

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.32-024

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління проектами, будівлі та будівельні матеріали», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (098) 214 04 85, ел. пошта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

### ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНОГО БЕТОНУ ДЛЯ СПОРУД СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**Мета.** У роботі потрібно розробити наукові основи технології монолітного бетону нового покоління для споруд спеціального призначення за рахунок керування процесами структуроутворення модифікованої цементної системи в природних умовах тверднення. **Методика.** Кінетику взаємодії цементної системи й заповнювачів оцінювали за методами мікрокалориметрії. Вимірювання проводили безперервно протягом 24 годин після приготування суміші. Реєстрували диференційну та інтегральну характеристики тепловиділення твердіючої системи. Дослідження реологічних властивостей бетонних сумішей здійснювали на сумішах рухливостю 10...15 см. Мікротвердість контактних шарів досліджували на бетонних кубиках розмірами від 20×20×20 до 50×50×50 мм. Під час визначення структурних характеристик застосовували рентгенофазовий і диференційно-термічний аналізи цементної матриці бетону. Інфрачервона спектроскопія проведена з метою визначення впливу фізико-хімічного модифікування на цементну систему. Повзучість при розтягу досліджувалася в широкому діапазоні навантаження від 0,2 до 0,8 R<sub>p</sub>. **Результати.** Встановлено, що причиною зміни властивостей бетону природного тверднення є зміна його гігromетричного й термічного стану, а також гармонічні коливання цих факторів навколишнього середовища. Гігromетрія бетону залежить від термовологісних умов середовища, виду й складу бетону, масивності бетонних елементів. Аналіз цих факторів та експериментальні дані дозволили встановити експонентну залежність зміни гігromетричного стану монолітного бетону природного тверднення. Зміна вологісного стану бетону дозволяє прогнозувати його об'ємні деформації. **Наукова новизна.** Уперше встановлені особливості структуроутворення модифікованої цементної системи. Вони полягають у тому, що кристали гідрату хлориду магнію швидко ростуть у просторі між гідратними новоутвореннями клінкерних мінералів. Механічне зчеплення, що виникає в результаті цього, обумовлює розвиток початкової міцності й жорсткості. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка обумовлює зростання міцності. Розроблений органо-мінеральний модифікуючий комплекс забезпечує дисперсне армування цементної матриці бетону. **Практична значимість.** Отримані залежності структурних напружень дозволяють аналізувати їх вплив на структуру модифікованого бетону, а саме: встановити ймовірність утворення навколо частинок заповнювача зони пластичної течії, зони мікротріщиноутворення матеріалу, період початку тріщиноутворення, умови виникнення мікротріщин, зміну модуля пружності матеріалу від виникнення в його структурі мікротріщин. Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними експлуатаційними властивостями. Запропонована технологія дисперсного модифікування в'язучої речовини, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічним процесам гідратації клінкерних мінералів дозволили розробити наукові основи технології бетонів спеціального призначення. Це сприяє розширенню напрямків використання модифікованих бетонів у різних видах будівельного виробництва.

**Ключові слова:** модифікований бетон; дисперсне модифікування; структуроутворення; цементна система; структурні характеристики; довговічність

## Вступ

Розвиток капітального будівництва за ринкової економіки тісно пов'язаний із завданнями подальшого підвищення ефективності будівельного виробництва, зниження вартості й трудомісткості технологічних процесів, економічного використання матеріальних та енергетичних ресурсів, застосування нових прогресивних матеріалів [7, 8, 10, 12, 18].

Отримання бетону спеціального призначення з високими експлуатаційними властивостями можливе шляхом застосування різних добавок органічного й мінерального походження. Однак попри позитивний вплив органічні добавки мають ряд суттєвих недоліків, головним із яких є порушення початкових процесів гідратації цементної системи в бетоні. Молекули органічного пластифікатора адсорбуються на частинках цементу й гальмують гідратацію цементної матриці з усіма наслідками, що звідси випливають.

Одними з перспективних конструкційних матеріалів є дисперсно армовані бетони. Такі бетони являють собою один із різновидів великого класу композиційних матеріалів, які в наш час широко застосовують у різних галузях промисловості. Дисперсне армування здійснюється фібрами різного походження, рівномірно поширеними в об'ємі цементної матриці, і є одним із способів модифікації цементної системи бетону [2, 3, 17].

Унікальність сучасних будівель і споруд визначає комплекс високих експлуатаційних вимог до даного матеріалу. Перш за все сюди належать висока міцність, стійкість важкого бетону в різних умовах експлуатації і найбільш можлива довговічність обраного матеріалу [1, 6, 11].

Сучасний рівень розвитку будівництва вимагає подальшого розвитку концепції бетонів нового покоління, які необхідні для сприйняття зростаючих впливів природного й техногенного характеру, а також для особливих умов експлуатації.

Розвитку способів активації в'язучих систем сприяли дослідження Г. Р. Вагнер, В. М. Глуценка, Дж. Гоуда, І. Г. Гранковського, Л. І. Дворкіна, П. Кларка, М. М. Круглицького, В. А. Матвієнка, М. І. Нетеси, О. О. Па-

ценка, О. М. Пшінька, Д. М. Рой, Н. М. Руденко, М. А. Саницького, В. І. Соломатова, М. Б. Ур'єва, М. Ш. Файнера, Ю. Г. Хаютіна, О. О. Шишкіна, Ю. Штаєрмана, Б. Є. Юдовича та ін.

