

## УДК 666.94.015.7

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Міське будівництво та господарство», Запорізька державна інженерна академія, пр. Леніна, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (098) 214 04 85, ел. пошта [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

## ФІЗИКО-ХІМІЧНА МОДИФІКАЦІЯ ЦЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОНОЛІТНОГО БЕТОНУ

**Мета.** Робота спрямована на розробку наукових основ технології модифікованого бетону нового покоління для споруд спеціального призначення за рахунок управління процесами структуроутворення модифікованої цементної системи у природних умовах тверднення. **Методика.** Для досягнення поставленої мети: 1) проведені дослідження реологічних характеристик модифікованих бетонних сумішей для споруд спеціального призначення та процесів структуроутворення модифікованої цементної системи бетону природного тверднення; 2) визначені методи надійної оцінки міцності бетону у момент зняття лаштунку й передачі навантаження на конструкції, в яких бетон не досяг проектної міцності. **Результати.** Автором встановлено, що у модифікованій цементній системі, що гідратується, у результаті взаємодії різних макроіонів розвивається структуроутворюючий процес із перевагою активних частин, які значно перевищують його дисипативну частину у порівнянні з нормальними умовами тверднення. **Наукова новизна.** Встановлені закономірності структуроутворення модифікованої цементної системи, армованої синтезованими добре закристалізованими спіралеподібними ниткоподібними кристалами, механічне зчеплення яких розглядається як основне джерело створення міцності у сукупності з додатковим зчепленням, що досягається в результаті взаємного проростання кристалів. **Практична значимість.** У процесі дослідження розглянуто підвищення в'язучого потенціалу цементу у високоміцних бетонах та використання модифікованих цементних систем в особливих умовах бетонування. Розроблений органо-мінеральний модифікуючий комплекс, що забезпечує дисперсне армування цементної матриці бетону. Він дозволяє, змінюючи природу поверхні в'язучої речовини і модифікатора, модифікувати процес структуроутворення цементної матриці. Температурний фактор не чинить негативного впливу на бетон, що твердне, а комплексний модифікатор забезпечує поліпшення фізико-механічних характеристик цементної матриці й бетону за рахунок первинної зміни стану системи. У модифікованій цементній системі, що гідратується, в результаті взаємодії різних макроіонів розвивається структуроутворюючий процес із перевагою активних частин, які значно перевищують його дисипативну частину в порівнянні з нормальними умовами тверднення. Результати, отримані при моделюванні поведінки модифікованої цементної системи, що гідратується, показують, що у системі спостерігаються коливання концентрації проміжних продуктів гідратації, які ототожнюються з виникненням просторово-часової структури.

*Ключові слова:* цементна система; модифікація; структуроутворення; бетон

### Вступ

Можливість підвищення експлуатаційних характеристик бетону для монолітного будівництва відкривається з переходом до принципово нової технології, заснованої на застосуванні фундаментальних принципів взаємодії компонентів в'язучої системи в бетоні [16–19, 20, 24]. Це забезпечується модифікуванням компонентів цементної системи, що сприяє підвищенню ступеня гідратації в'язучої речовини й спрямованому структуроутворенню цементної матриці бетону [6, 8, 10–13].

На основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень зроблено висновок про

доцільність об'єднання декількох типів активаційних впливів на цементну систему бетону. Прийнято положення, що одержання монолітних бетонів з високими експлуатаційними властивостями (ВЕВ) має засновуватися на фізико-хімічному модифікуванні цементної системи бетону. Такий спосіб об'єднує фізичну активацію цементної системи з інтенсивною хімічною взаємодією кристалогідратних новоутворень з речовинами, що вводяться у цементну систему як мінеральні дисперсноармуючі компоненти у складі спеціального органо-мінерального модифікуючого комплексу (ОММК).

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Мета**

Розробка наукових основ технології модифікованого бетону нового покоління для споруд спеціального призначення за рахунок управління процесами структуроутворення модифікованої цементної системи у природних умовах тверднення.

