

## ВПЛИВ КОМПЛЕКСНИХ МОДИФІКАТОРІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО БЕТОНУ

© Кіракевич І.І., Позняк О.Р., Яніцький О.Б., 2010

**Виконано дослідження реологічних властивостей дрібнозернистих самоущільнювальних бетонних сумішей з добавками модифікаторів і мікронаповнювачів та експлуатаційних характеристик бетонів на їх основі в різних умовах тверднення.**

**Ключові слова:** дрібнозернистий самоущільнювальний бетон, модифікатор, мікронаповнювач, рухливість, міцність, порова структура, деформації зсідання.

**Research of reological properties of Self-compacting fine-grained concrete mixtures with admixtures of modifiers and microfillers and exploitative characteristics of concretes on their basis under various conditions of hardening is carried out.**

**Keywords:** self-compacting fine-grained concrete, modifier, microfiller, flowability, strength, pore structure, shrinkage.

**Вступ.** Самоущільнювальний бетон широко застосовують у будівництві під час виробництва збірного залізобетону, влаштування монолітної безшовної підлоги, торкретбетонування, реставрації і посилення конструкцій, виконання дорожньо-ремонтних робіт. Використання цього матеріалу дає змогу відмовитися від віброущільнення, що, своєю чергою, зменшує енерговитрати та економить час, покращуючи санітарно-гігієнічні умови праці. Безвібраційна технологія настільки знижує рівень шумової дії на людину і навколишнє середовище, що заводи залізобетонних виробів можна розміщувати в урбанізованих міських районах.

**Постановка проблеми.** Прогнозування властивостей готових виробів ставить складне завдання перед дослідниками у сфері технології бетону. Покращання показників якості може бути досягнуте за рахунок застосування математичних моделей, що враховують й описують реологію литих сумішей, оптимальний розподіл заповнювачів у структурі матеріалу, а також апроксимаційних статистичних залежностей, що оцінюють вплив мікронаповнювачів на експлуатаційні характеристики споруд [1, 3, 4, 5]. Отже, формується системний підхід до визначення показників якості бетону, що дає змогу прогнозувати і спрямовано регулювати його властивості залежно від цілей і завдань, які вирішують будівельники і технологи. Тому актуальним є розроблення самоущільнювальних бетонів, що володіють підвищеною легкоукладальністю, інтенсивним набором міцності, високою водонепроникністю, морозостійкістю, а також забезпечують низькі показники усадки і набухання [2, 6, 8, 9, 10].

Постановка завдання та формулювання основних положень і висновків здійснювались під керівництвом наукового керівника, д-ра техн. наук, проф. М.А. Саницького.

**Аналіз останніх джерел і публікацій.** Створення самоущільнювального бетону забезпечило нові можливості в капітальному будівництві [3]. Аналіз інформації з реалізації цілої низки унікальних проектів в Японії (стіни масивного водосховища; великопролітний підвісний залізобетонний міст Akashi Kaikyo, що був відкритий в квітні 1998 року, з'єднує острови Хонсю і Сикоку), Німеччині (віадук Кохер), США (хмарочос Union Plaza), Франції (тунель під Ла-Маншем), Індії (атомна електростанція, мости і тунелі метрополітенів, високошвидкісна естакада в Мумбаї), Данії (міст Great Belt), Малайзії (бізнес-центр “Petronas Twin Towers”), Норвегії (нафтодобувні платфор-

ми в Північному морі), Португалії (міст Васко да Гама), Нідерландах (комплекси великих гідротехнічних і транспортних споруд) та інших країнах світу свідчить про стабільну тенденцію підвищення застосування самоущільнювальних бетонів [8–10].