Отримання бетонів граничної міцності є однією з основних проблем сучасної технології їх виготовлення. З огляду на значний накопичений досвід у цьому напрямку слід зазначити, що вирішення цієї проблеми можливе за цілеспрямованого управління процесами гідратації й структуроутворення цементної матриці бетону [9, 13–16].

Найбільш уразливою частиною бетонного конгломерату є його цементувальна матриця. Вивчення зарубіжної практики будівництва унікальних об'єктів показало, що зусилля дослідників і будівельників направлені на підвищення фізико-технічних характеристик саме цементної матриці. Забезпечує це використання швидкотверднучих цементів високої марки або домолу цементу, а також різні добавки, які створюють гранично можливе зниження водоцементного відношення. Зокрема, широкого практичного застосування набули супер- і гіперпластифікатори. Поліпшення інших властивостей бетону також досягають за допомогою різних комплексних добавок. Особлива увага під час отримання бетонів з високими експлуатаційними властивостями спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості цементної матриці. Як правило, цього досягають поєднанням викладених технологічних заходів із застосуванням у складі бетону високодисперсних мікронаповнювачів із аморфізованою поверхнею.

## Мета

У науковій роботі потрібно розробити наукові основи технології монолітного бетону нового покоління для споруд спеціального призначення за рахунок керування процесами структуроутворення модифікованої цементної системи у природних умовах тверднення.

## Методика

Кінетику взаємодії цементної системи й заповнювачів оцінено за методами мікрокалориметрії. Вимірювання проведені безперервно

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

протягом 24 год після приготування суміші. Реєстрували диференційну й інтегральну характеристики тепловиділення твердіючої системи. Дослідження реологічних властивостей бетонних сумішей здійснено на сумішах рухливості 10...15 см. Мікротвердість контактних шарів досліджено на бетонних кубиках розмірами від 20×20×20 до 50×50×50 мм. Під час визначення структурних характеристик застосовано рентгенофазовий і диференційно-термічний аналізи цементної матриці бетону. Інфрачервона спектроскопія проведена з метою визначення впливу фізико-хімічного модифікування на цементну систему. Повзучість при розтягу досліджено в широкому діапазоні навантаження від 0,2 до 0,8  $R_p$ .

### Результати

Мікроструктура модифікованої цементної матриці бетону має вигляд добре закристалізованих спіралеподібних трубчастих ниткоподібних кристалів. Механічне зчеплення цих кристалів розглядають як основне джерело утворення міцності нарівні з додатковим зчепленням, яке виникає 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 й транспортувати їх на великі відстані під час зведення будівель і споруд.

Процес формування структури коагуляції модифікованого бетону в природних умовах здійснюється завдяки виборчій адсорбції іонів і асоціатів із рідкої фази, зміні площі контактів у просторовій пластичній структурі, спрямованому росту кристалів. У коагуляційно-кристалізаційній структурі модифікованої цементної матриці успадковуються особливості взаємного розташування агрегатних структур, тип пористості й дисперсності. Разом із тим мінеральна частина модифікатора є хімічно активним компонентом – додатковим джерелом гідратних фаз, що сприяє зміцненню в'язучої системи. За фізико-хімічного модифікування цементної системи бетону виникають особливі умови для утворення просторової структури,

яка відрізняється за будовою від звичайного бетону.

Із моменту приготування модифікованої бетонної суміші дефектність поверхневого моношару цементної частинки збільшується, тим самим впливаючи на амплітуду коливань вузлових атомів кристалічних ґраток. Сукупність термічних, хімічних і механічних впливів призводить до порушення далекого порядку кристалічних ґраток поверхневого шару цементної частинки, у результаті чого атоми осцілюють близько положень рівноваги інтенсивніше.

Важливо, що комплексне модифікування бетонної суміші сприяє виникненню особливих умов для утворення контактної зони цементної матриці й зерен заповнювачів. Унаслідок модифікування утворюється псевдотверде тіло, деформація якого проявляється у вигляді пружної післядії. При цьому створюються умови для граничної упаковки зерен різної гранулометрії й оптимізації товщини контактних шарів за мінімально можливою пористістю матеріалу. Модифікування цементної системи призводить до вирівнювання водоцементного відношення у всіх шарах бетонної суміші. Причиною цього є високий рівень і сталість величини гідростатичного тиску води. До того ж утворення контактного шару цементна матриця – наповнювач відбувається в особливих умовах.

Досліджена мікротвердість контактних шарів бетону. Величина мікротвердості характеризувалася величиною відбитка алмазного конуса. Наведені у табл. 1 параметри мікротвердості цементної матриці свідчать про те, що міцність міжзернової зони істотно поступається міцності контактної зони для звичайного бетону. Діаметри відбитків у міжзернової зоні на 15...17 % більше, ніж аналогічні величини в контактній зоні з заповнювачем. Для цементної матриці модифікованого бетону ці параметри близькі за значеннями. Встановлено, що в модифікованому бетоні міцність контактної і міжзернової зони цементної матриці відрізняється на 3...7 %, що пояснює підвищення міцності бетону при розтягу.