**Методика**

Для досягнення поставленої мети виконано дослідження реологічних характеристик модифікованих бетонних сумішей для споруд спеціального призначення; процесів структуроутворення модифікованої цементної системи бетону природного тверднення; визначено методи надійної оцінки міцності бетону у момент зняття опалубки й передачі навантаження на конструкції, в яких бетон не досяг проектної міцності.

**Результати**

Фізико-хімічне модифікування цементної системи бетону визначає можливість регулювання її властивостей, що дозволяє поряд з інтенсифікацією тверднення спрямовано оптимізувати структуру цементної матриці бетону. Цей процес забезпечує ріст міцності бетону при стиску й, особливо, при згині, що забезпечує підвищення довговічності бетону. Фізико-хімічна модифікація цементної системи дозволила виявити додаткові резерви поліпшення реологічних і міцнісних властивостей бетонної суміші і бетону за рахунок прикладення технологічних впливів певної інтенсивності, конгруентних фізико-хімічним умовам перебігу процесів гідратації цементної системи [22].

Вирішення поставленої проблеми є актуальним для розвитку технології зведення монолітних будівель в Україні.

Теорія гідратаційного структуроутворення все ще не стала «динамічною теорією» і значною мірою залишається «кінематичною схемою», що тільки пов'язує між собою параметри системи, але практично не визначає механізму її зміни й оптимальності структуроутворення [9, 17, 23]. У ході досліджень зроблено висновки про існування резерву керування цими процесами. Це особливо важливо за необхідності одержання бетонів ВЕВ [14, 15].

Процеси прискорення тверднення монолітного бетону дозволяють скоротити використання опалубки до доби, якщо після початкової активації вони тривають у режимі відводу тепла [1, 2, 5].

Модифікування цементної системи бетону для монолітного будівництва передбачає вплив на хімічні процеси, що відбуваються при гідратації клінкерних мінералів і структуроутворенні цементної матриці [3, 21]. Тому вибір модифікаторів здійснювався з урахуванням їх хімічної активності стосовно клінкерних мінералів, особливо алюмінатів кальцію [4, 7, 9].

Попередні дослідження показали доцільність введення до складу органо-мінерального модифікуючого комплексу (ОММК) цементної системи бетону спеціально синтезованих сполук  $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$  і  $Mg_3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$ , що є основними продуктами реакції в системі  $MgO - MgCl_2 - H_2O$  в нормальних умовах тверднення. Ці сполуки виконують роль дисперсного армуючого компонента цементної матриці бетону.

Гідрат хлороксиду магнію утворюється у формі добре закристалізованих голок, які описані як спіралеподібні трубчасті ниткоподібні кристали. Механічне зчеплення цих ниткоподібних кристалів розглядається як основне джерело створення міцності поряд з додатковим зчепленням, що досягається в результаті взаємного проростання кристалів, коли вони стикаються один з одним. Уповільнене тужавіння і швидке тверднення модифікованої цементної системи бетону дозволяє використовувати такі бетонні суміші для бетононасосного транспорту та транспортувати їх на великі відстані під час зведення монолітних будівель.

Дослідження утворення і перетворення фаз гідратів хлороксиду магнію виконувалися на зразках, виготовлених з різними відношеннями  $MgO/MgCl_2$  і постійним масовим відношенням  $H_2O/MgO=2$ . Результати досліджень наведено у табл. 1.

Дослідженнями встановлено, що утворення і перетворення фаз гідратів хлороксиду магнію є функцією відношення  $MgO/MgCl_2$ . При молярному відношенні  $MgO/MgCl_2 < 4$  утворюється  $Mg_3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$  з надлишком  $MgCl_2$ .

