

І.І. Кіракевич, У.Д. Марущак, М.А. Саницький, М.С. Стечишин
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельного виробництва

САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНІ БЕТОНИ ЗІ ШВИДКИМ НАРОСТАННЯМ МІЦНОСТІ

© Кіракевич І.І., Марущак У.Д., Саницький М.А., Стечишин М.С., 2012

Наведено результати фізико-механічних випробувань супер-пластифікованих цементуючих систем з високою ранньою міцністю для самоущільнювальних бетонів. Вивчено особливості формування їх фазового складу і мікроструктури. Проведено оптимізацію складів самоущільнювальних бетонів зі швидким наростанням міцності на основі розроблених цементуючих систем за критеріями легковкладальності і міцності.

Ключові слова: самоущільнювальний бетон, суперпластифікована цементуюча система, рухливість, швидке наростання міцності.

In this paper the physico-mechanical testing results of rapid hardening superplasticized cementitious systems for Self-compacting concretes (SCC) are shown. The peculiarities of phase composition and microstructure of superplasticized cementitious systems are studied. The mix proportions of Rapid Hardening SCC based on designed cementitious systems are optimized according to the criteria of flowability and strength.

Key words: Self-compacting concrete, superplasticized cementitious system, flowability, strength, rapid hardening.

Вступ. У сучасному будівництві для підвищення технологічної забезпеченості проектних рішень широко застосовуються бетони нового покоління з високими технологічними і експлуатаційними властивостями і гарантованими показниками якості, яким відводиться важлива роль у складних інженерних спорудах ХХІ ст., за мінімальних енергетичних, матеріальних і трудових затрат [1]. Враховуючи ці чинники, широкого впровадження у сучасному інноваційному будівництві набув самоущільнювальний бетон (Self-compacting concrete – SCC), особливістю якого є здатність ущільнюватися без механічного впливу, заповнювати форми під дією власної ваги без вібрації і сегрегації за самочинного виділення повітря, зокрема і в густоармованих конструкціях, що передбачає максимальне уникнення трудомістких та енергозатратних операцій його вкладання та ущільнення [2].

Постановка проблеми. У технології сучасного монолітного бетону і залізобетону актуальною проблемою є одержання високорухливих та самоущільнювальних бетонних сумішей із дотриманням властивостей у часі, що дає змогу перекачувати їх бетононасосами та виготовляти тонкостінні густоармовані конструкції. При цьому виникає необхідність отримання бетону з інтенсивною кінетикою набору міцності в ранні терміни тверднення без використання теплової обробки, що забезпечує швидкий набір розпалубної міцності, інтенсивне тверднення за знижених температур, можливість раннього навантаження конструкцій, скорочення виробничого циклу, збільшення оборотності опалубки та прискорення зведення монолітних будівель та споруд.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Я. Швабовський (J. Szwabowski) та ін. зазначають, що складність проектування самоущільнювального бетону полягає у забезпеченні як високих технологічних властивостей бетонної суміші, так і високих експлуатаційних властивостей затверділого бетону [3]. При цьому пріоритетною вимогою є покращені реологічні показники бетонної суміші – рухливість, в'язкість, сегрегація, нівелювання у густоармованих конструкціях, видалення захопленого повітря, що зумовлює багатокomпонентність складів самоущільнювальних

бетонів з використанням хімічних та мінеральних добавок, наповнювачів, поліфракційних заповнювачів [1, 3]. До того ж специфіка складів самоущільнювальних бетонів зумовлює певні особливості будівельно-технічних характеристик затверділого композиту. Г.В. Несветаєв показав [4], що за рахунок зміни макроструктури бетону (збільшення кількості цементного каменю та зменшення великого заповнювача) та впливу суперпластифікатора деформації усадження самоущільнювального бетону дещо збільшується, а початковий модуль пружності зменшується порівняно з показниками бетонів однакового класу, одержаних за традиційною технологією. С.В. Коваль та ін. [5] одержали самоущільнювальний бетон з використанням вапнякового мікронаповнювача та портландцементу марки 400, при цьому міцність бетонів на такому цементі через три доби не перевищує 50 % від марочної, а через 28 діб – не вище 45 МПа (клас В40), що недостатньо для зведення висотних споруд.

