



Якимечко Я.Б.



Білобран Б.С.

**Якимечко Я.Б., доктор технічних наук, доцент,  
Білобран Б.С., доктор технічних наук, професор,  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів**

## НАПРУЖУВАЛЬНІ ЦЕМЕНТИ З ПІДВИЩЕНОЮ ЕНЕРГІЄЮ РОЗШИРЕННЯ

У практиці будівництва широко використовуються напружувальні цементи з підвищеною енергією розширення та водонепроникністю. Одним із напрямків практичного використання напружувальних цементів є ремонт пошкоджених ділянок нафтогазопроводів шляхом підсилення розширними композиціями [1], що не потребує зупинки перекачування транспортованого продукту та звільнення трубопроводу. Застосування бандажів з розширними композиціями надійно підсилює дефектну зону та зменшує рівень напружень від робочого тиску за рахунок обтискування трубопроводу. В'яжуче для сталобетонних бандажів повинно характеризуватись достатньою щільністю та низькою газопроникністю [2]. Таким вимогам в найбільшій мірі відповідають напружувальні композиції на основі рядового портландцементу та модифікованого негашеного вапна [3].

Для отримання напружувальних композицій використовували портландцемент ПЦ І-500 та негашене вапно І сорту. Проводились дослідження впливу складу композиції на величину зусилля розширення та фазовий склад продуктів гідратації. Кількість води для приготування напружувального цементу підбирали за умов досягнення необхідної рухливості, визначеної циліндром Суттарда.

Визначення впливу вапна показало, що при збільшенні його кількості спостерігається пряmlinійна залежність між вмістом СаО та величиною розширення (табл.1). Через 1 добу композиції з вмістом негашеного вапна понад 25,0 мас. % створюють необхідне зусилля розширення, величина якого стабілізується через 3 доби тверднення.

Для ремонту газопроводів високого і середнього тиску важливим показником є зусилля обтискування труби, що повинно становити 3,0–5,0 МПа, тому вміст модифікованого вапна у складі напружувального цементу повинен становити понад 30,0 мас. %.

Встановлено, що при додаванні в склад композиції понад 20,0 мас. % вапна зразки в процесі тверднення руйнуються. Однак дослідження показали, що при твердненні

в умовах обмеженого об'єму міцність каменю зростає (табл.2). Збільшення кількості СаО у ранні терміни тверднення погіршує фізико-механічні характеристики напружувальних композицій. Така тенденція зберігається і для значень міцності на згин. З часом тверднення кількість кристалічної фази збільшується і відбувається ущільнення структури, внаслідок чого у пізні терміни тверднення зразки з підвищеним вмістом негашеного вапна досягають високих значень міцності на стиск. Дослідженнями відкритої пористості напружувальних цементів з добавкою негашеного вапна та 1,0 мас.% сахарози встановлено, що через 7 та 14 діб пористість становить 14,5–18,5 % та 11,7–9,0 % відповідно, а через 28 діб знижується до значень 7,0–8,5 %.

За використанням термогравіметричного та диференційно-термічного аналізу встановлено склад продуктів гідратації напружувального цементу (табл.3). Втрата маси при температурі 145 °С, що супроводжується появою чітких ендоефектів на кривих ДТА, пояснюється виділенням фізичної та хімічно зв'язаної води з гідросилікатів та еtringіту. Зменшення маси зразків у температурному інтервалі 135–450 °С зумовлено розкладом гідросилікатів кальцію, еtringіту та початку дегідратації гідроалюмінатів і монокарбонату чотирікальцієвого гідроалюмінату. Слід зазначити, що зразки на основі вапна при цій температурі характеризуються підвищеною втратою маси, що пояснюється каталітичним впливом СаО на процеси утворення гідросилікатів. Втрати маси в інтервалі 450–550 °С зумовлені розкладом портландиту, що утворився при гідратації кальцію оксиду та С<sub>3</sub>S. При температурі 520–725 °С зменшення маси зразків пояснюється процесами дегідратації гідроалюмінатів. В температурному інтервалі 720–1000 °С втрата маси та поява чітких ендоефектів на кривих ДТА відбувається за рахунок розкладу СаСО<sub>3</sub>, утвореного частковою карбонізацією портландиту.