Параметри мікротвердості цементної матриці бетону			
Вид бетону	В/Ц	Усереднений діаметр відбитка алмазного конуса, $10^{-7}$ м	
		контактна зона	міжзернова зона
Модифікований	0.29	2.6	2.8
	0.31	3.0	3.1
	0.33	3.3	3.4
Звичайний	0.42	4.6	5.2
	0.44	5.1	5.7
	0.46	5.4	6.2

За низьких значень В/Ц, близьких до [В/Ц], контактні зони цементної матриці практично накладаються одна на одну, що визначає високу міцність такого бетону при розтягу. Отже, можна зробити висновок, що в модифікованому бетоні утворюється цементна матриця, практично ізоропна від поверхні заповнювача до центрів міжзернових шарів. Така матриця характеризується високою адгезією до поверхні заповнювача, приблизно рівною її когезійним властивостям. Встановлене положення підтверджує аналіз структури бетону.

Кінетику взаємодії в'язучої речовини й заповнювачів у твердіючій дисперсній системі оцінено за методами мікрокалориметрії. Виміри проведені безперервно протягом 24 год після приготування суміші. Реєстрували диференційну й інтегральну характеристики тепловиділення твердіючої суміші. У процесі вимірювань у мікрокалориметрі підтримували температуру 20 °С. Тепловиділення цементних систем з В/Ц = 0,30...0,42 істотно відрізняється. Особливо відрізняється диференційне тепловиділення цементних систем, схильних до модифікації. У них високоінтенсивне тепловиділення спостерігається у період до однієї доби тверднення, тоді як у зразках традиційного приготування зміна швидкості тепловиділення в основному закінчується до 7-добового віку.

Після чотирьох годин тверднення модифікованого бетону відбувається інтенсифікація процесу тепловиділення, що свідчить про переорганізацію, а також стабілізацію структури цементної матриці.

Зіставлення даних мікротвердості цементної матриці з даними мікрокалориметричних досліджень показує, що між заповнювачем і це-

ментною матрицею відбувається фізична взаємодія, яка призводить до утворення контактної зони. Вона складається з шарів на межі цементної матриці й заповнювача на поверхні розділу між ними. Величина зчеплення цементної матриці з поверхнею заповнювача на кілька порядків вища, ніж аналогічні показники звичайного бетону. Саме цим пояснюється істотне підвищення міцності бетону при розтягу порівняно зі звичайним бетоном.

За майже незмінного співвідношення об'ємів гідратних фаз і порового простору вони зазнають закономірних якісних змін у часі. У твердій фазі по мірі експоненціального накопичення цементувальної речовини також експоненціально зменшується об'єм реліктових мінералів. Хоча цементуюча речовина на різних етапах її формування представлена сукупністю високоосновних форм гідратних новоутворень, їх будова залежить від технологічних умов структуроутворення.

Зміну кількісних характеристик структури модифікованого бетону спостерігаємо в разі зміни параметрів модифікування. Спостережувані зміни морфологічної структури цементної матриці не можуть бути випадковими, тому що вони підтверджені повторними дослідженнями за відтворюваності від 82 до 96 %. У той же час така зміна морфології новоутворень не відзначена у звичайному бетоні. З одержаних даних очевидне значне збільшення пластинчасто-призматичної складової у цементній матриці модифікованого бетону. Зі збільшенням часу витримання кількість сформованих кристалічних новоутворень збільшується.

Це можна пояснити системним підходом: морфологія структури цементної матриці є ре-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

зультатом взаємодії систем складання й зростання. При цьому система зростання (перекристалізації й розвитку структури в часі) може ефективно розвиватися без досить повного розвитку системи складання (накопичення первинних продуктів гідратації). Розвинена система складання частинок цементу у сприятливих умовах гідравлічного напору навколишньої води завдяки тиксотропії буде послабшувати морфологію структурних новоутворень. Однак це явище не спостерігаємо у звичайних бетонах, де відсутнє модифікування структури. Як показують експериментальні дані, отримані комплексними методами дослідження структури, розвиток в об'ємах подібних морфологічних структур може сягати 20 %. При цьому ступінь гідратації зростає на 11...14 %.

Проведені дослідження фізико-механічних властивостей бетонної суміші й бетону на модифікованій цементній системі. Дослідження реологічних властивостей бетонних сумішей здійснені на сумішах рухливістю 10...15 см. Фізико-хімічне модифікування цементної системи забезпечує отримання рухливих бетонних сумішей зі зниженням витрати цементу на 1 м<sup>3</sup> бетону на 32...37 %. Легкоукладальність таких бетонних сумішей має стабільний харак-

тер у діапазоні використаних складів. Це дозволяє стверджувати, що модифікування цементної системи сприяє отриманню нерозшаруваних бетонних сумішей. На відміну від них звичайні бетонні суміші характеризувалися явними ознаками розшарування. При цьому розшаруванню за осадки конуса (ОК) 15 см піддавався також склад із мінімальною витратою цементу.

Встановлено, що використання модифікованих цементних систем сприяє підвищенню водоутримувальної здатності бетонних сумішей. З урахуванням транспортування без ефекту вібрації водоутримувальна здатність модифікованої цементної системи становить  $V/Ц = 1,3 [В/Ц]$ .