Узагальнення результатів досліджень в області технології бетону свідчить, що прискорення тверднення бетону за монолітного бетонування з використанням самоущільнювальних бетонних сумішей вимагає нового підходу до створення пластифікованої цементної матриці, основою якого є регулювання процесу структуроутворення, а також якнайповніше використання властивостей в'язучих систем [3, 6]. Одержання щільної структури самоущільнювального бетону на мікрорівні досягається такими ефектами [7]: високою щільністю упакування зерен цементуючої системи за рахунок використання дрібнодисперсних композицій (фізична оптимізація); пуцолановою реакцією при використанні активних мінеральних добавок (хімічна оптимізація); збільшенням зчеплення між цементною матрицею та заповнювачем (оптимізація мезоструктури бетону). Дрібнодисперсні мінеральні добавки виконують у цементних системах три основні функції: заповнення міжзернового простору, покращення реологічних властивостей за рахунок сферичної форми мінеральних компонентів, забезпечення зв'язування портландиту у гідросилікати кальцію [8]. Одним із методів інтенсифікації тверднення бетону у ранній період є застосування добавок-прискорювачів тверднення, значний практичний інтерес серед яких являють високорозчинні солі натрію – тіосульфат та роданід [9]. Тому одержання самоущільнювальних бетонів зі швидким наростанням міцності та покращеними будівельно-технічними властивостями вимагає розроблення цементуючих систем “портландцементний клінкер – регулятор термінів тужавіння – активні мінеральні добавки – мікронаповнювачі – суперпластифікатор – прискорювачі тверднення”, що дає змогу направлено керувати технологічністю та кінетикою структуроутворення, інтенсифікувати початкові стадії тверднення та створити особливо міцну і монолітну структуру затверділого бетону.

Мета роботи – розробити суперпластифіковані цементуючі системи з високою ранньою міцністю, оптимізувати склад самоущільнювальних бетонів на їх основі за критеріями легковкладальності та міцності.

Методи досліджень і матеріали. Для приготування самоущільнювальних бетонів під час проведення експериментальних досліджень використовували суперпластифіковані цементуючі системи на основі портландцементу ПЦ І-500-Н ВАТ “Івано-Франківськцемент”, вапнякового мікронаповнювача, комплексної мінеральної добавки на основі метакаоліну (МК), суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (ПК) та прискорювачів тверднення (роданіду та тіосульфату натрію – ТРН). Як дрібні заповнювачі до бетону використовували кварцовий пісок Ясинецького родовища з модулем крупності $M_k=1,32$ та пісок Жовківського родовища ($M_k=2,77$), як великий заповнювач – гранітний щебінь фракції 5–20 мм.

Текучість цементного тіста на основі цементуючих систем оцінювали за діаметром розпливання циліндра Сутгарда (РЦ). Рухливість цементуючих систем визначали за розливом стандартного конуса згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Технологічні та будівельно-технічні властивості бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем визначали згідно зі спеціальними методами оцінки якості, рекомендованими європейською комісією з самоущільнювального бетону (EFRAKC), чинних стандартів та загальноприйнятих методик. Вивчення особливостей процесів гідратації суперпластифікованих цементуючих систем проводили за допомогою рентгенофазового аналізу та растрової електронної мікроскопії.

Результати досліджень. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009 для портландцементу ПЦ І-500-Н (НГЦТ=0,30) початок тужавіння становить 3 год 50 хв, кінець – 7 год 30 хв. Для одержання високорухливої системи (РЦ=250 мм) водопотреба цементного тіста на основі цього портландцементу зростає до 0,50, при цьому істотно сповільнюються процеси раннього структуроутворення. Так, початок тужавіння становить 8 год 40 хв, кінець – 11 год 10 хв. Процеси раннього структуроутворення цементуючої системи “портландцемент ПЦ І-500-Н – активна мінеральна добавка (МК) – вапняковий мікронаповнювач – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу – прискорювачі тверднення” в умовах підвищеної рухливості (В/Ц=0,30, РЦ=270 мм) прискорюються порівняно з рівнорухливою системою без добавок – початок та кінець тужавіння на 3 год 10 хв та на 3 год 20 хв відповідно, що зумовлено структурно-топологічною функцією тонкодисперсних мінеральних добавок на стадії одержання однорідної реологічної матриці, переводом частини вільної води у адсорбційно зв’язану та активізацією процесів гідратації луговмісними прискорювачами тверднення.

