

*М. М. Гивлюд<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, В.-П. О. Пархоменко<sup>2</sup>,  
Р. В. Пархоменко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент, М. В. Котів<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
(<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка",  
<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

### **ХАРАКТЕР ЗМІНИ МІЦНІСНИХ ПОКАЗНИКІВ БЕТОНУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИЦІЙНОГО ЦЕМЕНТУ В УМОВАХ НАГРІВАННЯ**

Вивчено вплив цеолітвмісного композиційного цементу на процеси тверднення бетону та зміну його складу і структури при нагріванні. Встановлено, що присутність доменного гранульованого шлаку та цеоліту у композиційному цементі призводить до підвищення міцнісних показників бетону при нагріванні його понад від 780°C завдяки синтезу легкоплавких евтектик, які заповнюють утворені під час дегідратації клінкерних складових пори зв'язуючи між собою окремі фрагменти бетону. Методами фізико-хімічного аналізу доведено підвищення залишкової міцності бетону на 64-69%, порівняно з бетоном, виготовленим на основі портландцементу.

**Ключові слова:** композиційний цемент, цеоліт, тверднення бетону, структура та фазовий склад бетону, залишкова міцність.

*М. М. Гивлюд, В.-П. О. Пархоменко, Р. В. Пархоменко, М. В. Котів*

### **ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕТОНА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ЦЕМЕНТА В УСЛОВИЯХ НАГРЕВАНИЯ**

Изучено влияние цеолитсодержащего композиционного цемента на процессы твердения бетона и изменение его состава и структуры при нагревании. Установлено, что наличие доменного гранулированного шлака и цеолита у композиционном цементе приводит к повышению прочностных показателей бетона при нагревании его выше 780°C вследствие синтеза легкоплавких эвтектик, заполняющих образованные во время дегидратации клинкерных составляющих поры тем самым связывая отдельные фрагменты бетона. Методами физико-химического анализа доказано повышение остаточной прочности на 64-69%, по сравнению с бетоном, изготовленным на основе портландцемента.

**Ключевые слова:** композиционный цемент, цеолит, твердение цемента, структура и фазовый состав бетона, остаточная прочность.

*М. М. Gyvlyud, V.-P. O. Parkhomenko, R.V. Parkhomenko, M.V. Kotiv*

### **CHARACTER CHANGE OF CONCRETE STRENGTH PARAMETERS THAT ARE BASED ON COMPOSITE CEMENT UNDER HEATING**

The influence of zeolite-containing composite cement on the concrete hardening processes and its composition changes under heating has been studied. The presence of blast furnace granulated slag and zeolite composite in cement increases the strength characteristics under heating to temperatures above 780°C. This phenomenon occurs due to synthesis of fusible eutectics that fill the interstices, formed during clinker dehydration. As the result, the individual concrete pieces are being tied. Physical and chemical analysis of the composite cement based concrete has shown that its residual strength is 64-69% higher than the residual strength of portland cement based concrete.

**Key words:** composite cement, zeolite, hardening of concrete, structure and phase composition of concrete, residual strength.

**Постановка проблеми.** Відповідно до сучасних світових тенденцій все більшого значення набувають композиційні цементи, які можна розглядати як альтернативу портландцементу. Виробництво композиційних в'язучих дає можливість економити енергію, збільшувати масу отриманого цементу, вихід бетону на його основі та вирішити проблеми охорони довкілля.

Слід зазначити, що введення до складу композиційного цементу разом з доменним гранульованим шлаком традиційних пуцоланічних добавок (опока, трепея, цеоліт) призводить до зростання водопотреби в'язучого, сповільнення набору міцності та погіршення експлуатаційних властивостей.

Згідно з ДБН 2.7.11 – 2002, будівельні конструкції на основі бетону повинні мати визначену межу вогнестійкості.

Наявність у складі композиційного цементу гідралічних та пуцоланічних добавок і утворення при його твердінні нових водовмісних сполук має значний вплив на поведінку бетонних конструкцій в умовах пожежі, що пов'язане з фізико-хімічними процесами, які проходять в цементному камені при нагріванні. При цьому необхідно враховувати вплив на міцнісні характеристики бетону не тільки кількості водовмісних цементних кристалогідратів, а і градієнта температур.

