

– С. 271–276. 5. Слюсаренко Ю.С., Бамбура А.М., Сазонова І.Р., Ковальський Р.К. Особливості моделювання та розрахунку висотного будинку з каркасно-стіновою конструктивною схемою // Зб. “Будівельні конструкції”. – Вип. 67. – К.: НДІБК, 2007. – С. 43–52 6. Łukijaniuk B. Podnoszenie nośności na zginanie płaskich stropów żelbetowych przy pomocy materiałów kompozytowych, na przykładzie budynku biurowego w kompleksie flanders business park w Warszawie // XXIV Konf. nauk.-echn. Awarie budowlane. – Szczecin–Międzyzdroje, 2009. – S.939–946.

УДК 666.942

І.І. Кіракевич

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автомобільних шляхів

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ЦЕМЕНТНИХ СИСТЕМ

© Кіракевич І.І., 2009

Досліджено процеси структуроутворення цементного каменю з добавками полікарбоксилатів під час тверднення в нормальних та повітряно-сухих умовах.

The processes of structure formation of cement paste with polycarboxylates admixture, which hardened in normal and dry conditions were investigated.

Вступ. За монолітного бетонування з використанням бетононасосів застосовуються високорухомі бетонні суміші. Однією з найважливіших властивостей такої бетонної суміші є її підвищена рухливість, що зумовлено особливостями технології її транспортування та укладання, а також необхідність бетонування густоармованих конструкцій. У цьому плані значний практичний інтерес являє використання і дослідження модифікованих портландцементних систем, які забезпечують собою необхідні реологічні властивості.

З врахуванням вказаних параметрів методи випробування портландцементів згідно з євростандартом EN 196 більшою мірою відповідають вимогам монолітного бетонування, що призводить до необхідності дослідження впливу таких технологічних чинників, як В/Ц і рухливість, на фізико-механічні властивості портландцементів. Водоцементне співвідношення має прямий зв'язок із здійсненням процесу тверднення [1, 2]. У той самий час для створення міцного та щільного каменю необхідно забезпечити стиснуті умови тверднення, що визначається низькими показниками В/Ц. Тому для досягнення підвищеної рухливості портландцементних в'язучих систем вводяться високоефективні модифікатори, що визначає необхідність дослідження процесів їх структуроутворення, а також формування та генезис мікроструктури цементного каменю.

Постановка проблеми. Свіжовкладений бетон містить більше води, ніж необхідно для повної гідратації цементу, проте здебільшого у виробничих умовах вже в початкові терміни тверднення значна кількість води втрачається у зв'язку з випаровуванням, що призводить до недоборів міцності, збільшення пористості та погіршення експлуатаційних характеристик будівельного матеріалу. Використання модифікаторів нової генерації типу гіперпластифікаторів дає змогу збільшити час збереження легковкладальності бетонної суміші без значного впливу на терміни тужавіння і тверднення бетону. Серед чисельних переваг використання модифікаторів на основі полікарбоксилатів (ПКС) необхідно виділити: значне скорочення кількості води замішування; можливість перекачування на великі відстані; висока рухливість бетонної суміші без сегрегації; достатній час для вкладання бетону; висока рання та марочна міцності, щільність та довговічність бетону.

Водоцементний чинник є однією з важливих характеристик цементного тіста, що значною мірою визначає його рухливість та будівельно-технічні властивості штучного каменю, які, своєю чергою, залежать від мікроструктури та фазового складу новоутворень. Значна пористість цементного каменю призводить до чималої міграції води крізь зразок матеріалу, а це, своєю чергою, – до зміни маси досліджуваних зразків. Чим вища пористість, тим нижча міцність каменю, що зумовлює інтенсивніший вологообмін з навколишнім середовищем і слабший опір кристалічного зростку об'ємним змінам, що відбуваються в цементному гелі.