Технологічні властивості бетонної суміші значною мірою визначаються її життєздатністю в певний проміжок часу. На життєздатність сумішей значний вплив чинять умови навколишнього середовища. У лабораторних умовах зміну рухливості суміші в часі визначали вимірюванням осадки конуса. Інтенсивність зміни ОК залежала від умов бетонування й виду проведених дослідів. Результати дослідів подані в табл. 2.

Таблиця 2

**Вплив часу витримки бетонної суміші на її рухливість  
(початкова осадка конуса 15 см)**

Вид суміші	Умови витримування	Рухливість бетонної суміші, см, через						
		15 хв	30 хв	45 хв	60 хв	75 хв	90 хв	105 хв
Звичайна	Лабораторія	12	10	7	6	4	3	3
	Кліматична камера	12	8	5	4	3	2	2
На модифікованій в'язучій речовині	Лабораторія	15	15	14	13	13	12	12
	Кліматична камера	15	13	13	12	11	10	10

Встановлено, що модифікування цементної системи сприяє підвищенню міцності бетону при розтягу і згині. Цим пояснюється зменшення значень співвідношень  $R/R_p$  і  $R/R_{зг}$  модифікованого бетону, що тверднув у природних умовах (табл. 3).

Експериментально встановлено, що модифікованому бетону в специфічних умовах експлуатації гарантована досить висока атмо-

сферостійкість. Вказане також підтверджують стабільні значення міцності матеріалу в процесі досліджень. Для звичайного бетону спостерігається спад міцності як при стиску, так і при згині. Еталонні зразки почали руйнуватися після 127 циклів водонасичення й висушування, тоді як зразки модифікованого бетону перебували в задовільному стані практично до 200 циклів, після яких випробування були припинені.

## Співвідношення міцності бетону при розтягу і стиску

Границя міцності бетону, МПа			Відношення $R/R_p$	Відношення $R/R_{зг}$
при стиску ( $R$ )	при розтягу ( $R_p$ )	при згині ( $R_{зг}$ )		
Звичайний бетон				
45,6	2,75	3,28	16,5	13,9
47,5	2,94	3,69	16,1	12,9
52,9	3,17	4,07	16,7	13,0
54,7	3,23	4,28	16,9	12,8
Модифікований бетон				
76,4	5,78	12,07	13,21	6,33
80,3	6,87	12,87	11,76	6,24
91,9	8,04	14,24	11,43	6,45

З урахуванням експлуатації елементів бетонних і залізобетонних споруд в умовах змінного рівня води вони піддаються поперемінному заморожуванню й відтаванню в умовах капілярного підсмоктування. Тому бетон, призначений для зведення й відновлення спеціальних споруд, повинен мати високу морозостійкість. Теоретичною передумовою підвищення морозостійкості бетону є модифікація його порової структури.

Оцінку параметрів умовно-замкнутої пористості бетону проводили за допомогою мікроскопічних досліджень на аншлафах бетонних перерізів за лінійним методом. Обрану методику визначення питомої поверхні за аншлафами бетону найбільш широко застосовують, вона носить назву методу лінійної січної.

Проведено рентгенофазовий і диференційно-термічний аналізи цементної матриці бетону. Як впливає з дифрактограм, склад новоутворень у цементному камені звичайного бетону дещо відрізняється від того ж складу модифікованого бетону. У звичайному бетоні ототожені трисульфатна форма гідросульфоалюмінату кальцію ( $d = 9,73; 5,61; 3,85 \cdot 10^{-10}$  м),  $C_3AH_6$  ( $d = 4,45; 2,30; 1,572 \cdot 10^{-10}$  м),  $Ca(OH)_2$  ( $d = 4,91; 2,61; 1,79 \cdot 10^{-10}$  м), гідросилікати кальцію підвищеної основності ( $d = 3,03; 2,83; 2,026; 1,632 \cdot 10^{-10}$  м). У складі новоутворень модифікованого бетону відзначено утворення чотирикальцієвого гідроалюмінату ( $d = 7,8;$

$3,85; 2,43; 1,67 \cdot 10^{-10}$  м), а також перекристалізація в моносульфатну форму гідросульфоалюмінату кальцію ( $d = 8,92; 4,96; 3,99; 2,25 \cdot 10^{-10}$  м), що, очевидно, сприяє підвищенню морозостійкості модифікованого бетону.

Дані диференційно-термічного аналізу підтверджують результати, одержані під час рентгенографічних досліджень. Ендоефект із максимумом  $132^\circ C$  на термограмі цементного каменю звичайного бетону, підданого випробуванням на морозостійкість, відповідає дегідратації трисульфатної форми гідросульфоалюмінату кальцію і гідросилікатів кальцію. Температури  $440\text{--}445^\circ C$  відповідають розкладанню  $Ca(OH)_2$ , при цьому для модифікованої цементної матриці ефект менш помітний. За температури  $586, 698, 716^\circ C$  дегідратуються низькоосновні гідросилікати кальцію типу CSH (B) і  $C_2SH_2$ . Ендоефектам за температур  $690$  і  $710^\circ C$  для звичайного цементного каменю також відповідає розкладання  $CaCO_3$ , хоча карбонат кальцію виділяється в незначній кількості.