Отже, при твердненні напружувальної композиції в умовах обмеження розширення збільшується кількість кристалічних фаз у продуктах гідратації порівняно з портландцементом без добавок [4].

Таблиця 1.

Вплив кількості вапна  
добавкою 1,0 мас. % сахарози на зусилля розширення

№ з/п	Склад композиції, мас. %		В/Т	Зусилля розширення, МПа, у віці, діб		
	ПЦ І-500	Вапно негашене		1	3	7
1	95	5	0,27	0	0,17	0,22
2	90	10	0,32	0,12	0,32	0,45
3	85	15	0,33	0,31	0,54	0,66
4	80	20	0,35	0,55	0,75	0,97
5	75	25	0,36	0,46	2,32	2,68
6	70	30	0,38	0,98	4,63	4,89

Таблиця 2.

Фізико-механічні характеристики напружувальних цементів в умовах обмеженого об'єму

№ п/п	Склад композиції, мас. %		В/Т	Міцність на згин/стиск, МПа, у віці, діб		
	ПЦ І-500	Вапно негашене		7	14	28
1	90	10	0,28	3,0/14,9	4,8/19,6	7,3/27,1
2	85	15	0,29	2,8/11,3	5,9/18,5	8,2/29,7
3	80	20	0,33	2,2/10,8	6,3/15,2	9,4/31,0
4	70	30	0,33	1,9/10,2	7,1/14,7	9,8/31,8

Результати комплексного диференційно-термічного аналізу  
портландцементного каменю через 90 діб

№	Стадія	Температурний інтервал, °C	Втрата маси, Δ m, %	Ендо-ефект, °C	Характеристика реакції
1	1	20–135	4,2	115	Виділення фізично зв'язаної води, початок розкладу гідросилікатів та еtringіту
	2	135–450	4,4	–	Повна дегідратація гідросилікатів, початок розкладу гідроалюмініатів та поетапний розклад гідрокарбоалюмініатів
	3	450–550	6,4	515	Розклад портландиту
	4	550–720	1,6	–	Повна дегідратація гідроалюмініатів
	5	720–1000	7,0	835	Розклад карбонату
	Загальні втрати			23,6	
	Портландит			6,4	
Кальцит			7,0		
Гідросилікати			8,6		
2	1	20–145	3,4	105	Виділення фізично зв'язаної води, початок розкладу гідросилікатів та еtringіту
	2	145–370 370–450	2,8 0,6	–	Повна дегідратація гідросилікатів, початок розкладу гідроалюмініатів
	3	450–520	0,8	490	Розклад портландиту
	4	520–722	3,5	–	Повна дегідратація гідроалюмініатів
	5	722–1000	4,4	820	Розклад карбонату
	Загальні втрати			15,5	
	Портландит			0,8	
Кальцит			4,4		
Гідросилікати			6,8		

Таблиця 4.

## Характеристики гранульованого вапна

Показник	Гранульоване вапно	Гранульоване вапно та термооброблене вапно
Середня густина, г/см <sup>3</sup>	1,83	1,88
Відкрита пористість, %	31,8	27,5
Водопоглинання через 10 хв, %	4,3	1,7
Час досягнення температури 60 °C, хв	33	307
Час гідратації при В/В=1,0, хв	36	315
Максимальна температура гідратації при В/В=1,0, °C	120	107