Під час випробування згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009 (РК=115 мм) активність портландцементу ПЦ І-500-Н становить $R_{ct}^{28}=50,3$ МПа, цей портландцемент задовольняє вимоги до в’язучого з високою ранньою міцністю. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-46-96 (В/Ц=0,40, РК \geq 135 мм) цементуюча система “портландцемент ПЦ І-500-Н – активна мінеральна добавка (МК) – вапняковий мікронаповнювач – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу – прискорювачі тверднення” забезпечує вимоги до пластифікованих цементів. При цьому розроблена цементуюча система характеризується розпливом РК=180 мм і її можна зарахувати до суперпластифікованих, що створює можливість отримання легковкладальних та самоущільнювальних сумішей на їх основі. Як бачимо з рис. 1, а, в умовах підвищеної рухливості цементуючої системи досягається зростання в 1,4 раза ранньої міцності та приріст міцності на стиск через 28 діб тверднення на 12 %. У той самий час за рахунок істотного водоредукуючого ефекту (Δ В/Ц=23,1 %, РК=110 мм) досягається висока рання міцність ($R_{ct}^2/R_{ct}^{28}=0,69$), яка відповідає стандартній міцності портландцементу ПЦ І-500-Н. Активність цементуючої системи становить $R_{ct}^{28}=72,5$ МПа, що визначає технічний ефект та створює можливість одержання високоміцного в’язучого з високою ранньою міцністю. Міцність на згин цементуючої системи у ранньому віці в умовах підвищеної рухливості зростає на 30–32 %, а через 28 діб – на 10 % порівняно з ПЦ І-500-Н (рис. 1, б). За зниженого водовмісту (РК=115 мм) міцність цементуючої системи на згин в усі терміни тверднення зростає у 1,3–1,6 раза порівняно з міцністю портландцементу ПЦ І-500-Н.

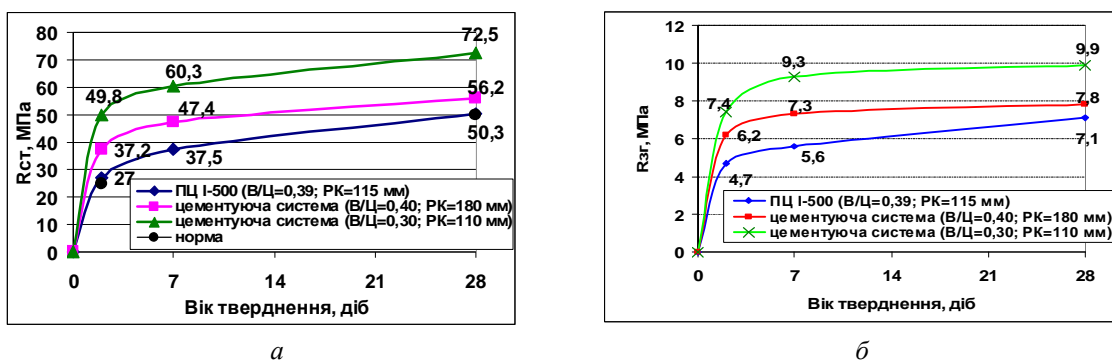


Рис. 1. Міцність на стиск (а) та згин (б) портландцементу ПЦ-І-500-Н та цементуючих систем на його основі

Використання у суперпластифікованих цементуючих системах органо-мінеральних добавок зумовлює зміну процесів раннього структуроутворення, фазового складу, ущільнення мікроструктури й зростання міцності цементної матриці. Так, міцність каменю на основі ПЦ І-500-Н без добавок (НГЦТ=0,30, РЦ=50 мм) через 28 діб тверднення в нормальних умовах становить 60,1 МПа, тоді як

суперпластифікованої цементуючої системи (В/Ц=0,30, РЦ=300 мм) – 71,8 МПа, а каменю на основі рівнорухливої системи без добавок (В/Ц=0,50) – 33,8 МПа.