Таблиця 1

Утворення і перетворення фаз у системі  $MgO - MgCl_2 - H_2O$ 

Table 1

The formation and transformation of phases in the system  $MgO - MgCl_2 - H_2O$ 

Молярне відношення	Час, діб	Ідентифіковані фази				
		MgO	Mg(OH) <sub>2</sub>	Mg <sub>3</sub> (OH) <sub>5</sub> Cl·4H <sub>2</sub> O	Mg <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl·4H <sub>2</sub> O	MgCl <sub>2</sub> ·2MgCO <sub>3</sub> ·Mg(OH) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
MgO/MgCl <sub>2</sub> :	1/12 (2 год)	++	–	+++		
3	1	Сліди	–	+++	+	Сліди
	5	–	–	++	++	те саме
	8	–	–	+	+++	«
	15	–	–			
	1/8 (3 год)	+	–	+		
4	1	+	–	++		Сліди
	4			+++		
	66			+++		
5	1/6 (4 год)	+	+	++		
	1		Сліди	+++		
	7			+++		
6	127		+	+++	Сліди	++
7	1		+++			
	9		+++	++	Сліди	Сліди
	22		++		+	
	62		++		+	
8	1		+++			
	29	++	+++	+	++	+
	69		++	++	+	++
	75		++	Сліди	+	
	128		+++		Сліди	
Mg(OH) <sub>2</sub> / MgCl <sub>2</sub> =5	10		+++			

Примітка: + невелика кількість, ++ середня кількість, +++ велика кількість.

З часом  $Mg_3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$  перетворюється у  $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$ . Швидкість перетворення зростає при зниженні відношення  $MgO/MgCl_2$ . Сійка сполука  $Mg_3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$  утворюється при молярному відношенні  $4 < MgO/MgCl_2 < 6$ . Якщо замість  $MgO$  з розчином  $MgCl_2$  реагує  $Mg(OH)_2$  (при молярному відношенні  $Mg(OH)_2/MgCl_2=5$ ), то переважаючою фазою є  $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$ . Сполуки  $Mg(OH)_2$  і  $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$  утворюються при молярно-

му відношенні  $MgO/MgCl_2 > 6$ . При такому відношенні сполука  $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$  нестійка і перетворюється у  $Mg_3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$ . Швидкість реакції перетворення низька і зменшується при збільшенні відношення  $MgO/MgCl_2$ . З часом кількість  $MgCl_2 \cdot 2MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 6H_2O$  збільшується у всіх зразках в результаті реакції з атмосферним  $CO_2$ .

Мікроструктура новоутворень цементної системи з хлороксидом магнею (у межах стабі-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

льності  $Mg_3(OH)_5Cl \cdot 4H_2O$  як переважаючої фази) досліджувалася на зразках, виготовлених з теоретично розрахованою кількістю води, необхідної для проектного ступеня гідратації, і молярним відношенням  $MgO/MgCl_2=5,68$ . Спостереження за допомогою скануючого електронного мікроскопа виконані на поверхнях зламів, отриманих при розриві висушених зразків, покритих шаром сплаву, що складається з 60 % Au і 40 % Pd.

Результати досліджень дозволили висунути таку гіпотезу розвитку мікроструктури модифікованої цементної системи. Кристали гідрату хлороксиду магнію швидко ростуть в просторі між гідратними новоутвореннями клінкерних мінералів. У результаті цього виникає механічне зчеплення, яке зумовлює розвиток початкової міцності і жорсткості. Оскільки для вільного росту кристалів недостатньо простору, то кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка зумовлює зростання міцності. Утворення голчастих кристалів не розглядається як безумовна вимога для тверднення. Міцність залежить від утворення продуктів реакції, які заповнюють вільний простір, що призводить до формування щільної мікроструктури з мінімальною пористістю. Очевидно, сприяє цьому характерне зростання голчастих і ниткоподібних кристалів. Крива наростання границі міцності модифікованої цементної системи наведена на рис. 1 у зіставленні з аналогічною кривою цементного тіста.

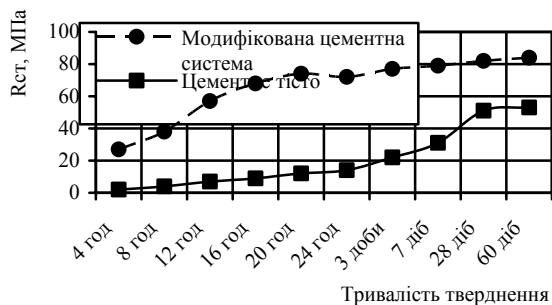


Рис. 1. Кінетика зміни міцності при стисненні цементної матриці бетону

Fig.1. The kinetics of the changes in the compressive strength of the cement matrix of concrete