Концепція одержання самоущільнювальних бетонів – Self-compacting Concrete (SCC) – полягає в отриманні матеріалу з мінімальними дефектами в структурі – мікротріщинами й порами. Основні принципи технології SCC-бетонів такі [3, 8, 9, 10]: підвищення однорідності бетону за рахунок зменшення максимального розміру частинок (виключення грубого заповнювача); введення до складу бетону суперпластифікаторів для максимального розрідження бетонної суміші; створення оптимальної щільності за рахунок використання мікронаповнювачів; використання необхідного В/Ц в бетоні; забезпечення оптимальних умов тверднення бетону.

У деяких сферах будівництва, особливо при виготовленні тонкостінних густоармованих конструкцій, що формуються у вертикальному положенні, а також за відсутності фракціонованих грубих заповнювачів, раціонально використовувати дрібнозернисті самоущільнювальні бетонні суміші [1, 4, 6]. Дрібнозернисті бетони відрізняються від звичайних крупнозернистих вищим вмістом цементного каменю, меншою крупністю зерен, підвищеною пористістю і питомою поверхнею заповнювача, пониженою можливістю регулювати властивості заповнювачів, зміною співвідношення між окремими фракціями [3]. Вся еволюція удосконалення структури бетону з підвищенням його міцності пов'язана зі зменшенням розмірів крупного заповнювача з 20–40 мм до 3–10 мм. Так, останні 10–15 років самоущільнювальні бетони виготовляють із бетонних сумішей, максимальна крупність щебеневого заповнювача яких не перевищує 8–12 мм [1, 2, 6].

Застосування якісно нових дрібнозернистих самоущільнювальних бетонів дають змогу збільшити зчеплення арматури з бетоном, запобігти виникненню усадкових тріщин і відшарування бетону конструкції, а також підвищити його стійкість до агресивних впливів. Крім того, такі бетонні суміші повинні бути доступними, технологічними й екологічно безпечними.

Ще однією сферою застосування дрібнозернистих самоущільнювальних бетонів є дорожньо-ремонтні роботи. Розвиток й утримання дорожньої мережі України на належному технічному рівні нерозривно пов'язані з роботами з ремонту й утримання доріг. Місто Львів є історичною цінністю України і входить в спадщину ЮНЕСКО. Більшість доріг історичної частини міста вимощено базальтовою бруківкою, яка нині потребує капітального ремонту. Ремонтні роботи зазвичай виконують звичайним цементно-піщаним розчином, який характеризується недостатньо міцним зчепленням із бруківкою, що особливо помітно при динамічному впливі транспорту. Особливості умов ремонту бруківкового покриття автомобільних доріг потребують одержання спеціальних бетонних сумішей з підвищеними адгезійними властивостями та легкоукладальністю, інтенсивним набором ранньої міцності, високою водонепроникністю, морозостійкістю, а також низькими показниками усадки і набухання.

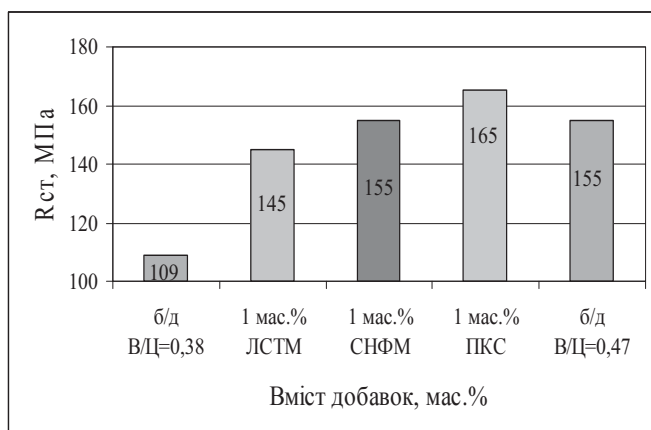
**Метою роботи** є розроблення дрібнозернистих самоущільнювальних бетонів з добавками модифікаторів та мікронаповнювачів, оптимізація їх складу, дослідження технологічних властивостей бетонних сумішей та експлуатаційних характеристик затверділого бетону в різних умовах тверднення.