Метою фізико-хімічного модифікування цементної системи є створення умов для високоефективної реакції клінкерних мінералів із водою з достатньою швидкістю. При цьому повинні утворитися тверді продукти з дуже низькою розчинністю і мікроструктурою, яка забезпечує необхідну механічну міцність, стабільність об'єму та інші необхідні властивості.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Утворення адсорбційних шарів на поверхні зерен цементу є найважливішою стадією процесу модифікації. Відіграючи таку ж роль, як і захисні колоїди, ці шари регулюють ріст кристалів на певних стадіях процесу гідратації клінкерних мінералів. Дія модифікаторів у бетонній суміші зводиться до збільшення числа зародків і до їх зростання в цементній системі. Це відбувається внаслідок того, що модифікатори, будучи поверхнево-активними речовинами і впливаючи на грані кристалів, що утворюються з розчину, сприяють збільшенню поверхневої активності, а також впливають на їх форму. Оскільки за інших рівних умов швидкість росту кристалів часто пропорційна поверхневому натягу, то навіть дуже малі добавки речовин, які здатні змінити величину поверхневого натягу, істотно позначаються на ступені змочування зерен, характері кристалізації та властивостях новоутворень.

Виконано моделювання міжіонних взаємодій у модифікованій цементній системі, а також виведені диференційні рівняння для потенціалу, які відповідають будь-якому розподілу фізичних меж і зарядів у цементній системі. Доведено, що слід розділити рідку фазу на кілька областей, в кожній з яких може бути застосоване рівняння Лапласа або рівняння Пуассона. Тоді розв'язання цих рівнянь залежить від умов, яким підкоряються відповідні параметри на межах областей, де застосовують ці рівняння.

У разі витримування зразків модифікованого бетону в сульфатному середовищі протягом 360 діб зниження міцності становить 3...6 % (зниження міцності звичайного бетону – 12...23 %), коефіцієнт сульфатостійкості  $K_c$  перебуває в межах 0,91...0,93.

Стабілізація міцності модифікованого бетону в часі свідчить про переважання конструктивних процесів над деструктивними.

Отримана математична модель процесів корозійної стійкості. На основі експериментальних даних виведено рівняння, що зв'язує сульфатостійкість бетону з параметрами агресивного середовища (вміст сульфат-іонів) і характеристиками бетону (вміст  $C_3A$ , цементу,  $CaCO_3$  в дрібному заповнювачі, ступінь модифікації цементної системи) [5]. Перевірка на адекватність показала хорошу збіжність результатів моделі.

Відхилення  $K_c$  розрахункового від експериментального у всьому діапазоні випробувань не перевищує  $\delta_{kc} = \pm 0,1$ .

Досліджено деформаційні властивості й напружений стан модифікованого бетону спеціального призначення. Встановлено, що причини об'ємних змін бетону – усадка й температурні деформації. Причому в природних умовах твердіння бетону важливо врахувати обидва типи. Більш того, величина температурних деформацій бетону в природних умовах може бути близькою до величини усадки.

Усадкові деформації досліджені для умов лінійного сушіння, для чого бетон закладали у скляні трубки, відкриті з одного боку. Деформації у віці 14 діб змінюються залежно довжини зразка до п'яти разів. Незважаючи на деяке згладжування цієї різниці в часі, вона залишається істотною навіть у 60-добовому віці.

Рівняння, отримані за результатами досліджень, дозволяють вирішити питання про мінімальний рівень структурних напружень у монолітному бетоні за певного насичення його крупним заповнювачем, а також оцінити вплив структурних напружень на властивості бетону [4]. У звичайних бетонах із відносно тонкою цементною оболонкою за температурно-усадкових деформацій виникають високі тангенціальні й невеликі радіальні напруження. У природних умовах ці напруження вищі за рахунок підвищення значень  $\Delta\varepsilon(t)$ , чого не спостерігається в модифікованих бетонах. У модифікованих бетонах найбільшу небезпеку для структури становлять лише тангенціальні напруження.

Зміна усадкових напружень у часі має однозначний характер. Сумарні температурно-усадкові деформації мають пилкоподібний графік. Для модифікованого бетону амплітуда коливань на 48...53 % менша.

Повзучість при розтягу досліджували в широкому діапазоні навантажень від 0,2 до 0,8  $R_p$  з міцністю модифікованого бетону при розтягу 3,68 МПа і звичайного бетону 2,04 МПа. Із ростом напружень  $\sigma/R_{pr}$  значно збільшується величина деформацій повзучості звичайного бетону. Однак характер деформацій повзучості модифікованого бетону при розтягу відрізняється від загальновідомого. Основна відмінність усіх кривих – істотна перевага ве-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

личини деформації повзучості зразків звичайного бетону. До 90-добового віку за всіх величин  $\sigma/R_{пр}$  деформації повзучості практично стабілізуються. Отже, у цьому віці зручно порівнювати деформації повзучості зразків із різною величиною  $\sigma/R_{пр}$ .