У дослідженнях використаний портландцемент М 500. Різниця в наростанні міцності очевидна. Оскільки немає помітної зміни в мікроструктурі, зменшення міцності зразків модифі-

кованої цементної системи, яке тимчасово відбувалося у віці 1 доби, можна пояснити напруженням при розтяганні, викликаним усадкою, яка спостерігалася через 1 добу тверднення. Раннє зростання міцності зразків цементної системи з хлороксидом магнію у перші 24 год відповідає спостереженням, виконаним за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Поява перших голчастих кристалів виявлена через 2 год після приготування модифікованої цементної системи, перш ніж система почала набирати міцність (рис. 2). До 4 год ріст кристалів значно прискорився, що призвело до утворення мікроструктури, наведеної на рис. 3. Надалі мікроструктура не показала ніяких змін, за винятком поступового зменшення пористості.

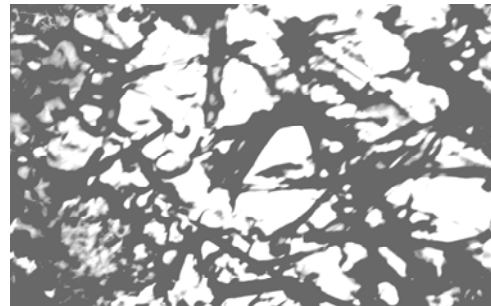


Рис. 2. Фотографія мікроструктури модифікованої цементної системи у віці 2 год (x3 000)

Fig. 2. A photograph of the microstructure of the modified cement system at the age of 2 h (X3 000)

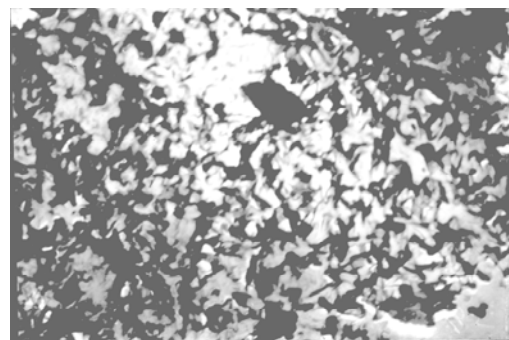


Рис. 3. Фотографія мікроструктури модифікованої цементної системи у віці 4 год (x2 000)

Fig. 3. A photograph of the microstructure of the modified cement system at the age of 4 h (X2 000)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

З викладеного можна зробити висновок: при молярному відношенні  $b > \text{MgO}/\text{MgCl}_2 > 4$  переважає стійка кристалічна фаза  $\text{Mg}_3(\text{OH})_5\text{Cl}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Ця фаза при твердненні монолітного бетону за позитивних температур під дією атмосферного  $\text{CO}_2$  повільно переходить у  $\text{MgCl}_2\cdot 2\text{MgCO}_3\cdot \text{Mg}(\text{OH})_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Це перетворення відбувається переважно на поверхні і незначно впливає на міцність модифікованої цементної матриці бетону. Якщо бетон піддається впливу дощу, то переважною фазою на його поверхні є сполука  $4\text{MgCO}_3\cdot \text{Mg}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , як це було виявлено в зразку-призмі розміром  $4\times 4\times 16$  см. Усередині цього зразка переважаючою фазою був гідрат  $\text{Mg}_3(\text{OH})_5\text{Cl}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , але, крім того, були присутні  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  і  $\text{MgCl}_2\cdot 2\text{MgCO}_3\cdot \text{Mg}(\text{OH})_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Механічні властивості цементної системи з мінеральним модифікатором при різних відношеннях  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2$  і при постійному молярному відношенні  $\text{H}_2\text{O}/\text{MgO}=3,5$  (або  $1,56$  – масове відношення) наведені на рис. 4.