**Методи досліджень і матеріали.** У роботі під час експериментальних досліджень використовували портландцемент ПЦ П/А-Ш-400 ВАТ “Івано-Франківськцемент” з такими фізико-механічними показниками: питома поверхня  $S_{\text{пит}}=325 \text{ м}^2/\text{кг}$ , залишок на ситі №008 – 7,5 %, початок тужавіння – 1 год 15 хв, кінець – 4 год 15 хв, границя міцності при стиску у віці 2; 7 та 28 діб відповідно 18,5; 29,1 та 42,5 МПа. Як дрібний заповнювач до бетону використовували кварцовий пісок Ясинецького родовища з модулем крупності  $M_{\text{кр}}=1,47$ , насипною густиною –  $1420 \text{ кг}/\text{м}^3$ , пористістю – 42 %, істинною густиною –  $2,61 \text{ г}/\text{см}^3$ , вмістом пилюватих та глинистих домішок – 1 %. Як мікронаповнювач використано золу виносення Бурштинської ТЕС. Модифікування дрібнозернистих бетонних сумішей здійснювали хімічними добавками, зокрема пластифікаторами різних поколінь – лігносульфонатами технічними (ЛСТ), сульфонованими нафталінформальдегідними поліконденсатами модифікованими (СНФМ) та полікарбоксилатами (ПКС). Зразки тверднули у різних умовах – нормальних (вода, температура  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), повітряно-вологих (температура  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість 60–80 %), повітряно-сухих (температура  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , вологість 50–60 %).

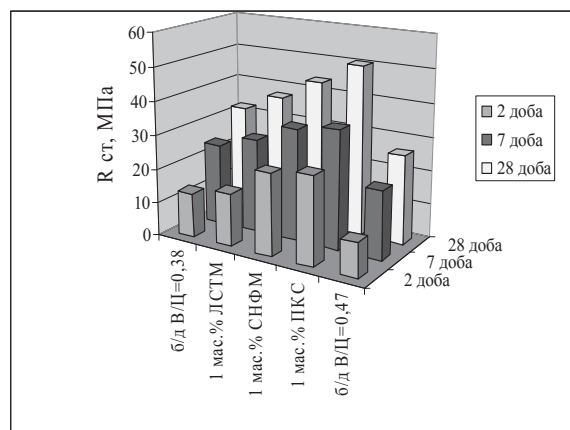
**Результати досліджень.** Сучасні технології бетонування вимагають застосування високорухливих бетонних сумішей з часом використання до 3–4 год. Водночас, випуск високопластичних сумішей за рахунок збільшення витрати цементу та води на практиці негативно впливає на будівельно-технічні властивості затверділого бетону. З метою надання бетонним сумішам вищих показників рухливості та її збереження в часі до їх складу вводили суперпластифікатори різних типів.

Виконаними дослідженнями встановлено, що введення хімічних добавок ЛСТМ, СНФМ і ПКС в кількості 1,0 мас. % до дрібнозернистої бетонної суміші при сталому В/Ц забезпечує збільшення рухливості на 35–50 % (рис. 1, а). Найменшим підвищенням рухливості характеризується дрібнозерниста бетонна суміш з 1 мас. % ЛСТМ. Зазначимо, що для отримання високопластичної бетонної суміші без добавок (РК=155 мм) необхідно збільшувати водоцементне відношення до 0,47.

Аналіз результатів випробування міцності дрібнозернистого бетону свідчить (рис. 1, б), що використання високорухливих бетонних сумішей без модифікаторів (В/Ц=0,47) спричиняє спад міцності в усі терміни тверднення. При введенні 1 мас. % ЛСТМ не відбувається зниження міцності дрібнозернистого бетону за підвищеної рухливості порівняно зі складом без модифікаторів (В/Ц=0,38) в усі терміни тверднення. Введення 1 мас. % СНФМ забезпечує приріст міцності дрібнозернистого бетону. Так, міцність у віці 2; 7 та 28 діб становить відповідно 24,2; 33,3 та 44 МПа порівняно з 13,1; 24,1 та 32,3 МПа для дрібнозернистого бетону без добавок (В/Ц=0,38).