У зв'язку з цим визначення впливу композиційного в'язучого бетонних будівельних конструкцій на їх вогнестійкість є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Цементна промисловість багатьох розвинутих країн останніми роками зацікавлена портландцементами з підвищеним вмістом мінеральних добавок, оскільки це дає змогу знизити частку найдорожчого компонента – клінкера, без погіршення будівельно-технічних властивостей в'язучого і отриманого на його основі бетону [1,2]. Наявність у композиційному цементі доменного гранульованого шлаку та цеолітуможесуттєвозмінювати структуру бетону у процесі нагрівання, що являється важливим фактором впливу на його міцнісні показники [3,4]. При цьому необхідно враховувати процеси дегідратації клінкерних складових цементного каменю, в результаті чого утворюється значна частка пор та розривів у структурі бетону, і як наслідок зниження міцності, що може призвести до руйнування бетонної конструкції [5]. Особливо це важливо у випадку визначення залишкової несучої здатності будівель після пожежі, або будівель, які підлягають реконструкції.

Окрім того, в бетоні при нагріванні через значну різницю термічних коефіцієнтів лінійного поширення (ТКЛП) окремих складових виникають значні термонапруження, які підсилюють процес падіння міцності бетону. Згідно з теорією Гріффітса-Орлована-Рєбіндера, руйнування твердого тіла починається в місцях виникнення дефектів. Локальна концентрація напружень біля цих дефектів внаслідок зовнішніх механічних впливів викликає утворення зародкових мікротріщин, які розростаються, перекиваючи одна одну і зумовлюючи поступове зниження міцності матеріалу [6].

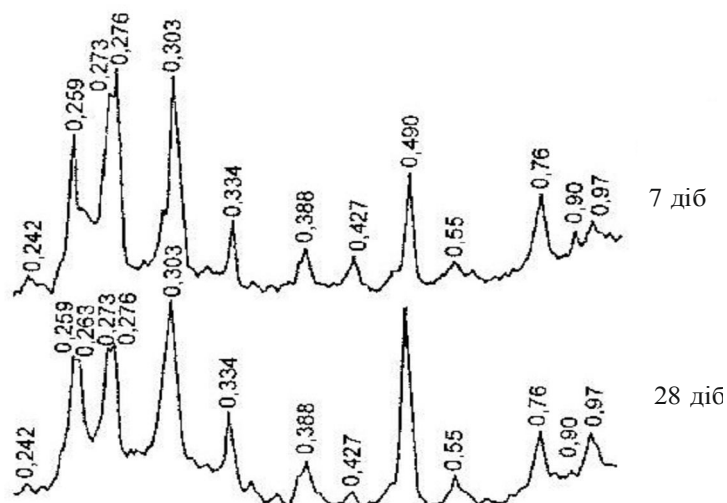
**Мета роботи** полягає у вивченні впливу композиційного в'язучого на міцнісні характеристики бетону в умовах високих температур пожежі.

**Методи досліджень та матеріали.** Механічні властивості бетону визначали на зразках розміром 100x100x100 мм, виготовлених на основі композиційного в'язучого з вмістом 10 мас.% цеоліту КЦ V/A (ДСТУ Б.В.2.7-46:2010), кварцового піску Ясинецького родовища з модулем пружності 1,25 (ДСТУ Б.В.2.7 – 32 - 95) та щебеню Томашгородського родовища фракції 5-20 мм (ДСТУ Б.В.2.7-74-98). Клас бетону за міцністю С 25/30.

Нагрівання зразків до температури 500°C, 800°C та 1000°C проводили у муфельній печі СНОЛ 1,6.2. Фізико-хімічні дослідження виконували методом рентгенофазового, комплексного термічного та електромікроскопічного аналізів.