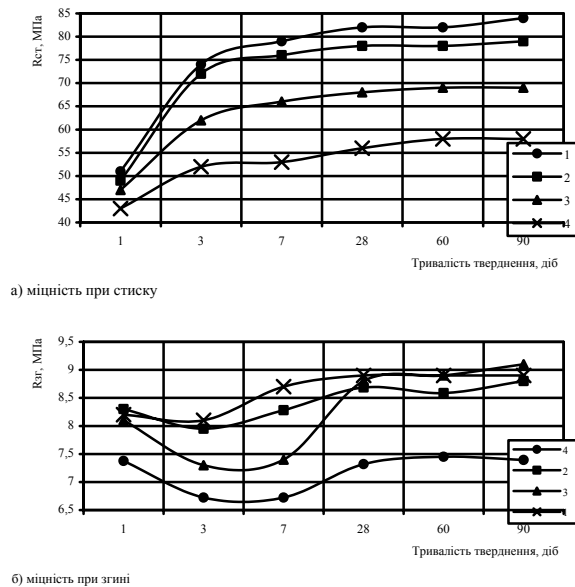


Рис. 4. Кінетика зміни міцності модифікованої мінеральним компонентом цементної системи з різним молярним відношенням  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2$ :  
1 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=5,4$ ; 2 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=5,9$ ;  
3 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=6,38$ ; 4 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=6,85$

Fig. 4. The kinetics of the changes in strength of the modified mineral component in cement systems with different molar ratio of  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2$ :  
1 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=5,4$ ; 2 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=5,9$ ;  
3 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=6,38$ ; 4 –  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=6,85$

Кращі результати отримані на зразках з молярним відношенням  $\text{MgO}/\text{MgCl}_2=5,4$  і  $5,9$ .

### Наукова новизна та практична значимість

Встановлені закономірності структуроутворення модифікованої цементної системи, армованої синтезованими добре закристалізованими спіралеподібними ниткоподібними кристалами, механічне зчеплення яких розглядається як основне джерело створення міцності у сукупності з додатковим зчепленням, що досягається в результаті взаємного проростання кристалів.

Запропонована технологія забезпечує підвищення в'язучого потенціалу цементу у високоміцних бетонах та використання модифікованих цементних систем в особливих умовах бетонування. Розроблений органо-мінеральний модифікуючий комплекс, що забезпечує дисперсне армування цементної матриці бетону, який дозволяє, змінюючи природу поверхні в'язучої речовини і модифікатора, модифікувати процес структуроутворення цементної матриці. Температурний фактор не чинить негативного впливу на бетон, що твердне, а комплексний модифікатор забезпечує поліпшення фізико-механічних характеристик цементної матриці й бетону за рахунок первинної зміни стану системи.

### Висновки

1. Розроблений органо-мінеральний модифікуючий комплекс, що забезпечує дисперсне армування цементної матриці бетону. Введення у цементну систему хімічно активних компонентів поліфункціональної дії дозволяє, змінюючи природу поверхні в'язучої речовини і модифікатора (гідрофільність, заряд, будову подвійного електричного шару, концентрацію поверхневих активних ансамблів), у широких межах модифікувати процес структуроутворення цементної матриці. При цьому температурний фактор не чинить негативного впливу на бетон, що твердне, а комплексний модифікатор забезпечує поліпшення фізико-механічних характеристик цементної матриці й бетону за рахунок первинної зміни стану системи.

2. Встановлено, що у модифікованій цементній системі, що гідратується, в результаті взаємодії різних макроіонів розвивається структуроутворюючий процес із перевагою актив-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