а



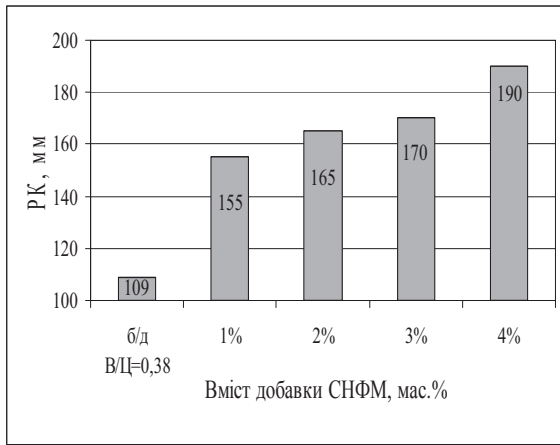
б

Рис. 1. Вплив модифікаторів на рухливість дрібнозернистої бетонної суміші (а) та міцність затверділого бетону (б)

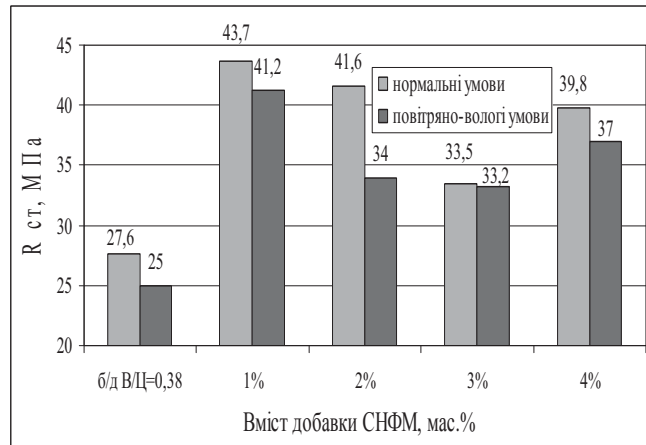
При використанні модифікаторів полікарбоксилатного типу (ПКС) спостерігається найбільший приріст міцності у весь період тверднення і марочна міцність такого бетону при РК=165 мм досягає 50,3 МПа. Однак полімерні суперпластифікатори як продукти направленої хімічної синтезу є найдорожчими матеріалами, що обмежує їх використання в Україні. Якщо вартість полікарбоксилатного полімеру в перерахунку на суху речовину прийняти за 100 %, то вартість суперпластифікаторів на основі СНФМ становитиме 40 %, ЛСТМ – 20 % [3]. Тому суперпластифікатори на основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів модифікованих (СНФМ), які залишаються найпоширенішими модифікаторами не тільки в Україні, але й в світовій практиці бетонування, використані під час подальших експериментів [6, 8].

Дослідженнями впливу добавки СНФМ на реологічні властивості дрібнозернистого бетону встановлено (рис. 2, а), що введення 1 мас. % СНФМ забезпечує підвищення розпливу конуса від 109 до 155 мм порівняно зі складом без модифікатора. Подальше збільшення вмісту СНФМ сприяє зростанню рухливості дрібнозернистого бетону. Так, при веденні 2, 3 та 4 % СНФМ розплив конуса дрібнозернистої бетонної суміші зростає до 165, 170 та 190 мм відповідно.

Порівняльні дослідження міцності дрібнозернистого бетону з різним вмістом добавки СНФМ показали (рис. 2, б), що найбільшою міцністю як в нормальних, так і в повітряно-вологих умовах характеризуються зразки з 1 мас. % СНФМ. Марочна міцність такого дрібнозернистого модифікованого бетону в нормальних умовах становить 43,7 МПа, що на 37 % вище від міцності дрібнозернистого бетону без добавок (В/Ц=0,38, РК=109 мм).



