

**УДК 666.9.015**

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗОЛОВМІСНИХ ЦЕМЕНТІВ НИЗЬКОЇ ВОДОПОТРЕБИ**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЗОЛОСОДЕРЖАЩИХ ЦЕМЕНТОВ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ**

**EFFICIENCY OF STEAM CURING HIGH-STRENGTH CONCRETE USING ASH-CONTAINING LOW WATER CEMENT**

**Марчук В. В., аспірант** (Національний університет водного господарства та природокористування, м.Рівне)

**Марчук В. В., аспирант,** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

**Marchuk V. V., postgraduate,** (National University of Water Management and Nature Resources, Rivne)

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

**Приведенные 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 furnace dust fly-ash. Optimal curing conditions parameters have been determined.**

**Ключові слова:**

**Цемент низької водопотреби, тепловологісна обробка, довговічність бетону. Цемент низької водопотребности, тепловлажностная обработка, долговечность бетона.**

**Low water demand cements, steam curing conditions, durability of concrete.**

**Складні економічні та екологічні проблеми**, характерні в даний час для України, спонукають до розробки нових низькоенергоємних технологій виготовлення будівельних матеріалів. А також переробки відходів промисловості в тому числі зол та шлаків ТЕС, що забезпечувало би максимальний ступінь їхньої утилізації. Тепловолгісна обробка (ТВО) бетону - одна з основних та найбільш енергоємних технологічних операцій, що дозволяє в найкоротші терміни отримання бетонних і залізобетонних конструкцій з належною якістю. 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 (для дорожнього чи водогосподарського будівництва). У цьому випадку слід застосовувати "м'які", низькотемпературна режими, і в той же час необхідно досягти достатньої розпалубочної і передаточної міцності.

Як відомо, тепла обробка більшою мірою прискорює твердіння бетонів на малоактивних цементах, ніж на в'язучих підвищеної активності. Однак в 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), використання яких дозволяє економити до 70% клінкеру – найбільш енергоємного компоненту при виробництві портландцементу, або, при необхідності, збільшувати активність в'язучого [1, 2]. Бетони на основі пропонованого в'язучого характеризуються високою морозостійкістю, водонепроникністю і тріщиностійкістю. 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].

Оскільки ЦНВ відносяться до швидкотверднучих в'язучих, то більшість досліджень проводилися при твердіння в нормальних умовах. Таким чином викликає інтерес дослідження особливостей твердіння ЦНВ в умовах ТВО. Так як це можливо дозволить досягти зниження вмісту клінкеру, що ще більше здешевити пропоновані в'язучі та конструкції на їх основі, або може бути використано як резерв підвищення міцності. При цьому найбільш доцільними згідно літературних джерел є низькоенергоємні режими ТВО

При визначенні найбільш ефективного режиму теплової обробки бетону необхідно враховувати цілий ряд факторів, які безпосередньо впливають на кінетику процесу структуроутворення в цих умовах: вид і мінералогічний склад в'язучого, водо-цементне відношення, тепловиділення та ін. При прогріванні бетону в ньому одночасно протікають процеси, які обумовлюють прискорення твердіння цементу і зміцнення структури бетону, а також

деструктивні процеси, які виникають в результаті фізичних змін під дією температурних і вологісних факторів. До них відносяться явища, пов'язані з температурними, лінійними і об'ємними змінами, внутрішніми деформаціями, капілярним тиском. При тепловій обробці бетону вода і повітря в порах і капілярах мають більший коефіцієнт температурного розширення ніж заповнювачів і новоутворень, тому частинки твердих тіл розсуваються при нагріванні бетону, таким чином створюється внутрішній тиск, що супроводжує порушення структури та появи мікротріщин та інших дефектів. В залежності від того, в якій мірі проявляються зазначені деструктивні явища при тепловій обробці бетону, можливе зниження його основних властивостей (міцності, стійкості в агресивних середовищах, морозостійкості та ін.) Порівнянні з бетоном нормального твердіння. Оптимізація режимів теплової обробки спрямована, перш за все на нейтралізацію побічних деструктивних ефектів. Тривалість процесу теплової обробки повинна бути обмежена моментом, коли міцність бетону досягне 60 ... 80% його марки. За такої умови високоміцні бетони продовжують твердіти і після тепло обробки.

Незалежно від виду в'язучого ефективність теплової обробки підвищується за всіма показниками при застосуванні бетонів з низьким значеннями водоцементного відношення. Для скорочення термінів теплової обробки є досить ефективним застосування жорстких бетонних сумішей. Ефективність прогріву бетону з різними витратами цементу, а отже, і водоцементного відношення не однакова. Зі зменшенням В/Ц інтенсивність твердіння бетону зростає

**Мета роботи** полягала в експериментальному встановленні оптимальних параметрів режиму ТВО, а також його вплив на кінетику набору міцності й експлуатаційні властивості бетонів на основі золівмісних ЦНВ.