На дифрактограмах цементного каменю без добавок через одну добу гідратації фіксуються основні лінії гідратних фаз, зокрема еtringіту ($d/n=0,973; 0,561; 0,388; 0,348; 0,256$ нм) та $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=0,493; 0,263; 0,193; 0,179$ нм) (рис. 2, а). Ступінь гідратації клінкерної складової портландцементу через одну добу становить 46 %, а при використанні суперпластифікованої цементуючої системи підвищується до 53 %, що призводить до збільшення кількості гідратних фаз, ущільнення цементного каменю та сприяє зростанню його міцності. У процесі тверднення суперпластифікованої цементуючої системи зменшується інтенсивність ліній $\text{Ca}(\text{OH})_2$ внаслідок його зв'язування введеними мінеральними добавками, зокрема активними Al_2O_3 та SiO_2 метакаоліну з утворенням еtringіту, гексагональних гідроалюмінатів кальцію C_4AH_{13} та гідросилікатів кальцію (рис. 2, б). Через 28 діб тверднення цементуючої системи за рахунок введення вапнякового борошна спостерігається поява ліній гідрокарбоалюмінатів кальцію типу $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaCO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ($d/n=0,941; 0,380; 0,270; 0,251$ нм) та $\text{C}_3\text{A}\cdot \text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ($d/n=0,760; 0,380; 0,276$ нм), що підтверджує активну структуроутворювальну роль вапняку у досліджуваних системах.