а

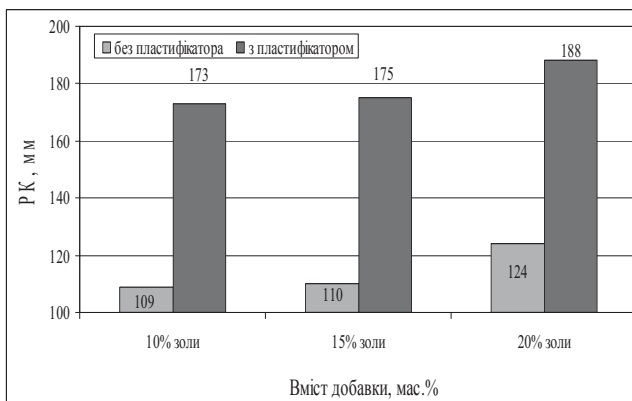


б

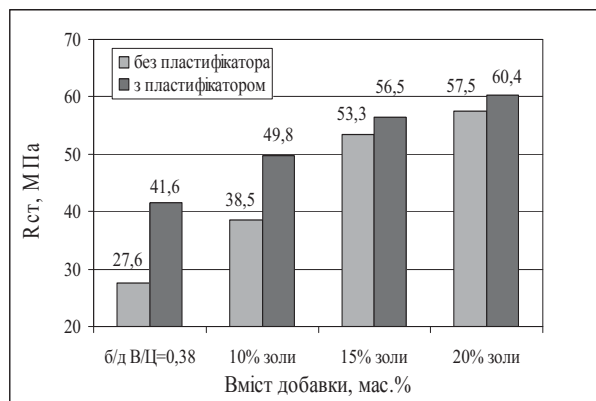
Рис. 2. Вплив добавки СНФМ на реологічні характеристики дрібнозернистої бетонної суміші (а) та міцність бетону у віці 28 днів у різних умовах тверднення (б)

Мінеральні добавки є невід’ємним компонентом сучасних самоущільнювальних бетонів. Їх застосування дає змогу уникнути водовідділення, значно збільшити пластичність і в’язкість бетонних сумішей, а також підвищити щільність структури портландцементного каменю та бетону, підвищити їх міцність та довговічність [3, 5]. Використання як активних мінеральних добавок вторинних матеріалів дасть змогу вирішити питання утилізації побічних відходів промисловості. З цією метою в роботі використано дрібнодисперсний продукт високотемпературної обробки мінеральної частини вугілля – зола виносення Бурштинської ТЕС. Мінеральну добавку вводили в кількості 10–20 % до бетонної суміші за відповідного зменшення витрати піску. Зола виносення є дисперснішою, ніж портландцемент, тому виступає мікронаповнювачем і дає змогу за сталого водоцементного відношення (В/Ц=0,38) внаслідок прояву ефекту “підшипника кочення”, дещо збільшити рухливість суміші (рис. 3, а). Зазначимо, що сумісне використання суперпластифікатора СНФМ та золи виносення забезпечує істотніше збільшення рухливості бетонної суміші порівняно з дрібнозернистою бетонною сумішшю без мінеральної добавки.

Дослідженнями встановлено (рис. 3, б), що міцність дрібнозернистого самоущільнювального бетону з використанням 1 мас. % СНФМ та золи виносення в кількості 10, 15, 20 % у віці 28 днів в нормальних умовах становить 49,8; 56,5; 60,4 МПа відповідно, тоді як міцність бетону без золи виносення при однаковій рухливості (PK=155 мм) дорівнює 41,6 МПа, а бетону без добавок – лише 27,6 МПа. При твердненні у повітряно-вологіх умовах міцність дрібнозернистого самоущільнювального бетону дещо знижується. Подальші дослідження властивостей дрібнозернистого самоущільнювального бетону здійснено з використанням 15 мас. % золи виносення Бурштинської ТЕС.