У зв'язку з цим доцільно дослідити зміну водовмісту модифікованого портландцементного каменю з постійним В/Ц під час тверднення в нормальних і повітряно-сухих умовах. Згідно з даними [1, 4] зміна В/Ц від 0,3 до 0,5 спричиняє збільшення відстані між цементними зернами майже у 2 рази. Чим більша відстань між цементними зернами, тим пізніше настає початок та кінець тужавіння. Як показали результати досліджень [2], підвищення В/Ц також спричиняє відтягування початку термінів тужавіння. Сповільнення процесу тужавіння за збільшення кількості води замішування спричиняє істотне зниження набору ранньої міцності цементного каменю [1, 4]. Істотне зменшення міцності цементного каменю із збільшенням водоцементного відношення спостерігається і в подальші терміни тверднення.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Текучість цементного тіста визначається фізичними властивостями та хіміко-мінералогічним складом цементу. Міцність цементного каменю зростає або спадає залежно від ступеня гідратації. За повної гідратації кінцева міцність залежить від типу цементу та умов гідратації [4]. Й. Штарк показав [1], що особливий інтерес для можливості отримання високоміцного цементного каменю являє знання процесу „самообезводнення” („самовисихання”). За гідратації цементу спостерігається явище, відоме як контракція, тобто проходить хімічне усадження, причиною якого є менший питомий об'єм продуктів гідратації порівняно з об'ємом вихідних речовин (цемент+вода). Надлишкова вода фізично зв'язується у вигляді адсорбційної чи міжшарової, або залишається у вигляді капілярної води. Якщо немає надлишкової води для гідратації цементу, то порова рідина (фізично адсорбована і капілярна вода) втрачається поступово. В такий спосіб утворюється незаповнений поровий простір, і внутрішня відносна вологість в системі зменшується. Зниження внутрішньої відносної вологості призводить до виникнення у порах капілярних сил, які, своєю чергою, обумовлюють зовнішнє скорочення об'єму штучного каменю, власне усадження. Це усадження відрізняється від звичайного тим, що воно проходить за незмінних умов навколишнього середовища, тобто без вологовіддачі в довкілля.

„Самовисихання” впливає також на кінетику реакції гідратації. Продукти гідратації можуть утворюватись лише у заповнених водою порах. Оскільки незаповненого порового простору, що утворюється в результаті „самовисихання”, для продуктів гідратації більше немає, то процес гідратації сповільнюється та закінчується за нижчого ступеня гідратації порівняно з умовами, коли структура матеріалу насичена водою [1, 4]. Властивості цементного каменю значною мірою визначаються типом та розміром пор, що утворилися під час гідратації. Повністю гідратований цементний камінь має порівняно високу пористість. Наприклад, за В/Ц=0,5 об'єм пор становить близько 40–45 %. В такий спосіб майже половина об'єму цементного каменю складається з пор. Незважаючи на це, отриманий цементний камінь має таку саму непроникність, як і якісний природний камінь, з об'ємом пор, близьким до нуля, оскільки в цементному камені більша частина пор має розмір <10 нм. Завдяки силам зчеплення вода, що знаходиться в цих порах, може розглядатися як герметик [1, 3].

У процесі гідратації та тверднення портландцементу з різним В/Ц змінюється співвідношення між фазами: непрореагованим цементом, новоутвореними гідратами, водою та порами. Згідно з [3, 7, 9] за повної гідратації цементу зв'язується лише 20–25 % води від маси цементу. Для отримання необхідної легковкладальності часто кількість води замішування збільшують порівняно з необхідною для перебігу процесу гідратації. З додаванням води, залежно від умов витримування цементного каменю (нормальне чи повітряно-сухе середовище), при твердненні утворюються порожні пори або пори, що недостатньо заповнені водою. За надлишку води відбувається її випаровування з утворенням капілярних пор, які спричиняють зменшення показників міцності та

погіршення його довговічності. На початку гідратації об'єм капілярних пор дорівнює кількості води замішування. У міру перебігу процесів гідратації вони заповнюються гідратними новоутвореннями.

Порівняно із зразками штучного каменю на основі цементного тіста зразки каменю із бетону чи розчину пористіші та характеризуються нерівномірним розподілом пор за розмірами. Тому, як правило, камінь на основі цементного тіста за однакових умов є міцнішим за камінь, отриманий на основі розчинової чи бетонної суміші. Під час введення модифікаторів відбувається розрідження цементного тіста. Принцип дії розріджувачів чи пластифікаторів ґрунтується на забезпеченні тоншого диспергування частинок цементу, в результаті чого утворюється гомогенна в'язуча речовина, що має низьку в'язкість і невеликі сили тертя. Диспергування цементу досягається за рахунок зниження поверхневого натягу води [6–9].

Мета роботи – дослідити процеси структуризації та мікроструктури цементного каменю з добавками полікарбоксилатів під час тверднення в нормальних та повітряно-сухих умовах.

Методи досліджень і матеріали. У роботі під час проведення експериментальних досліджень використовували портландцемент ПЦ ІІ/Б-К-400 ВАТ "Миколаївцемент" з такими фізико-механічними показниками: питома поверхня $S_{\text{пит}}=278 \text{ м}^2/\text{кг}$, залишок на ситі №008 – 4,8 %, початок тужавіння – 4 год 20 хв, кінець тужавіння – 5 год 50 хв, границя міцності за стиску у віці 2; 28 діб відповідно 22,5 та 40,8 МПа. Як пластифікуючі добавки використовували полікарбоксилати (ПКС).

ПКС являє собою вискоєфективний суперпластифікатор, призначений для виробництва самоущільнювальних та високоміцних бетонів і розчинів. Використання полікарбоксилатів дає змогу знизити кількість води замішування до 40 % та досягнути водоцементного відношення менше за 0,30 [9].

