, довговічність бетону.

Анотації

Наведені результати дослідження впливу режимів тепловологісної обробки на міцність бетонів на основі золовмісних цементів низької водопотреби. Встановлено оптимальні параметри режимів тепловологісної обробки.

Приведены результаты исследования влияния режимов тепловлажностной обработки на прочность бетонов на основе золосодержащих цементов низкой водопотребности. Установлены оптимальные параметры режимов тепловлажностной обработки.

It is shown the findings of an investigation into curing conditions influence on the concrete strength, based on the cements of low water demand, using fly-ash. Optimal curing conditions parameters have been determined.