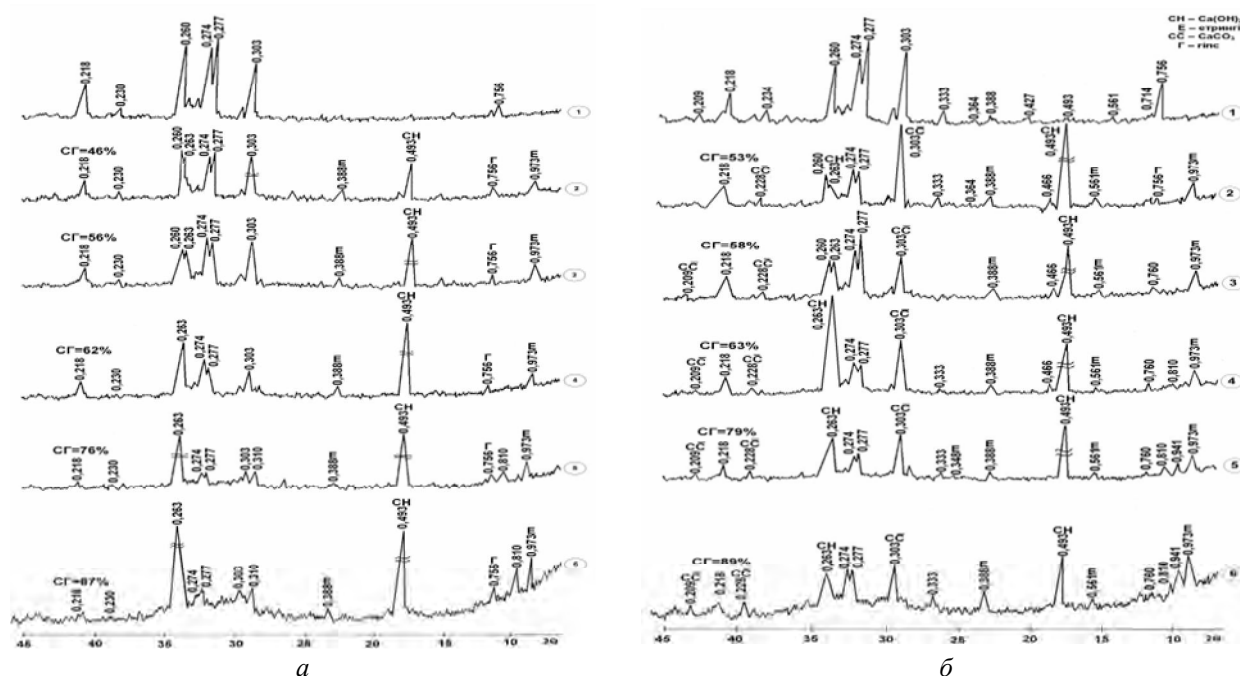


Рис. 2. Дифрактограми каменю на основі портландцементу ПЦ I-500 без добавок за В/Ц=0,50 (а) та суперпластифікованої цементуючої системи за В/Ц=0,30 (б): 1 – негідратована; 2-6 – гідратована відповідно через 1; 3; 7; 28 та 180 діб

Використання методу растрової електронної мікроскопії доповнює дані про формування мікроструктури каменю у нормальних умовах тверднення. Цементний камінь, модифікований добавкою ПК (В/Ц=0,30, РЦ=260 мм), через 28 діб гідратації характеризується доволі щільною мікроструктурою, пори якого або вже заросли гідратними новоутвореннями, зокрема голчастими кристалами еtringіту, розмір яких досягає 20–40 мкм (рис. 3, а), або знаходяться в стадії заростання. Мікроструктура цементного каменю на основі суперпластифікованої цементуючої системи (В/Ц=0,30, РЦ=300 мм) характеризується наявністю гелеподібних CSH-фаз, кристалів портландиту, AF_m - і AF_l -фаз, а також мікронаповнювача – кальциту. Взаємодія активного оксиду алюмінію метакаоліну з кальцієм гідроксидом та гіпсом у неклінкерній частині в'язучого за рахунок топомічних реакцій сприяє формуванню вторинного дрібнокристалічного еtringіту (рис. 3, б), що забезпечує ущільнення системи та швидке зростання міцності суперпластифікованої цементуючої системи.

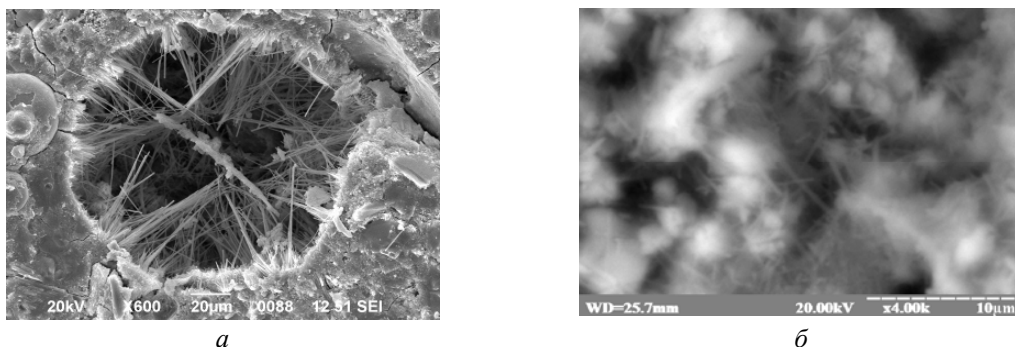


Рис. 3. Кристали еtringіту у порі портландцементного каменю з добавкою ПК (а) та в камені на основі суперпластифікованої цементуючої системи (б) через 28 діб тверднення

Для проектування складу самоущільнювального бетону використаний один з методів статичної математичної обробки результатів – метод ортогонально-центрального композиційного планування (ОЦКП). Факторами оптимізації вибрана кількість вапнякового мікронаповнювача ($X_1=0; 100; 200$ кг) та мінеральної добавки на основі метакаоліну ($X_2=0; 60; 120$ кг) за стабілізованих значень витрати суперпластифікатора полікарбонатного типу (2 мас. %) і прискорювача тверднення на основі натрію тіосульфату та роданіду (1 мас. %). Покращення показників якості бетону досягається за умови поліфракційності заповнювачів та оптимального їх розподілу у структурі матеріалу. Для забезпечення максимальної щільності упакування зерен та одержання неперервної кривої розсіювання оптимальний вміст піску Ясинецького родовища у суміші заповнювачів становить 30 мас.%, решта – пісок Жовківського родовища.