Мікроструктуру зразків досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа JEOL JSM-6490LV*, фазовий склад вивчали на дифрактометрі ДРОН-5,0, а гранулометричний склад портландцементу та золи-виносу визначали за допомогою лазерного аналізатора зернистості LAU-14.

Результати досліджень. Експериментальні дослідження проведені на основі портландцементу ПЦ-ІІ/Б-К-400 ВАТ "Миколаївцемент", гранулометричний склад якого показано на рис. 1, а. Встановлено, що максимум на диференційній кривій розподілу частинок цементу за розмірами знаходиться в межах 50–70 мкм (фракції $\varnothing \leq 10$; $\varnothing \leq 20$ і $\varnothing \leq 60$ мкм становлять відповідно 26,02; 36,43 та 81,84 %, а вміст зерен D_{50} ; D_{90} і D_{97} дорівнює відповідно 22,48; 81,85 та 126,19 мкм). Відомо [1, 4], що наростання міцності стандартного цементу зумовлено переважно наявністю фракції з розміром зерен 3–30 мкм. Фракція з розміром < 3 мкм впливає лише на початкову міцність, а частинки з розміром зерен > 60 мкм гідратуються дуже повільно і впливають на міцність штучного каменю після 28 діб.

До складу цементу ПЦ ІІ/Б-К-400 входить 21–35 % активних мінеральних добавок (АМД), серед яких доменний гранульований шлак та зола-виносу. Високий ступінь дисперсності і відповідний хімічний склад золи-виносу роблять її одним з найбільш ефективних і зручних видів мінеральних добавок до портландцементу. Зола-виносу є дисперснішою, ніж розмелений портландцементний клінкер та відіграє роль наповнювача, заповнюючи найдрібніші порожнини цементно-піщаної матриці. Завдяки заповненню порожнин підвищується ступінь упаковки твердої речовини і відповідно міцність. Зола-виносу подана склоподібними сферичними частинками діаметром близько 100 мкм, що проявляють пуцоланічні властивості за рахунок реакційноздатних Al_2O_3 та SiO_2 . Розподіл зерен за фракціями в складі золи-виносу має специфічну характеристику, що виражається двома максимумами на диференційній кривій та широким розподілом в діапазоні від 0,1 до 400 мкм. Вміст фракцій $\varnothing \leq 10$; $\varnothing \leq 20$ і $\varnothing \leq 60$ мкм становлять відповідно 31,6; 50,5 та 77,52 %, а вміст зерен D_{50} ; D_{90} і D_{97} дорівнює відповідно 19,63; 96,09 та 140,10 мкм). Характеристика і діапазон розподілу розмірів зерен золи-виносу Бурштинської ТЕС показано на рис. 1, б.

З метою наближення до умов експлуатації цементних систем вивчення зміни маси та істинного В/Ц проводили на зразках цементного тіста $2 \times 2 \times 2$ см (Ц:П=1:0) на основі портландцементу ПЦ-ІІ/Б-К-400 в нормальних та повітряно-сухих умовах. Нормальна густина

цементного тіста (НГЦТ) без добавок становить 28 %, початковий розплив конуса (від приладу Віка) становить 87 мм. При введенні 0,25; 0,5 та 1,0 мас.% ПКС за сталого В/Ц=0,28 розплив конуса зростає відповідно до 250; 285 та 290 мм. Слід зазначити, що введення ПКС дещо відтягує терміни тужавіння. Міцність цементного каменю в нормальних умовах тверднення через 180 діб без добавок та за введення 0,25; 0,5; 1,0 мас.% ПКС становить відповідно 58,3 та 73,5; 86,0; 79,8 МПа. При твердненні в повітряно-сухих умовах міцність цементного каменю через 180 діб без добавок становить 50,3 МПа, а з додаванням 0,25; 0,5; 1,0 мас.% ПКС – відповідно 36,3; 40,8; 32,5 МПа.