них частин, які значно перевищують його дисипативну частину порівняно з нормальними умовами тверднення. Результати, отримані при моделюванні поведінки модифікованої цементної системи, що гідратується, показують, що у системі спостерігаються коливання концентрації проміжних продуктів гідратації, які отожнюються з виникненням просторово-часової структури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анпилов, С. М. Опалубочные системы для монолитного строительства / С. М. Анпилов. – Москва : АСВ, 2005. – 280 с.
2. Анпилов, С. М. Технология возведения зданий и сооружений из монолитного железобетона / С. М. Анпилов. – Москва : АСВ, 2010. – 592 с.
3. Дейнега, Ю. Ф. Дисперсные системы в электрических полях / Ю. Ф. Дейнега // Укр. хим. журн. – 2001. – Т. 67, № 3. – С. 13–18.
4. Изотов, В. С. Химические добавки для модификации бетона / В. С. Изотов, Ю. А. Соколова. – Москва : Палеотип, 2006. – 244 с.
5. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона / Р. Лермит. – Москва : ЛКИ, 2007. – 296 с.
6. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – Москва : АСВ, 2004. – 560 с.
7. Руденко, Н. Н. Тяжелые бетоны с высокими эксплуатационными свойствами / Н. Н. Руденко. – Днепропетровск : Арт-Пресс, 1999. – 260 с.
8. Файнер, М. Ш. Высокопрочный бетон / М. Ш. Файнер. – Черновцы : Рута, 2007. – 217 с.
9. Хердтл, Р. Долговечность бетонов на основе многокомпонентных цементов / Р. Хердтл, М. Дитерманн, К. Шмидт // Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 76–80.
10. Aitcin, P. C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete / P. C. Aitcin // Proc. of Nelu Spiratos Symposium. Committee for the Organization of CANMET / ACI Conferences. – Cody, USA : ACI-NA, 2003. – P. 69–88.
11. Bolshakov, V. I. Contact strength of mechanoactivated fane concretes from granulated blast-furnace slags / V. I. Bolshakov, M. O. Yeliseieva, S. A. Shcherbak // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2014. – № 5 (53). – P. 138–149. doi: 10.15802/stp2014/29975.
12. Collepardi, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC / M. Collepardi // Proc. of the Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering. – Milan, 2003. – P. 1–8.
13. Collepardi, M. The New Concrete / M. Collepardi. – Milan : Published by Grafishe Tintoretto, 2006. – 421 p.
14. Hanehara, S. Rheology and early age properties of cement systems / S. Hanehara, K. Yamada // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – Iss. 2. – P. 175–195. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.006.
15. Gjorv, O. E. High Strength Concrete / O. E. Gjorv // Advanced in Concrete Technology. – Canada. – 2007. – P. 21–79.
16. Ivanova, H. P. Analisis and application prospects of effective resources-saving technologies in concrete manufacture / H. P. Ivanova, O. I. Trufanova // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2014. – № 5 (53). – P. 150–156. doi: 10.15802/stp2014/30453.
17. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – Ottawa : Canadian Science Publishing, 2002. – 101 p.
18. Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete / S. Collepardi, L. Coppola, R. Troli, M. Collepardi // The Proc. of the Fifth Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : ACI Publication SP-173. – Roma, Italy, 1997. – P. 1–21.
19. Middendorf, B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials / B. Middendorf, N. B. Singh // Cement International. – 2006. – № 4. – P. 80–86.
20. Neville, A. M. Wlasciwosci betonu / A. M. Neville. – Crakow : Polski Cement, 2000. – 874 p.
21. Plank, J. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption / J. Plank, C. Hirsh // Cement and Concrete Research. – 2007. – Vol. 37. – Iss. 4. – P. 537–542. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.01.007.
22. Rudenko, D. Properties of the phase components of the modified cement system / D. Rudenko // ТЕКА Ком. Mot. I Energ. Roln. – 2013. – Vol. 13, № 4. – P. 218–224.
23. Rudenko, N. The Development of Conception of New Generation Concretes / N. Rudenko // ТЕКА Ком. Mot. I Energ. Roln. – 2010. – Vol. XB. – P. 128–133.
24. Rudenko, N. Technology of shotcreting based on activated binder / N. Rudenko // ТЕКА Ком. Mot. i Energ. Roln. – 2014. – Vol. 14, № 1. – P. 222–228.

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Городское строительство и хозяйство», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Ленина, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (098) 214 04 85, эл. почта [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА

**Цель.** Работа направлена на разработку научных основ технологии модифицированного бетона нового поколения для сооружений специального назначения за счет управления процессами структурообразования модифицированной цементной системы в естественных условиях твердения. **Методика.** Для достижения поставленной цели: 1) проведены исследования реологических характеристик модифицированных бетонных смесей для сооружений специального назначения и процессов структурообразования модифицированной цементной системы бетона естественного твердения; 2) определены методы надежной оценки прочности бетона в момент снятия опалубки и передачи нагрузки на конструкции, в которых бетон не достиг проектной прочности. **Результаты.** Автором установлено, что в гидратирующейся модифицированной цементной системе в результате взаимодействия различных макроионов развивается структурообразующий процесс с преимуществом активных частей, которые значительно превышают его диссипативную часть по сравнению с нормальными условиями твердения. **Научная новизна.** Установлены закономерности структурообразования модифицированной цементной системы, армированной синтезированными хорошо закристаллизованными спиралевидными нитевидными кристаллами, механическое сцепление которых рассматривается как основной источник создания прочности в совокупности с дополнительным сцеплением, достигаемым в результате взаимного прорастания кристаллов. **Практическая значимость.** В процессе исследования рассмотрено повышение вяжущего потенциала цемента в высокопрочных бетонах и использование модифицированных цементных систем в особых условиях бетонирования. Разработан органо-минеральный модифицирующий комплекс, обеспечивающий дисперсное армирование цементной матрицы бетона, который позволяет, изменяя природу поверхности вяжущего вещества и модификатора, модифицировать процесс структурообразования цементной матрицы. Температурный фактор не оказывает негативного действия на твердеющий бетон, а комплексный модификатор обеспечивает улучшение физико-механических характеристик цементной матрицы и бетона за счет первичного изменения состояния системы. В модифицированной гидратирующейся цементной системе в результате взаимодействия различных макроионов развивается структурообразующий процесс с преимуществом активных частей, которые значительно превышают его диссипативную часть по сравнению с нормальными условиями твердения. Результаты, полученные при моделировании поведения гидратирующейся модифицированной цементной системы, показывают, что в системе наблюдаются колебания концентрации промежуточных продуктов гидратации, которые отождествляются с возникновением пространственно-временной структуры.

*Ключевые слова:* цементная система; модификация; структурообразование; бетон

D. V. RUDENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Urban Construction and Management», Zaporizhzhia State Engineering Academy, Lenin Av., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (098) 214 04 85, e-mail [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

## PHYSICO-CHEMICAL MODIFICATION OF MONOLITHIC CONCRETE CEMENT SYSTEM

**Purpose.** The paper is aimed to the development of scientific bases of the technology of modified concrete of new generation for special facilities by managing the processes of structure formation of modified cement system in conditions of hardening. **Methodology.** For the achievement the goal: 1) the research of rheological characteristics of modified concrete mixes for special facilities purpose and processes of structure formation of modified cement system of natural curing concrete was conducted; 2) there were defined methods of reliable evaluation of concrete strength at the removal time of formwork and transmission of loads to the constructions where the concrete has not reached the designed strength. **Findings.** The author found that the structure formation process develops in the hydrating modified cement system as a result of interaction of various macroions. In this process its active parts pre-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

vail, which considerably exceed its dissipative part compared to normal conditions of hardening. **Originality.** There were established the regularities of structure formation of modified cement system, reinforced with synthesized, well crystallized helical filamentary crystals, mechanical grip of which is considered as a principal source of strength in combination with an additional coupling achieved due to cross-germination of crystals. **Practical value.** In the study the increased binding capacity of cement in high strength concretes and the use of modified cement systems in the special conditions of concreting were considered. The organo-mineral modifying complex that provides the dispersed reinforcement of concrete cement matrix which allows modifying the process of cement matrix structure formation by changing the nature of the surface of binder and modifier was developed. The temperature factor has no negative influence on the hardening concrete and complex modifier provides the improved physico-mechanical characteristics of cement matrix and concrete by means of the primary changes in the system state. In the modified hydrating cement system as a result of interaction of various macroions the structure-forming process with advantage of active parts, which significantly exceed its dissipative part of the normal conditions of hardening are developing. The results of modeling the behavior of modified hydrating cement system show that fluctuations in the concentration of intermediate hydration products are observed in the system. They are identified with the emergence of spatiotemporal structure.