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше встановлені особливості структуроутворення модифікованої цементної системи, які полягають у тому, що кристали гідрату хлорокису магнію швидко ростуть у просторі між гідратними новоутвореннями клінкерних мінералів, а механічне зчеплення, що виникає в результаті цього, обумовлює розвиток початкової міцності й жорсткості. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка обумовлює зростання міцності. Розроблений органо-мінеральний модифікуючий комплекс забезпечує дисперсне армування цементної матриці бетону.

Отримані залежності структурних напружень дозволяють аналізувати їх вплив на структуру модифікованого бетону, а саме: встановити ймовірність утворення навколо частинок заповнювача зони пластичної течії, зони мікротріщиноутворення матеріалу, період початку тріщиноутворення, умови виникнення мікротріщин, зміну модуля пружності матеріалу від виникнення в його структурі мікротріщин. Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними

експлуатаційними властивостями. Запропонована технологія дисперсного модифікування в'язучої речовини, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічним процесам гідrataції клінкерних мінералів дозволили розробити наукові основи технології бетонів спеціального призначення. Це сприяє розширенню напрямків використання модифікованих бетонів у різних видах будівельного виробництва.

### Висновки

Встановлено, що причиною зміни властивостей бетону природного тверднення є зміна його гігromетричного й термічного стану, а також гармонічні коливання цих факторів у навколишньому середовищі. Гігromетрія бетону залежить від термовологісних умов середовища, виду й складу бетону, розмірів бетонних елементів. Аналіз цих факторів та експериментальні дані дозволили встановити експонентну залежність зміни гігromетричного стану монолітного бетону природного тверднення.

За гігromетричними даними бетону отримана залежність для визначення його температурно-усадкових деформацій. Це підтверджує фізичні принципи зміни гігromетрії й усадки бетону в часі. Отримані залежності враховують також склад бетону (відносний вміст заповнювача), а також дозволяють визначити об'ємні деформації бетонних елементів різного складу й масивності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков, В. И. Контактная прочность механоактивированных мелкозернистых бетонов из доменных гранулированных шлаков / В. И. Большаков, М. А. Елисеєва, С. А. Щербак // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 138–149. doi: 10.15802/stp2014/29975
2. Пшінько, О. М. Вибір матеріалів для ремонту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій транспортних споруд з урахуванням критерію сумісності : монографія / О. М. Пшінько, А. В. Краснюк, О. В. Громова. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 195 с.
3. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография / Ф. Н. Рабинович. – Москва : АСВ, 2004. – 560 с.
4. Руденко, Д. В. Бетон на основі дисперсно модифікованої цементної системи / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 169–175. doi: 10.15802/stp2016/78008
5. Руденко, Д. В. Дослідження напруженого стану модифікованого монолітного бетону / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 166–174. doi: 10.15802/stp2016/90515



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

6. Руденко, Д. В. Фізико-хімічна модифікація цементної системи монолітного бетону / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 174–182. doi: 10.15802/stp2015/57103
7. Шишкін, О. О. Наномодифікований реакційно-порошковий бетон / О. О. Шишкін // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2015. – Вип. 31. – С. 106–111.
8. Шумаков, И. В. Оптимизационные тенденции в прогнозировании продолжительности строительства / И. В. Шумаков, Р. И. Микаутадзе, И. И. Ляхов // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. – Харків, 2018. – Т. 91, № 1. – С. 115–121. doi: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-115-121
9. Шумаков, І. В. Перспективність техногенних територій для міського цивільного будівництва / І. В. Шумаков, О. А. Гринчук, Ю. В. Фурсов // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. – Харків, 2016. – № 3 (85). – С. 73–77.
10. Aitcin, P. C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete / P. C. Aitcin // Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers : proc. of a symposium honouring Dr. N. Spiratos (Bucharest, Romania, June 2003). – Bucharest, 2003. – P. 69–88.
11. Collepardi, M. The New Concrete / M. Collepardi, N. B. Singh. – Milan : Grafishe Tintoretto, 2006. – 421 p.
12. Holland, T. C. High-Performance Concrete: As High as It Gets / T. C. Holland // The Concrete Producer. – 1998. – Vol. 16, No. 7. – P. 501–505.
13. Lee, M. G. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material / Ming-Gin Lee, Yung-Chih Wang, Chui-Te Chiu // Construction and Building Materials. – 2007. – Vol. 21. – Iss. 1. – P. 182–189. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.024
14. Lee, C. Y. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems / C. Y. Lee, H. K. Lee, K. M. Lee // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33. – Iss. 3. – P. 425–431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00973-0
15. Middendorf, B. Nanoscience and Nanotechnology in Cementations Materials / B. Middendorf // Cement International. – 2006. – No. 4. – P. 80–86.
16. Rudenko, D. Properties of the phase components of the modified cement system / D. Rudenko // Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, No. 4. – P. 218–224.
17. Rudenko, N. The Development of Conception of New Generation Concretes / N. Rudenko // Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2010. – Vol. XV. – P. 128–133.
18. Sanytsky, M. Chemical processes causing dissolution of calcium cement minerals / M. Sanytsky // Будівельні матеріали і вироби. – 2016. – № 4. – С. 34–37.
19. Sanytsky, M. Department of building production: educational activity and scientific research / M. Sanytsky // Internationalizing higher education and research in civil engineering and architecture : Proceedings of the Exploratory Visit Grant of «Internationalising Higher Education» program supported by British Council Ukraine. – Rivne, 2016. – P. 70–73.
20. Shishkin, A. Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete / A. Shishkin, N. Netesa, V. Scherba // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 5. – Iss. 6 (89). – 2017. – P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109977