а



б

Рис. 3. Вплив золи виносення на реологічні властивості дрібнозернистої бетонної суміші (а) та міцність самоущільнювального бетону у віці 28 днів (б)

Основними елементами структури дрібнозернистого бетону як капілярно-пористого матеріалу є: в'язуче та цементуюча речовина у вигляді гідратованих мінералів клінкеру (гелеподібна і кристалічна складові); залишки частинок в'язучого, що не прореагували з водою, а також частинки мінеральних добавок-наповнювачів; дрібний заповнювач (пісок); система мікро- і макропор, які мають різні розміри, форму та походження. Система пор є важливим елементом структури бетону і значною мірою впливає на формування його фізико-механічних властивостей. Із збільшенням вмісту води внаслідок зменшення абсолютного об'єму системи "цемент+вода", що твердне, утворюються контракційні пори розмірами 10–100 нм. В процесі тверднення бетону на основі високорухливих сумішей в результаті випаровування води, яка має фізико-механічний зв'язок з агрегатами частинок цементного гелю, утворюються капілярні пори (макропори). Їхні розміри й об'єми тим більші, чим більший надлишок води в бетонній суміші, що забезпечує потрібну рухливість. Макропористість бетону зменшується при зниженні В/Ц, збільшенні ступеня гідратації цементу, зменшенні повітрязахоплення в бетонну суміш, застосуванні хімічних та мінеральних добавок, що ущільнюють структуру бетону [1]. Характер пористості визначає основні властивості матеріалу – міцність, водопроникність, стійкість до зовнішніх впливів та довговічність матеріалів [7]. У зв'язку з цим вивчено параметри порової структури самоущільнювального дрібнозернистого бетону згідно з ГОСТ 12730.4-78.

Результати визначення параметрів порової структури дрібнозернистого самоущільнюваного бетону свідчать (див. таблицю), що використання модифікатора СНФМ та золи виносення дає змогу регулювати параметри інтегральної та диференціальної пористості матеріалу.

#### Основні параметри порової структури дрібнозернистого самоущільнювального бетону

Вид і кількість добавки	В/Ц	РК, мм	$R_{cm}^{28}$ , МПа	Водопоглинання, %		Показник середнього розміру пор, $\lambda$	Показник однорідності пор за розмірами, $\alpha$
				за масою, $W_m$	за об'ємом, $W_o$		
б/д	0,38	109	46,5	0,95	1,97	0,80	0,50
1 мас. % СНФМ	0,38	270	47,8	0,94	1,96	1,05	0,85
1 мас. % СНФМ + 15 мас. % золи виносення	0,38	270	53,6	0,93	1,95	0,61	0,98

Зазначимо, що чим менше водопоглинання, менший коефіцієнт  $\lambda$  і чим більше значення  $\alpha$ , тим рівномірніше розподілені пори за розмірами, що забезпечує отримання щільної структури матеріалу. Так, об'ємне водопоглинання модифікованого дрібнозернистого бетону, що характеризує його відкриту капілярну пористість ( $W_o$ ), знижується на 1,2 % порівняно із дрібнозернистим бетоном без добавок при рухливості, вищій у два рази. Дрібнозернисті самоущільнювальні бетони характеризуються покращеною поровою структурою – меншим середнім розміром пор, кількістю макропор та підвищеною однорідністю пор за розміром із забезпеченням дрібнопористої структури.

Використання модифікованих портландцементних композицій зумовлює прискорення процесів гідратації і формування кристалічної структури, яка характеризується меншою здатністю до вологісних деформацій. У нормальних умовах тверднення цементного каменю внаслідок неперервного перебігу процесів гідратації клінкерних мінералів портландцементу проходить хімічне зв'язування води. В результаті цього певна кількість води замішування активно бере участь у формуванні новоутворень і міцно зв'язується в гідрати. У повітряно-сухих умовах відбувається постійне зменшення маси зразків у зв'язку з їх висиханням. Це надалі може спричинити утворення тріщин та недобори міцності. У вологообміні цементного каменю активну участь бере адсорбційно зв'язана вода, в результаті випаровування якої з капілярів та моношарів розвиваються сили капілярного стискування та цементний камінь зазнає зсідання.