*Keywords:* cement system; modification; structure formation; concrete

## REFERENCES

1. Anpilov S.M. *Opalubochnyye sistemy dlya monolitnogo stroitelstva* [Formwork systems for monolithic construction]. Moscow, ASV Publ., 2005. 280 p.
2. Anpilov S.M. *Tekhnologiya vozvedeniya zdaniy i sooruzheniy iz monolitnogo zhelezobetona* [The technology of building and structures of reinforced concrete]. Moscow, ASV Publ., 2010. 592 p.
3. Deynega Yu.F. Dispersnyye sistemy v elektricheskikh polyakh [Disperse systems in electric fields]. *Ukrainskiy khimicheskii zhurnal – Ukrainian Chemical Journal*, 2001, vol. 67, no. 3, pp. 13-18.
4. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. *Khimicheskiiye dobavki dlya modifikatsii betona* [Chemical additives for concrete modification]. Moscow, Paleotip Publ., 2006. 244 p.
5. Lermontov R. *Problemy tekhnologii betona* [The problems of concrete technology]. Moscow, LKI Publ., 2007. 296 p.
6. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersnoarmirovannykh betonov. Voprosy teorii i proyektirovaniya, tekhnologiya, konstruktivnyye resheniya* [Composites based on dispersion-reinforced concrete. Theory and design, technology, construction]. Moscow, ASV Publ., 2004. 560 p.
7. Rudenko N.N. *Tyazhelyye betony s vysokimi ekspluatatsionnymi svoystvami* [Heavy concretes with high performance properties]. Dnepropetrovsk, Art-Press Publ., 1999. 260 p.
8. Fayner M.Sh. *Vysokoprochnyy beton* [High-strength concrete]. Chernovtsy, Ruta Publ., 2007. 217 p.
9. Kherdtl R., Ditermann M., Schmidt K. Dolgovechnost betonov na osnove mnogokomponentnykh tsementov [Durability of concretes on the basis of multi-component cements]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Application*, 2011, no. 1, pp. 76-80.
10. Aitcin P.C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete. Proc of Nelu Spiratos Symposium. Committee for the Organization of CANMET / ACI Conferences. Cody, USA, ACI-NA Publ., 2003, pp. 69-88.
11. Bolshakov V.I., Yeliseieva M.O., Sccherbak S.A. Contact strength of mechanoactivated fine concretes from granulated blast-furnace slags. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 5 (53), pp. 138-149. doi: 10.15802/stp2014/29975.
12. Collepardi M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC. Proc. of the Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering. Milan, 2003, pp. 1-8.
13. Collepardi M. *The New Concrete*. Milan, Published by Grafishe Tintoretto Publ., 2006. 421 p.
14. Hanehara S., Yamada K. Rheology and early age properties of cement systems. *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38, issue 2, pp. 175-195. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.006.
15. Gjorv O.E. High Strength Concrete. *Advanced in Concrete Technology*. Canada, 2007, pp. 21-79.
16. Ivanova H.P., Trufanova O.I. Analisis and application prospects of effective resources-saving technologies in concrete manufacture. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 5 (53), pp. 150-156. doi: 10.15802/stp2014/30453.



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

17. Malhotra V.M., Mehta P.K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. Ottawa, Canadian Science Publishing Publ., 2002. 101 p.
18. Collepardi S., Coppola L., Troli R., Collepardi M. Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete. The Proc. of the Fifth Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: ACI Publication SP-173. Roma, Italy, 1997, pp. 1-21.
19. Middendorf B., Singh N.B. Nanoscience and nano-technology in cementitious materials. *Cement International*, 2006, no. 4, pp. 80-86.
20. Neville A.M. Wlasciwosci betonu. Crakow, Polski Cement Publ., 2000. 874 p.
21. Plank J., Hirsh C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on super- plasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research*, 2007, vol. 37, issue 4, pp. 537-542. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.01.007.
22. Rudenko D. Properties of the phase components of the modified cement system. *TEKA Kom. Mot. I Energ. Roln.*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 218-224.
23. Rudenko N. The Development of Conception of New Generation Concretes. *TEKA Kom. Mot. I Energ. Roln.*, 2010, vol. XB, pp. 128-133.
24. Rudenko N. Technology of shotcreting based on activated binder. *TEKA Kom. Mot. i Energ. Roln.*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 222-228.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. А. Банахом (Україна); д.т.н., проф. М. І. Нетесою (Україна)*

Надійшла до редколегії 02.09.2015

Прийнята до друку 30.10.2015