У результаті обробки експериментальних даних методом найменших квадратів одержані рівняння регресії міцності на стиск через 2, 7 та 28 діб тверднення у нормальних умовах:

$$Y_2(R_{ct}^2)=45,11+0,52X_1+2,92X_2-8,02X_1^2-15,22X_2^2+1,85X_1X_2$$

$$Y_3(R_{ct}^7)=55,03+2,90X_1+3,15X_2-8,10X_1^2-15,05X_2^2+3,70X_1X_2$$

$$Y_4(R_{ct}^{28})=75,26+3,25X_1+2,47X_2-11,28X_1^2-11,43X_2^2+4,10X_1X_2$$

Аналіз поданих коефіцієнтів рівнянь регресії дає змогу зробити багато технологічних висновків. Так, додатні знаки при коефіцієнтах b_1 та b_2 свідчать про позитивний вплив збільшення витрати метакаоліну та вапнякового борошна на міцність бетону через 2 та 28 діб тверднення. Максимальна витрата добавки МК (120 кг/м^3) та вапнякового борошна (200 кг/м^3) негативно впливає на легковкладальність та фізико-механічні властивості бетону в усі терміни тверднення, про що свідчать від'ємні знаки при коефіцієнті b_{11} та b_{22} . За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми, що адекватно описують залежність міцності на стиск від змінних параметрів через 2 та 28 діб тверднення у нормальних умовах (рис. 4).

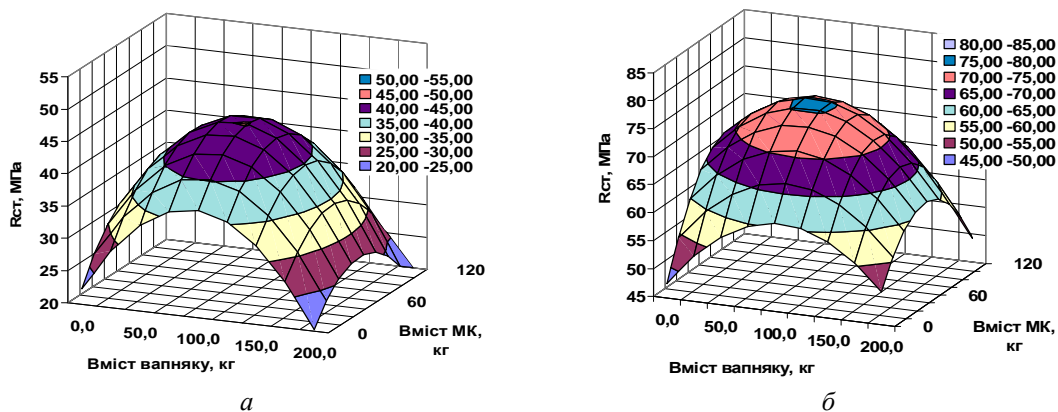


Рис. 4. Ізопараметричні поверхні зміни границі міцності на стиск самоущільнювальних бетонів через 2 (а) та 28 діб тверднення (б) в нормальних умовах

Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дають змогу визначити оптимальний склад самоущільнювального бетону за критеріями легковкладальності та міцності. За верифікації оптимального складу бетону одержано такі характеристики бетонної суміші: клас розпливу SF2 (діаметр розпливу 660–730 мм), клас в'язкості VS2 ($T_{500}=5-8$ с), клас здатності до проникнення PJ1 (ступінь блокування $PJ \leq 10$ мм), клас стійкості до сегрегації SR1 ($SR \leq 20\%$). Міцність самоущільнювальних бетонів ($\text{Ц}:\text{П}:\text{Щ}=1:1,52:2,04$; $\text{Ц}=480$ кг/м³) на основі цементуючих систем з використанням добавок пластифікуючо-прискорювальної дії та оптимальної кількості мінеральних компонентів (60 кг добавки МК та 100 кг вапнякового борошна) через дві доби становить 54,4 МПа, через 28 діб – 80,9 МПа. Розроблені самоущільнювальні бетони на основі суперпластифікованих цементуючих систем характеризуються швидким ($R_{ct}^2/R_{ct}^{28}=0,63 > 0,50$) наростанням міцності (оцінка питомої міцності згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008), підвищеною щільністю (середня густина становить 2350–2425 кг/м³, об'ємне водопоглинання, що характеризує його відкриту пористість, не перевищує 1,5 %), водонепроникністю (W20), морозостійкістю (F400), атмосферостійкістю та корозійною стійкістю ($K_{gr}=1,07-1,1$).