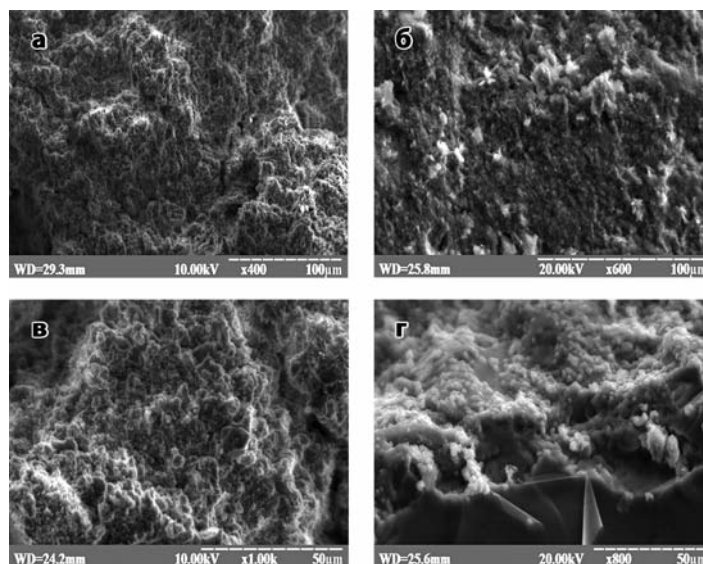


Рис. 1. Мікроструктура розширеного цементу через 360 діб тверднення: а, в – в умовах вільного розширення; б, г – при обмеженні об'єму

За даними електронної мікроскопії умови тверднення змінюють габітус кристалів портландиту та їх розміри (рис.1). Так, структура цементу у звичайних умовах тверднення характеризується наявністю великої кількості мікропор (рис.1, а). В основному спостерігаються новоутворення у вигляді губчастої маси, в якій зустрічаються скупчення волокнистих кристалів високоосновних гідросилікатів кальцію. Поверхня цементу зразків в умовах обмеження розширення є щільною з дрібнозернистою структурою (рис.1, б), а тісний контакт між частинками цементу та вапна сприяє росту кристалів портландиту у вигляді гексагональних пластинок розміром 10–15 мкм. Переважають дрібнодисперсні новоутворення неправильної форми (рис.1, в, г).

Одним із шляхів одержання напружувальних композицій з великим зусиллям розширення є введення в їх склад грубомеленого вапна [5]. У роботі як розширну добавку до напружувальних цементів використане гранульоване вапно, модифіковане добавкою сахарози. Таке вапно у вигляді таблеток отримують методом пресування при тиску 20,0–80,0 МПа, при цьому найбільшій щільності гранул досягають при тиску 50,0 МПа (табл.4). Результатами фізико-механічних випробувань впливу способу введення сахарози в склад таблеток вапна встановлено, що термічне модифікування (обробка гранул за температури 160 °C) забезпечує зростання щільності гранул та часу досягнення максимальної температури гасіння. Причому основний приріст зусилля розширення композицій з добавками гранульованого термічно модифікованого вапна спостерігається через 5 діб, тоді як в зразках без термічного оброблення – через 3 доби, а через 7 діб значення розширення стабілізується. Отже, для підвищення зусилля розширення при низькому вмісті вапна необхідно проводити його гранулювання за максимально високих значеннях тиску з наступним термічним модифікуванням.

Кількісний склад продуктів гідратації напружувальної композиції на основі гранульованого вапна встановлений з допомогою диференційно-термічного аналізу. Втрати маси при температурі 20–140 °C (табл.5) зумовлені виділенням фізичної вологи та частково хімічно зв'язаної води в складі гідросилікатів типу C-S-H (II) та еtringіту. При температурі 130–330 °C продовжується ступінчаста дегідратація гідросилікатів та частковий розклад гідроалюмініатів. Зменшення маси в області температур 310–450 °C відбувається унаслідок розкладу гідросилікатів та продовженням розкладу гідроалюмініатів, присутніх навколо гранул негашеного вапна. Поверхня товщиною 1 мм навколо гранул вапна в даному температурному інтервалі характеризується високими значеннями втрат маси порівняно з цементним каменем на основі розширювальної композиції, що зумовлено підвищенням вмістом гідроалюмініатів кальцію. Зменшення маси зразків при 440–550 °C зумовлено розкладом портландиту. Подальша втрата маси у температурній області 550–1000 °C відбувається внаслідок розкладу гідроалюмініатів кальцію та кальциту.