Істотний вплив на зсідання бетону має водоцементне відношення. Чим вище В/Ц, тим нижча міцність цементного каменю та більша його пористість, що зумовлює інтенсивніший вологообмін з навколишнім середовищем і тим слабший опір кристалічного зростка об'ємним змінам, що відбуваються в гелі. Велика кількість пор у цементному камені з високим В/Ц зумовлює розвиток поверхні, на якій відбувається вологообмін з навколишнім середовищем, в результаті цього вологовіддача проходить інтенсивніше. Це призводить до швидшого висихання поверхневих шарів, розвитку великих градієнтів вологості і зростання напружень зсідання. Так, результатами досліджень встановлено (рис. 4, а), що зростання водоцементного відношення дрібнозернистого бетону від В/Ц=0,38 до 0,47 для забезпечення такої самої рухливості бетонної суміші, як і з використанням модифікатора (РК=167 мм), призводить до збільшення зсідання цементного каменю у віці 28 діб на 32,5 %. Зазначимо, що дрібнозернистий самоущільнювальний бетон у віці семи діб характеризується деформаціями зсідання, на 45 % меншими, ніж бетон без добавок за сталого водоцементного відношення (В/Ц=0,38) та на 60 % меншими, ніж бетон з підвищеною водопотребою (В/Ц=0,47).

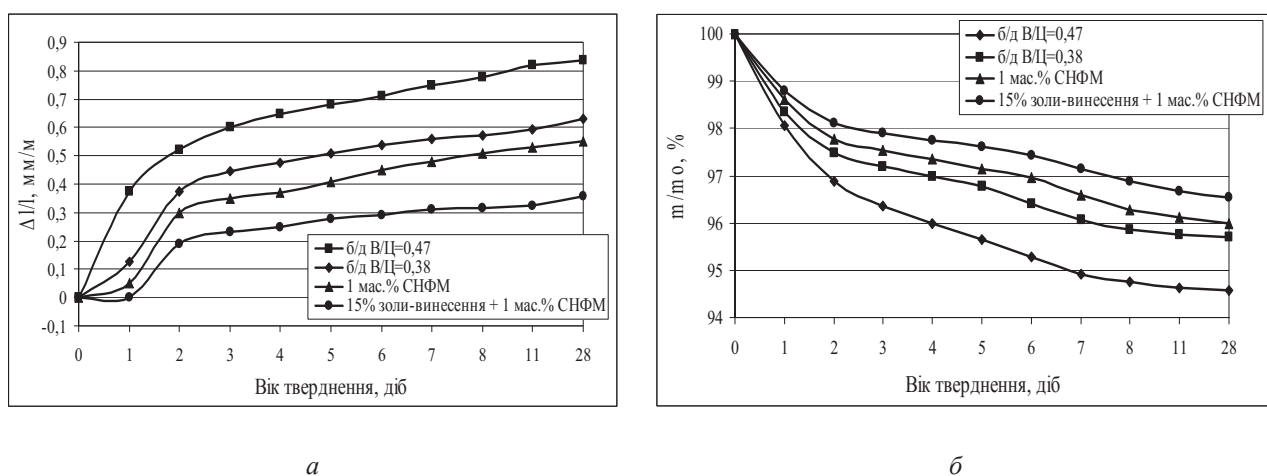


Рис. 4. Зміна деформації зсідання (а) та маси (б) дрібнозернистого самоущільнювального бетону в повітряно-сухих умовах тверднення

Паралельно до зміни деформацій балочок 4x4x16 см визначали зміни маси зразків (рис. 4, б). Зауважимо, що інтенсивна втрата води в бетонах відбувається в перші сім діб тверднення. При цьому найбільша втрата вологовмісту 5,08 % спостерігається у зразках бетону з підвищеним водоцементним відношенням (В/Ц=0,47). Введення модифікатора СНФМ у кількості 1 мас. % забезпечує меншу втрату вологовмісту (3,4 %). Використання золи винесення та суперпластифікатора СНФМ призводить до зв'язування води у гідратні новоутворення, внаслідок чого втрата вологовмісту є найменшою і становить близько 2,85 %.