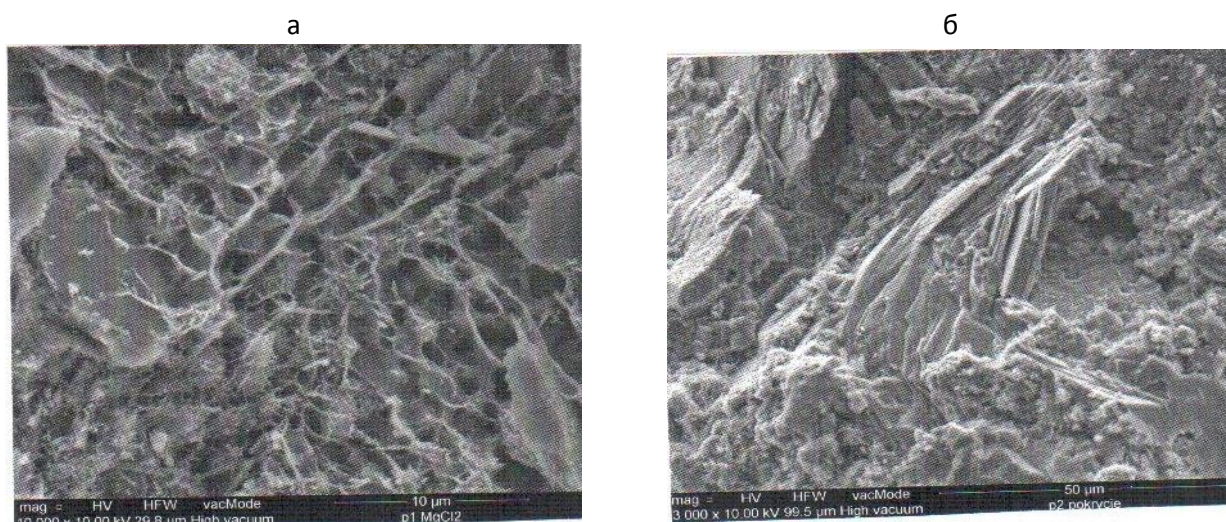
**Результати досліджень.** Процес тверднення бетону проходить внаслідок гідратації клінкерних складових цементу з утворенням водовмісних кристалогідратів, які вносять основний вплив на вогнестійкість бетонних конструкцій. Методом рентгенофазового аналізу (рис. 1) встановлено, що через 7 діб гідратації на дифрактограмах фіксуються лінії негідратованого цементу ( $d/n = 0,276; 0,259$  нм), кальцію гідроксиду ( $d/n = 0,490; 0,263$  нм), кальцію гідросульфатомінералу ( $d/n = 0,970; 0,550$  нм) та кальцію гідрокарбонатомінералу ( $d/n = 0,760; 0,388$  нм).

Через 28 діб тверднення відзначається підвищення інтенсивності рефлексів кальцію гідроксиду та кальцію гідросульфоалюмінату і зменшення дифракційних максимумів кальцію гідрокарбоалюмінату