У якості вихідних матеріалів використовували:

- як компоненти ЦНВ: портландцемент ПЦ П/А-Ш-500 з наступним мінералогічним склад 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 полікарбоксилатного типу SikaViscoCrete 225 та інтенсифікатор помелу – пропіленгліколь; враховуючи той момент, що був використаний товарний портландцемент ПЦ П/А-Ш, то склад отриманого в'язучого був наступний: клінкер – 50%, шлак – 12%, зола-виносу – 38%, СП – 0,4...1,0%, пропіленгшліколь – 0,04%.

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

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

**Дослідження впливу режимів ТВО** виконано з використанням методу планування експерименту  $B_4$  [4], в якому як змінні фактори вибрано: вміст добавки Sika у ЦНВ ( $X_1$ ) водоцементне відношення ( $X_2$ ) тривалість ізотермічної витримки ( $X_3$ ) та максимальна температура ( $X_4$ ). Досліджуваним параметром вибрано міцність при стиску. У ході досліджень в 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 проводиться у лабораторній пропарювальній камері за наступним режимом: попереднє витримання – 2 год; підйом температури зі швидкістю 25°С/год; ізотермічна витримка – 60°С, 75°С, 90°С; «термосне» охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків при стиску через 4 год та у віці 28 діб, а також зразків, які тверділи без ТВО. Матриця планування та отримані експериментальні результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Матриця планування та експериментальні результати

№	Фактори впливу				Рухли- вість*	Міцність при стиску, МПа у віці:			Витрата клинкеру (Кл), кг/м <sup>3</sup>	$\hat{E}\hat{\epsilon}$ $\frac{R_{0\Delta t}}{R_{0\Delta t}}$ кг/МПа
	Sika, %	В Ц	T <sub>із</sub> , год	t <sub>із</sub> , °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

Примітка.\* - РК – розплив конуса, см; ОК – осадка конуса, см; Ж – жорсткість, с.

У графі 10 зазначена витрата портландцементного клінкера на 1 м<sup>3</sup> бетону, а в графі 11 – її відношення до міцності бетону після ТВО. Цей показник можна вважати одним із критеріїв енергоефективності бетону [5].

Після обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримали рівняння регресії міцності бетону після ТВО та твердіння при нормальних умовах (табл. 2).

Таблиця 2

Статистичні моделі міцності бетонів при стиску

Параметри	Статистичні моделі
через 4 год після ТВО	$R_{ст}^{ТВО} = 58,3 - 0,46 \cdot x_1 - 11,24 \cdot x_2 + 1,36 \cdot x_3 + 2,6 \cdot x_4 + 0,99 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 + 0,03 \cdot x_1 x_4 + 0,26 \cdot x_2 x_3 + 0,12 \cdot x_2 x_4 - 0,08 \cdot x_3 x_4 - 1,7 \cdot x_1^2 + 4,0 \cdot x_2^2 + 0,8 \cdot x_3^2 + 1,85 \cdot x_4^2$
у віці 28 дів після ТВО	$R_{ст}^{ТВО,28} = 65,04 - 0,86 \cdot x_1 - 10,5 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,97 \cdot x_4 - 0,49 \cdot x_1 x_2 - 0,05 \cdot x_1 x_3 + 0,24 \cdot x_1 x_4 - 0,3 \cdot x_2 x_3 - 0,16 \cdot x_2 x_4 + 0,1 \cdot x_3 x_4 - 0,5 \cdot x_1^2 + 4,2 \cdot x_2^2 + 0,6 \cdot x_3^2 - 0,6 \cdot x_4^2$
у віці 28 дів НТ	$R_{ст}^{НТ,28} = 55,37 - 0,86 \cdot x_1 - 12,9 \cdot x_2 + 0,28 \cdot x_1 x_2 - 0,71 \cdot x_1^2 + 1,29 \cdot x_2^2$

Ізопараметричні залежності міцності пропареного бетону на основі золовмісних ЦНВ від технологічних факторів через 4 год. після ТВО наведені на рис.2, а у віці 28 дів на рис. 3. Їх аналіз дозволяє розмістити фактори впливу у наступний ряд за значимістю:  $x_2 > x_4 > x_3 > x_1$ .

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 впливовим, однак збільшення тривалості ізотермічної витримки на 2 год. дозволяє компенсувати зниження максимальної температури на 15<sup>0</sup>С (точки 22 і 24) за інших рівних умов. пропареного бетону на основі запропонованих ЦНВ.