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление проектами, здания и строительные материалы», Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49000, тел. +38 (098) 214 04 85, эл. почта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Цель.** В работе нужно разработать научные основы технологии монолитного бетона нового поколения для сооружений специального назначения за счет управления процессами структурообразования модифицированной цементной системы в естественных условиях твердения. **Методика.** Кинетика взаимодействия цементной системы и заполнителей оценивалась методами микрокалориметрии. Измерения проводились непрерывно в течение 24 часов после приготовления смеси. Регистрировались дифференциальная и интегральная характеристики тепловыделения твердеющей системы. Исследование реологических свойств бе-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тонных смесей осуществлялось на смесях подвижностью 10...15 см. Микротвердость контактных слоев исследовалась на бетонных кубиках размерами от 20×20×20 до 50×50×50 мм. При определении структурных характеристик применялись рентгенофазовый и дифференциально-термический анализы цементной матрицы бетона. Инфракрасная спектроскопия применялась с целью определения влияния физико-химического модифицирования на цементную систему. Ползучесть при растяжении исследовалась в широком диапазоне нагрузки от 0,2 до 0,8 R<sub>p</sub>. **Результаты.** Установлено, что причиной изменения свойств бетона естественного твердения является изменение его гигрометрического и термического состояния, а также гармонические колебания этих факторов окружающей среды. Гигрометрия бетона зависит от термовлажностных условий среды, вида и состава бетона, массивности бетонных элементов. Анализ этих факторов и экспериментальные данные позволили установить экспоненциальную зависимость изменения гигрометрического состояния монолитного бетона естественного твердения. Изменение влажностного состояния бетона позволяет прогнозировать его объемные деформации. **Научная новизна.** Впервые установлены особенности структурообразования модифицированной цементной системы. Они заключаются в том, что кристаллы гидрата хлороксида магния быстро растут в пространстве между гидратными новообразованиями клинкерных минералов. Механическое сцепление, возникающее в результате этого, обуславливает развитие начальной прочности и жесткости. Так как свободному росту кристаллов препятствует недостаток пространства, кристаллы взаимно прорастают, образуя плотную структуру, способствуя росту прочности. Разработанный органо-минеральный модифицирующий комплекс обеспечивает дисперсное армирование цементной матрицы бетона. **Практическое значение.** Полученные зависимости структурных напряжений позволяют анализировать их влияние на структуру модифицированного бетона, а именно: установить вероятность образования вокруг частиц заполнителя зоны пластического течения, зоны микротрещинообразования материала, период начала трещинообразования, условия возникновения микротрещин, изменение модуля упругости материала от возникновения в его структуре микротрещин. Дисперсное модифицирование цементной матрицы позволяет получить долговечные бетоны специального назначения с проектными эксплуатационными свойствами. Предложенная технология дисперсного модифицирования вяжущего вещества, установленные особенности механизма структурообразования модифицированной цементной системы, а также использование принципа конгруэнтности комплекса технологических воздействий физико-химическим процессам гидратации клинкерных минералов позволили разработать научные основы технологии бетонов специального назначения. Это способствует расширению направлений использования модифицированных бетонов в различных видах строительного производства.

*Ключевые слова:* модифицированный бетон; дисперсное модифицирование; структурообразование; цементная система; структурные характеристики; долговечность

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

<sup>1\*</sup>Dep. «Project Management, Building and Building Materials», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. + 38 (098 214 04 85), e-mail veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

## PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE FOR SPECIAL PURPOSE STRUCTURES

**Purpose.** The paper is aimed at developing the scientific fundamentals of new-generation monolithic concrete technology for special purpose structures by controlling the processes of structure formation of a modified cement system under natural hardening conditions. **Methodology.** The kinetics of interaction between the cement system and aggregates was evaluated by microcalorimetry. The measurements were carried out continuously for 24 hours after preparation of the mixture. The differential and integral characteristics of the heat release of the solidifying system were recorded. Investigation of the rheological properties of concrete mixtures was carried out on the mixtures with 10...15 cm consistency. The microhardness of contact layers was investigated on concrete cubes with dimensions from 20×20×20 to 50×50×50 mm. When determining the structural characteristics, x-ray phase and differential-thermal analyzes of the concrete cement matrix were used. Infrared spectroscopy was used to determine the effect of physicochemical modification on the cement system. Tensile creep was studied over a wide load range from 0.2R<sub>t</sub> to 0.8R<sub>t</sub>. **Findings.** It is determined that the reason for changing the concrete properties of natural hardening is the change in its hygrometric and thermal state, as well as the harmonic fluctuations of these environmental