Отже, під дією напруження, що створюється у цементному каменю процеси тверднення прискорюються з утворенням стабільних гідратних сполук. При цьому упорядкування та зміцнення структури відбувається при зближенні частинок гідратів без зміни їх хімічного складу. В таких умовах відбуваються процеси контактної конденсації тверднення, ґрунтовно досліджені Руновою Р.Ф. та ін. [6].

Розширні цементні знаходять широке використання для виготовлення дрібнозернистих бетонів з пониженою усадкою. Перспективним напрямком використання напружувальних дрібнозернистих бетонів є виготовлення на їх основі захисних бандажів для ремонту трубопроводів високого тиску.

Для одержання дрібнозернистого бетону використано напружувальні композиції на основі портландцементу та

Таблиця 5.

Результати ДТА напружувальної композиції через 7 днів тверднення в умовах обмеження розширення

№ п/п	Досліджувана ділянка	Стадія розкладу	Температурний інтервал, °С	Втрата маси, %	Ендо-ефект, °С
1	Поверхня товщиною 1 мм навколо гранул вапна	1	20–130	2,25	100
		2	130–310	2,50	–
		3	310–450	1,12	–
		4	450–550	1,02	490
		5	550–1000	5,01	810
Загальні втрати		20–1000		11,90	
2	Цементний камінь на основі розширювальної композиції	1	20–140	2,02	90
		2	140–330	2,01	–
		3	330–440	0,75	–
		4	440–550	0,73	480
		5	550–1000	2,93	830
Загальні втрати		20–1000		8,44	

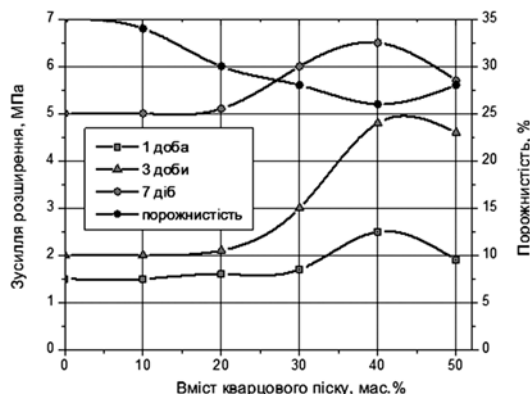


Рис. 2. Вплив кількості дрібного заповнювача на зусилля розширення та порожнистість вихідної сухої суміші

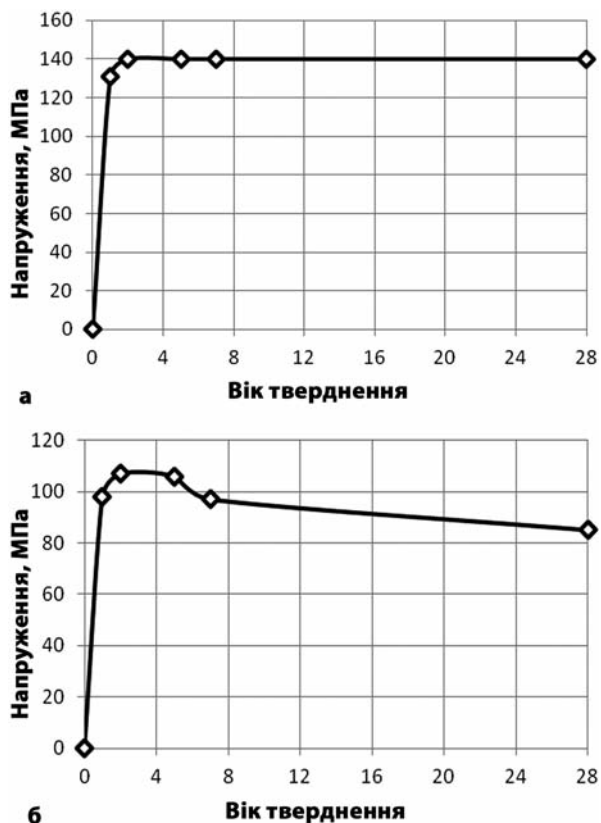


Рис. 3. Зміна кільцевих стискаючих напружень у трубі (а) та розтягувальних у бандажі (б)