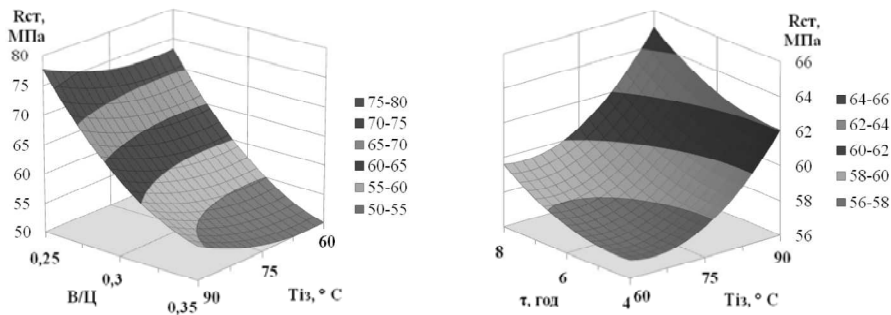


Рис. 1. Вплив технологічних факторів на міцність пропареного бетону через 4 год. після ТВО на основі золовмісних ЦНВ.

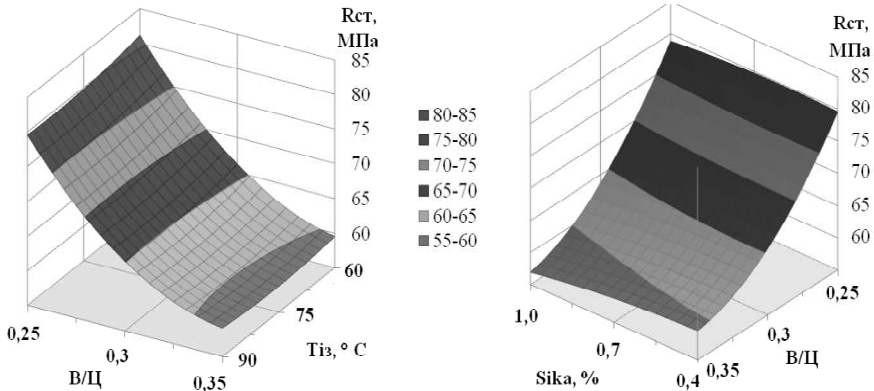


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на міцність пропареного бетону у віці 28 діб на основі золівмісних ЦНВ.

У випадку збільшення ізотермічної витримки з 4 до 8 годин спостерігаємо ріст міцності в межах 10...15%, так само як і при збільшенні температури ТВО на 25...30<sup>0</sup>С. Слід врахувати, 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 розливом 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 зв 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.

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.

Для оцінки ефективності використання цементного клінкеру в бетоні було використано коефіцієнт ефективності, який рівний відношенню витрати цементного клінкеру в 1 м<sup>3</sup> бетону до його міцності (кг/МПа). Для бетонів міцністю 35-40 МПа цей критерій знаходиться в межах Кеф.к.= 12...14 [5], для бетонів міцністю 60-80 МПа з використанням сучасних суперпластифікаторів і мікрокремнезему Кеф.к.=7...10. Для досліджених складів зазначений коефіцієнт лежить в межах 2,8...5 (табл. 2), що свідчить

про високу ефективність ТВО при використанні в бетоні золівмісних цементів низької водопотреби.

### **Висновки**

1. Встановлено, що бетони на основі золівмісних цементів низької водопотреби, які пройшли ТВО, характеризуються міцністю, яка на 7...25% вища від міцності зразків, які тверділи при нормальних умовах. Теплова обробка в температурному інтервалі 60...75°C супроводжує ріст міцності на 7...12% в порівнянні з нормальним режимом твердіння, а в інтервалі 75...90°C – на 10...24% при різній тривалості ізотермічної витримки.

2. Серед параметрів теплової обробки вплив її температури на міцність безпосередньо після ТВО є більш значимим, 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 золівмісних ЦНВ дозволяє досягти марочної міцності пропареного бетону 56...60,7 МПа при витраті в'язучого 320 кг/м<sup>3</sup> та 77,4...82,1 МПа при витраті в'язучого 520 кг/м<sup>3</sup>.

4. Одним із критеріїв ефективності використання портландцементного клінкеру в бетоні є відношення його витрати на 1 м<sup>3</sup> 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 і визначальним при цьому є енергозатрати.

5. Для виробів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, доцільною є ТВО бетонів на основі золівмісних ЦНВ при температурі не більше 60°C з тривалістю ізотермічної витримки 4...6 год.

1. Високоміцні бетони на цементях низької водопотреби з використанням пиловидних відходів промисловості / Л.Й. Дворкін та ін. – Науковий-технічний збірник. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Випуск 43. – Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів «НДІБМВ», Знання, 2012. – С. 73 - 80. 2. Золосодержащие цементы низкой водопотребности / Л.И. Дворкин и др. – Технологии бетонов. Вип. 5-6 (70-71). – Москва 2012. – С. 24-27. 3. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика, М.: 1998.-768 с. 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- 174 с. 5. Дворкин Л.И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона. - Киев: Вища школа, 1985г.