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

factors. The hygrometry of concrete depends on the thermal moisture conditions of the environment, the type and composition of concrete, the massiveness of concrete elements. An analysis of these factors and experimental data made it possible to establish the exponential dependence of the change in the hygrometric state of monolithic natural hardening concrete. The change in the moisture state of concrete makes it possible to predict its volumetric deformations. **Originality.** For the first time, the features of the structure formation of a modified cement system are established, consisting in the fact that magnesium chloride hydrate crystals grow rapidly in the space between hydrated clinker minerals, and the resulting mechanical cohesion defines the development of initial strength and rigidity. Since the free growth of crystals is hampered by a lack of space, the crystals mutually intergrow, forming a dense structure, contributing to the growth of strength. The developed organo-mineral modifying complex provides disperse reinforcement of the cement matrix of concrete. **Practical value.** The obtained dependences of structural concrete stresses make it possible to analyze their effect on the structure of modified concrete: to determine the probability of formation around the filler particles of the plastic flow zone, the material microcrack formation zone, the crack initiation period, the microcrack onset conditions, and the change of elasticity modulus of the material caused by microcracks in its structure. Dispersive modification of cement matrix allows to obtain durable concrete of special purpose with design operational properties. The developed binder disperse modification technology, the established features of the structure formation mechanism for the modified cement system, as well as the use of the principle of congruence of a complex of technological influences to the physico-chemical processes of hydration of clinker minerals allowed developing the scientific fundamentals for the special purpose concrete technology. This helps to expand the use of modified concrete in various types of construction.

**Keywords:** modified concrete; disperse modification; structure formation; cement system; structural characteristics; durability

## REFERENCES

1. Bolshakov, V. I., Yeliseieva, M. O., & Shcherbak, S. A. (2014). Contact strength of mechanoactivated fine concretes from granulated blast-furnace slags. *Science and Transport Progress*, 5(53), 138-149. doi: 10.15802/stp2014/29975 (in Russian)
2. Pshinko, O. M., Krasniuk, A. V., Hromova, O. V. (2015). *Vybir materialiv dlia remontu ta vidnovlennia betonnykh ta zalizobetonnykh konstruksii transportnykh sporud z urakhuvanniam kryteriiu sumisnosti: Monohrafiia*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
3. Rabinovich, F. N. (2004). *Kompozity na osnove dispersnoarmirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii: monografiya*. Moscow: ASV. (in Russian)
4. Rudenko, D. V. (2016). Concrete based on modified disperse cement system. *Science and Transport Progress*, 4(64), 169-175. doi: 10.15802/stp2016/78008 (in Ukrainian)
5. Rudenko, D. V. (2016). Research of the stress state of a modified in-situ concrete. *Science and Transport Progress*, 6(66), 166-174. doi: 10.15802/stp2016/90515 (in Ukrainian)
6. Rudenko, D. V. (2015). Physico-chemical modification of monolithic concrete cement system. *Science and Transport Progress*, 6(60), 174-182. doi: 10.15802/stp2015/57103 (in Ukrainian)
7. Shyshkin, O. O. (2015). Nanomodyfikovanyi reaktsiino-poroshkovyi beton. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, 31, 106-111. (in Ukrainian)
8. Shumakov, I. V., Mikautadze, R. I., & Lyakhov, I. I. (2018). Optimization Trends in Forecasting the Duration of Construction. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, 91(1), 115-121. doi: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-115-121 (in Russian)
9. Shumakov, I. V. (2016). Perspektivnistj tekhnoghennykh terytorij dlja misjkojho cyviljnoho budivnyctva. *Naukovyj visnyk budivnyctva*, 3(85), 73-77. (in Ukrainian)
10. Aitcin, P. C. (2003). The Art and Science of Durable High-Performance Concrete. *Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers: Proceedings of a Symposium Honouring Dr. N. Spiratos* (Bucharest, Romania, June 2003) (pp. 69-88). Bucharest. (in English)
11. Collepardi, M. & Singh, N. B. (2006). *The New Concrete*. Milan: Grafishe Tintoretto. (in English)
12. Holland, T. C. (1998). High-Performance Concrete: As High as It Gets. *The Concrete Producer*, 16(7), 501-505. (in English)
13. Lee, M.-G., Wang, Y.-C., & Chiu, C.-T. (2007). A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and Building Materials*, 21(1), 182-189. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.024 (in English)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

14. Lee, C. Y., Lee, H. K., & Lee, K. M. (2003). Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 425-431. doi: 10.1016/s0008-8846(02)00973-0 (in English)
15. Middendorf, B. (2006). Nanoscience and Nanotechnology in Cementations Materials. *Cement International*, 4, 80-86. (in English)
16. Rudenko, D. (2013). Properties of the phase components of the modified cement system. *Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 13(4). 218-224. (in English)
17. Rudenko, N. (2010). The Development of Conception of New Generation Concretes. *Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. XB*, 128-133. (in English)
18. Sanytsky, M. (2016). Chemical processes causing dissolution of calcium cement minerals. *Будівельні матеріали і виробы*, 4, 34-37. (in English)
19. Sanytsky, M. (2016). Department of building production: educational activity and scientific research. *Internationalizing higher education and research in civil engineering and architecture. Proceedings of the Exploratory Visit Grant of «Internationalizing Higher Education» program supported by British Council Ukraine.* (pp. 70-73). Rivne. (in English)
20. Shishkin, A., Netesa, M., & Scherba, V. (2017). Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6(89), 11-16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109977 (in English)

Надійшла до редколегії: 21.06.2018

Прийнята до друку: 08.10.2018