Підвищений вміст розчинової частини, характерний для високоміцних і самоущільнювальних бетонів, може зумовлювати зростання їх деформативності та зниження тріщиностійкості. У зв'язку з цим досліджено деформативні властивості розроблених складів самоущільнювальних бетонів. У межах вимірюваних деформацій фактично відсутні збільшення відносних поздовжніх та поперечних деформацій швидконапливаючої повзучості, що характерно для високоміцних бетонів [10]. Такі особливості деформування (мала частка або відсутність пластичних деформацій на висхідній гілці) визначають основний недолік високоміцних бетонів – крихкий характер їх руйнування за стиску. Модуль пружності самоущільнювального бетону на основі суперпластифікованих цементуючих систем ($\text{Ц}=480$ кг/м³) досягає $52,0 \cdot 10^3$ МПа, а коефіцієнт Пуассона становить 0,17, що сприяє зниженню можливості утворення тріщин. Самоущільнювальні бетони на основі суперпластифікованих цементуючих систем характеризуються незначними деформаціями усадження (0,12 мм/м через 28 діб тверднення у повітряно-сухих умовах).

Висновок. Розроблено суперпластифіковані цементуючі системи з високою ранньою міцністю та встановлено особливості процесів їх структуроутворення. Методом математичного планування експерименту проведено оптимізацію складів самоущільнювальних бетонів на основі розроблених цементуючих систем за критеріями легковкладальності і міцності. Одержані бетони характеризуються швидким наростанням міцності ($R_{ct}^2/R_{ct}^{28}=0,63 > 0,50$), підвищеною марочною міцністю (клас B60), щільністю, водонепроникністю, морозостійкістю та покращеними деформативними властивостями.

1. Okamura H. Mix design for self-compacting concrete / H. Okamura., K. Ozawa // *Conc. Lib. of Japan Soc. of Civ. Eng.*, 1995. No 6. – P. 107–120.
2. Collepardi M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC // *New Technologies and Materials in Civil Engineering*, Milan, 2003. – P. 1–8.
3. Szwabowski J. *Technologia betonu samozageszczalnego* / J. Szwabowski, J. Golaszewski. Krakov: Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2010. – 160 p.
4. Несветаев Г.В. О методологии оценки эффективности добавок для самоуплотняющихся бетонов // *Міжнар. наук.-практ. конф. “Современные бетоны”*. – Запоріжжя: “Будіндустрія ЛТД”, 2008. – С. 111–118.
5. Пути создания самоуплотняющихся бетонов / [С.В. Коваль, Д.М. Поляков, М. Ситарски, М. Циак] // *Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб.* – К.: НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 232–238.
6. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes / [G. Ye, X. Liu, G. De Schutter atc.] // *Cement and Concrete Research*, 2006. – № 29. – P. 94–102.
7. Bajorek G. The effect of cement / additive cooperation in Self compacting concrete // *10 th Scientific conference Rzeszow – Lviv – Kosice*, 2005. – P. 114–119.
8. Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. *Betony ultrawysokowartosciowe. Wlasciwosci, technologie, zastosowania.* – Krakow: SPC 2008. – 157 s.
9. Самоущільнюючі бетони на основі модифікованих цементуючих систем / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, У.Д. Маруцак, І.І. Кіракевич // *XI Міжнарод. науч.-практ. конф. „Дни современного бетона”*. – Запоріжжя, 2010. – С. 103–108.
10. Метаксаолін в будівельних розчинах і бетонах / Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В. Троян. – К.: КНУБіА, 2007. – 216 с.