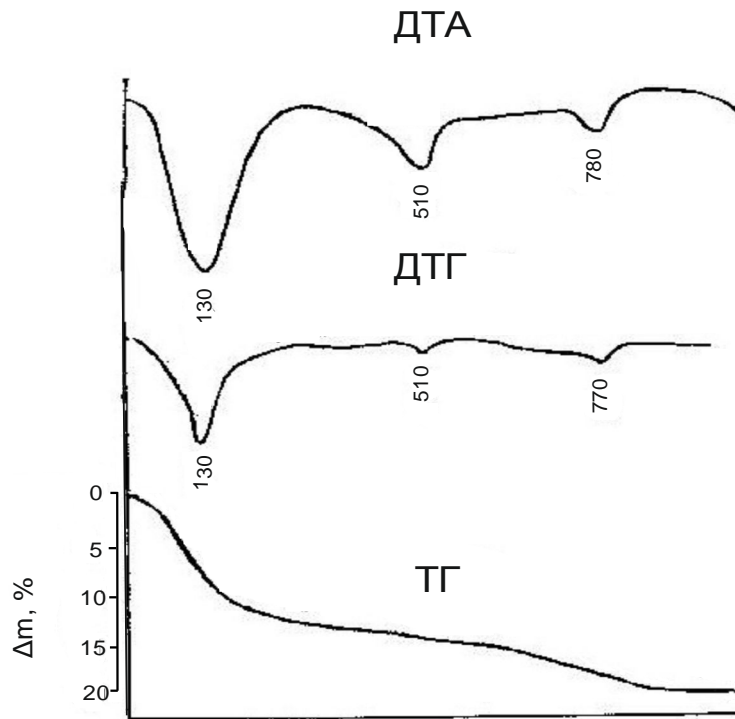


**Рисунок 1** – Дифрактограми каменю на основі цеолітвмісного композиційного цементу

Мікроструктура гідратованого композиційного цементу представлена широкою різноманітністю кристалічних форм, а саме від слабкокристалічних до добре закристалізованих частинок різних розмірів (рис. 2). У початковий період гідратації цементу з добавкою доменного шлаку та цеоліту проходить інтенсивний ріст гідратних утворень нечіткої форми з незначним вмістом гексагональних кристалів кальцію гідроксиду,  $AF_t$ – і  $AF_m$ –фаз та кальцію гідросилікату (рис. 2а). Через 7 діб тверднення у мікроструктурі каменю наявна значна доля дрібних повітряних пор, які з часом заростають гідратними утвореннями, що призводить до підвищення його міцності. Через 28 діб тверднення цемент характеризується покращенням однорідності мікроструктури каменю завдяки утворенню щільних субмікроскопічних скупчень кальцію гідросилікатів та гідросульфоалюмінатів (рис.2б). Тому основною причиною підвищення міцності цементного каменю на основі композиційного цементу є підвищення вмісту  $AF_t$  – фаз та утворення додатково низькоосновних гідросилікатів типу  $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$  (I). В основній масі мікроструктура цементного каменю подана гідратними сполуками у вигляді голчастих або лускоподібних кристалів, які рівномірно розподілені в гідросилікатні маси тверднучою системи.



**Рисунок 2** – Мікроструктура каменю на основі цеолітвмісного композиційного цементу, гідратовано (а) 7 діб та (б) 28 діб



**Рисунок 3** – Дериwатограма цеолітвмісного композиційного цементу, гідратованого 28 діб

Деструкцію цементного каменю на основі цеолітвмісного композиційного цементу вивчали за допомогою методу комплексного термічного аналізу (рис. 3). На кривих ДТА виявлено три ендоефекти при 130°C, 510°C та 780°C. Перший ендоефект виникає внаслідок виділення близько 11 мас.% води з гідросилікатів, а другий належить кальцію гідроксиду. При цьому маса виділеної води становить близько 3 мас.%. Розклад кальцію гідроксиду, який відіграє значну роль у формуванні структури цементного каменю може призводити до суттєвого зниження міцнісних показників бетону при нагріванні понад 500°C. Ендоефекти при температурі нагрівання 780°C призводить до руйнування кальцію гідрокарбонату. Загальна втрата маси зразка становить 19,2 мас.%.

Необхідно відзначити, що при нагріванні понад 780°C на кривій ДТА спостерігається плавний спад, який характеризує повільне утворення склоподібного розплаву із доменного гранульованого шлаку. Наявність такого розплаву заповнює утворені у процесі дегідратації клінкерних складових цементу пори і тим самим армує бетон, підвищуючи міцнісні показники.

Досліджено вплив цеолітвмісного композиційного цементу на механічні показники бетону при нагріванні до 500°C, 800°C та 1000°C.

**Таблиця 1**

Вид в'язучого	Температура нагрівання, °C			
	20	500	800	1000
Коефіцієнт зниження міцності бетону				
Портландцемент ПЦІ-500	1,00	0,63	0,22	0,17
Композиційний цемент КЦВ/А	1,00	0,68	0,37	0,28

Після тверднення протягом 28 діб міцність бетону на стиск становила 32,1 МПа, що відповідає його марці М30. Нагрівання бетону до 500°C призводить до зниження міцності на стиск бетону на основі портландцементу та композиційного цементу відповідно до 19,1 МПа