Отже, використання комплексного модифікатора на основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів та золи винесення в складі дрібнозернистого бетону дає змогу за сталої водопотреби забезпечити створення структури з необхідними експлуатаційними характеристиками.

**Висновок.** Дослідженнями фізико-механічних характеристик дрібнозернистого бетону на основі високорухливих модифікованих бетонних сумішей встановлено, що введення суперпластифікаторів різних типів забезпечує оптимальне формування структури бетону в нормальних умовах та в остаточному результаті забезпечує зростання його міцності. Використання високорухливих бетонних сумішей без модифікаторів спричиняє зниження міцності в усі терміни тверднення. Водночас, при твердненні в повітряно-сухих умовах для дрібнозернистого бетону з добавками більшою мірою спостерігається постійне зменшення маси зразків у зв'язку з їх висиханням та зростання усадкових деформацій, що може спричинити утворення тріщин та недобори міцності

бетону, отриманого на основі високорухливих бетонних сумішей. Використання комплексних модифікаторів на основі суперпластифікатора СНФМ та золи винесення дає змогу досягти зростання міцності дрібнозернистого бетону на 30–50 % у нормальних умовах тверднення. Крім того, застосування органомінеральної добавки позитивно впливає на порову структуру цементного каменю та бетону, підвищуючи їх щільність і довговічність. Розроблені дрібнозернисті самоущільнювальні бетони із забезпеченими високою технологічністю та інтенсивними темпами набору їх ранньої міцності рекомендовані для ремонтних сумішей під час дорожньо-ремонтних робіт. Бетони із застосуванням комплексних органомінеральних модифікаторів характеризуються незначною втратою маси та пониженими деформаціями зсідання у повітряно-сухих умовах тверднення, що розширить можливість виконання дорожньо-ремонтних робіт протягом року.

1. Баженов Ю.М. *Высококачественный тонкозернистый бетон* / Ю.М. Баженов // *Строительные материалы*. – 2000. – № 2. – С. 24–25. 2. *Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації* / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, І.І. Кіракевич, Б.Г. Русин // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теорія і практика будівництва”*. – 2008. – № 627. – С. 191–197. 3. Зайченко Н.М. *Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой* / Н.М. Зайченко. – [монографія]. – Макеевка: ДонНАСА, 2009. – 207 с. 4. *Метакаолин в будівельних розчинах і бетонах* / [Дворкін Л.Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В.В.]. – [монографія]. – К.: КНУБіА, 2007. – 216 с. 5. Ольгинский А.Г. *Особенности контактообразования в цементных бетонах с минеральным микронаполнителем* / А.Г. Ольгинский // *Вісник Донбаської державної академії будівництва та архітектури*. – 2004. – Вип. 2004-1(43), Т. 1. – С. 134–140. 6. Ушеров-Маршак А.В. *Современный товарный бетон* // *I Международная научно-практическая конференция “Товарный бетон. Новые возможности в строительных технологиях”*. Материалы конференции. – Харьков, 2008. – С. 8–15. 7. Штарк Й., Вихт Б. *Цемент и известь* / Пер. с нем. А. Тулаганова // Под ред. П. Кривенко. – К., 2008, 480 с. 8. Collepardi M. *Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC* / M. Collepardi // *Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering, 2003:Proc.* – Milan (Italy), 2003. – P. 1–8. 9. Paschmann H. *Self compacting concrete – practical advice* // *Concrete Plant + Precast Technology*. – 1999. – № 11. – P. 34–42. 10. *Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates* / M. Shoya, S. Sugita, Y. Tsukinada [at el] // *Creating with Concrete: International Conf., 1999: Proc.* – Dundee (Scotland), 1999. – P. 121–130.