негашеного вапна, термічно модифікованого добавкою 1,0 мас. % сахарози. Встановлено, що максимальне зусилля розширення (6,6 МПа) та найщільніше заповнення суміші досягається при вмісті кварцового піску 40,0 мас. % (рис.2).

У процесі експлуатації внаслідок дії різноманітних механічних та природних факторів утворюються різного типу дефекти (раковини, включення, подряпини, тощо), що знижують несучу здатність магістралей та можуть призводити до виникнення граничних станів і руйнування трубопроводів [7].

В сучасній практиці при виконанні ремонтних робіт найчастіше застосовують методи бандажування кільцями та муфтами. Використання напружувального бетону дозволяє виконувати ремонтні роботи без порушення експлуатації споруди, повністю відновлюючи несучу здатність послабленої дефектної зони трубопроводу. При цьому тиск, що виникає в міжтрубному просторі при твердненні бетонної суміші, викликає ефект розвантаження основного трубопроводу, передаючи навантаження на бетон та муфту.

Визначення напружень розширеного бетону проводили на лабораторному стенді. На основі отриманих даних розраховано модель напруженого стану трубопроводу з використанням програмного забезпечення Cosmos. Результатами моделювання напружень та переміщень дрібнозернистого бетону встановлено, що тиск транспортованого газу, який діє на трубопровід сприймається бетоном та зовнішнім бандажем. Це дозволяє розвантажити трубопровід та зменшити корозійні процеси, що виникають при дії розтягувальних напружень. Водночас значення переміщень між бетоном та металом трубопроводу і бандажу бетону є незначними через силу тертя.

Експериментальними випробуваннями встановлено (рис.3), що через 3 доби напруження в бетоні досягають максимального значення, а найбільшому значенню кільцевого стискаючого зусилля в трубопроводі відповідає тиск  $P_c = 4,8$  МПа на її зовнішню поверхню, при цьому величина кільцевого розтягувального напруження в бандажі становить  $P_p = 3,6$  МПа.

Отже, використання розширних в'язучих композицій зумовлює створення напружень стиску у трубі та розтягу – у бандажі, при цьому утворення кільцевих напружень забезпечує передачу частини навантажень з труби на бандаж.

#### Література:

- Якимечко Я.Б. Специальный расширяющийся портландцемент / Я.Б. Якимечко, Б.С. Билобран // Цемент и его применение. – 2001. – №4. – С. 32–35.
- Підсилення магістральних трубопроводів бандажми на розширеному бетоні / Б.С. Билобран, Я.Б. Якимечко, С.Ф. Савула [та ін.] // Науковий вісник Ів.Фр. НТУ нафти і газу. – 2005. – №3 (12). – С. 97–102.
- Нестерова Л.Л. Микроструктура цементного камня / Л.Л. Нестерова, И.Г. Лугинина, Л.Д. Шахова. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. – 103 с.
- Красильников К.Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, А.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская – М.: Стройиздат, 1980. – 255 с.
- Якимечко Я.Б. Гидратация разрушающих цементов на негашеной извести / Я.Б. Якимечко // Будівництво. – 2004. – №1-2. – С. 145–157.
- Глуховский В.Д. Вязущие и композиционные материалы контактного твердения / В.Д. Глуховский, Р.Ф. Рунова, С.Е. Максунув. – К.: Высшая школа, 1991. – 190 с.
- Билобран Б.С. Кінаш О.Б. Пружнопластичний стан труби з нерівномірною товщиною стінки при комбінованому навантаженні // Пробл. прочності. – 2002. – №2. – С. 110-120.