і 21,7 МПа, що відповідає коефіцієнту зниження міцності 0,63 і 0,68. Підвищення температури нагрівання бетону на ПЦІ-500 до 800°C призводить до інтенсивного падіння міцності на стиск до 7 МПа внаслідок інтенсивності деструкції кальцію гідроксиду та кальцію гідрокарбонату. Для бетону на основі цеолітвмісного композиційного цементу міцність на стиск становить 11,8 МПа, а коефіцієнт зниження міцності – 0,37, що на 0,15 вище порівняно із звичайним бетоном. Нагрівання бетону до 1000°C призводить до інтенсивного падіння міцності обидвох досліджуваних зразків внаслідок деструкції цементних складових. Необхідно відзначити, що коефіцієнт зниження міцності бетону на основі композиційного цементу на 64% менший, порівняно з бетоном на портландцементі, що очевидно пояснюється армуючим впливом склоподібного розплаву, який утворюється при нагріванні понад 780°C з доменного гранульованого шлаку.

**Висновок.** Методами фізико-хімічного аналізу встановлено, що на процес деструкції цементного каменю бетону на основі композиційного в'язучого впливає його фазовий склад та структура, яка утворилася у процесі тверднення. Експериментально доведено, що при нагріванні бетону до 500°C через інтенсивну деструкцію кальцію гідроксиду проходить зниження міцності бетону в межах 32-37%. Нагрівання до 800°C веде до подальшого зниження міцності бетону на звичайному портландцементі на 78%, а на композиційному тільки на 63%, що пояснюється флюсуючою дією доменного гранульованого шлаку. При нагріванні до 1000°C бетони на обидвох в'язучих мають досить низьку міцність на стиск, що підтверджує необхідність їх вогнезахисту.

#### Список літератури

1. Будівельне матеріалознавство / П. В. Кривенко, К. К. Пушкар'ова, В. Б. Барановський та ін. – к.: ТОВ УВПК “ЕксОб”, 2004. – 704с.
2. Саницький М. А. Модифіковані композиційні цементы/ М. А. Саницький, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків // Львів, НУ “Львівська політехніка”, 2001, – 130с.
3. Иванов А. С. Стеновые керамические материалы с использованием металлургического шлака / А. С. Иванов, Е. И. Евтушенко // Строительные материалы. – 2009, – № 7. – с. 64-65.
4. Locher Friedrich W. Chemia cementu. – Principles of production and use. Verlag Baut Technik GmbH. 2006. –536 s.
5. Поздеев А. В. Определение теплофизических характеристик модифицированного бетона расчетно-экспериментальным методом / А. В. Поздеев // Науковий вісник Укр НДІПБ. – 2011. – № 2 (24). – с. 104-112.
6. Крупа А. А. Химическая технология керамических материалов / А. А. Крупа, В. С. Городов // Высшая школа, 1990, – 339 с.

#### References:

1. Kryvenko, P. V., Pushkar'ova, K. K., Baranovs'kyu, V. B. and others / Budivel'ne materialoznavstvo – k.: TOVUVPK “EksOb”, 2004- 704s.
2. Sanyts'kyu, M. A. Modyfikovani kompozytsiyini tsementy / M. A. Sanyts'kyu, Kh. S. Sobol', T. Ye. Markiv // L'viv, Lviv Polytechnic National University, 2001, -130s.
3. Yvanov, A. S. Stenovue keramycheskye materyalu s yspol'zovanyem metallurhycheskoho shlaka / A. S. Yvanov, E. Y. Evtushenko // Stroytel'nye materyalu. – 2009, – no.7. – s. 64-65.
4. Locher Friedrich W. Chemia cementu. – Principles of production and use. Verlag Baut Technik GmbH. 2006. – 536s.
5. Pozdyeyev, A. Opredelenye teplofyzicheskykh kharakterystyk modyfytsyrovannoho betona raschetno-eksperymental'num metodom / A. V. Pozdyeyev // Scientific collected works Ukr NDIPB. – 2011. – no.2 (24). – s. 104-112.
6. Krupa, A. A. Khymycheskaya tekhnolohyya keramycheskykh materyalov / A. A. Krupa, V. S. Horodov // Vusshaia shkola, 1990, – 339s.