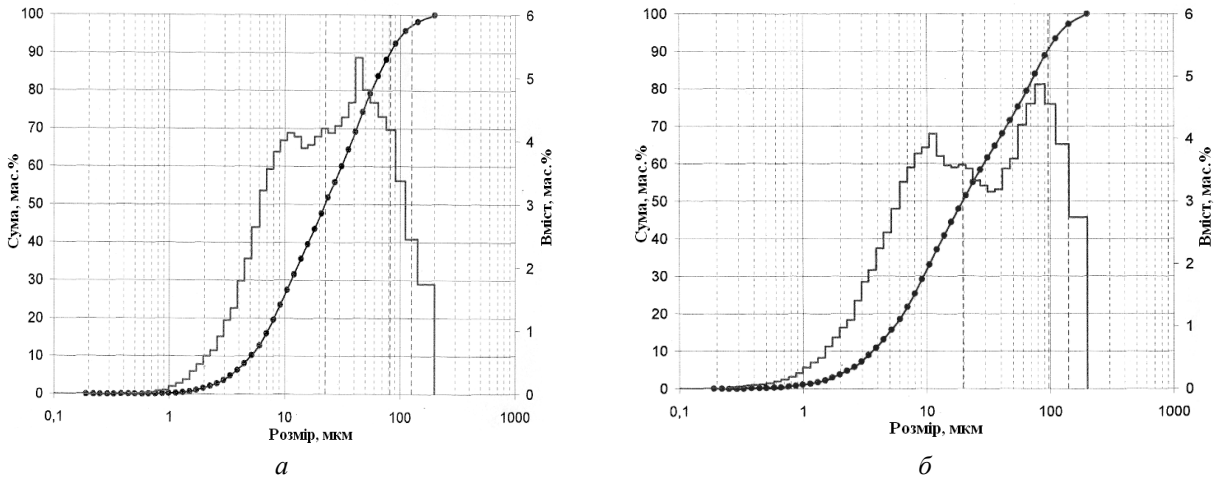


Рис. 1. Розподіл зерен за фракціями цементу ПЦ П-Б-К-400 ВАТ „Миколаївцемент” (а) та золи-виносу Бурштинської ТЕС (б)

Для вивчення процесів структуроутворення під час тверднення портландцементу в повітряно-сухих та нормальних умовах за сталого В/Ц визначали водовміст із врахуванням зміни маси зразків з часом тверднення. Кінетику зміни усереднених значень істинного В/Ц у різних умовах тверднення показано на рис. 2.

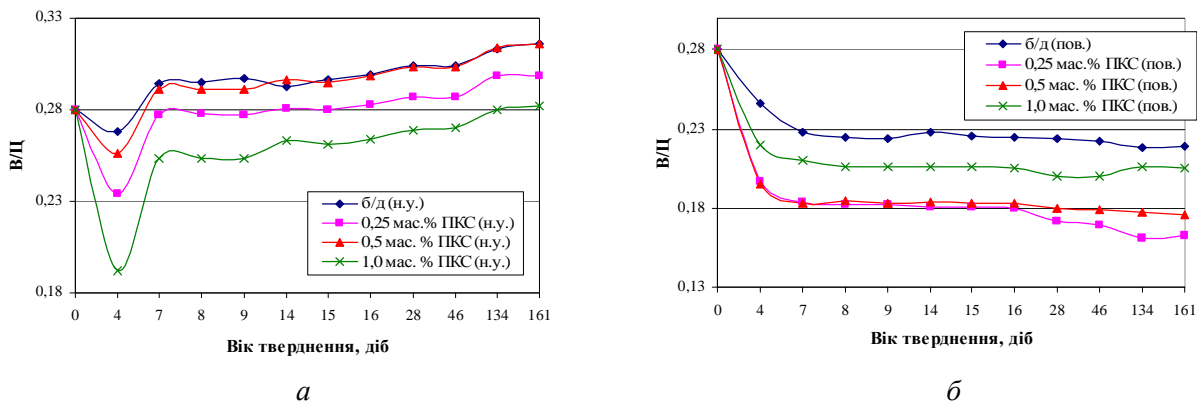


Рис. 2. Зміна В/Ц зразків портландцементного каменю з часом у нормальних (а) та повітряно-сухих (б) умовах тверднення (зразки-кубики 2x2x2 см, тісто 1:0, портландцемент ПЦ-П/Б-К-400)

Найбільшої втрати маси цементний камінь зазнає в початкові терміни тверднення, що пов'язано з випаровуванням води відразу ж після замішування цементу з водою. Кількість води, що залишилася, є недостатньою для гідратації, тому з часом спостерігається зворотний процес адсорбції води та вуглекислого газу з повітря. Встановлено (рис. 2, а), що такий період у всіх зразках в нормальних умовах настає через 4 доби, у той час, як адсорбція водяної пари та CO_2 повітря каменем у повітряно-сухих умовах з В/Ц=0,28 спостерігається у віці 7 діб. За подальшого тверднення зразків у повітряно-сухих умовах процес адсорбції вологи в камені відбувається до 28 діб тверднення, а в камені в нормальних умовах тверднення цей процес настає у віці 14 діб, що пояснюється наявністю великої кількості капілярних пор у камені, через які мігрує волога. На основі одержаних даних зміни маси зразків-кубиків 2x2x2 см розраховували значення істинного

В/Ц в цементному камені з часом тверднення. У цементному камені, який тверднув у нормальних умовах, зниження водовмісту проходить у період до 4 діб, пізніше до 28 діб спостерігається незначний приріст. За вихідного В/Ц=0,28 втрата води становить 18,4 % і проходить у період до 4 діб. Приріст водовмісту такого цементного каменю до 28 діб – 8,7 %.

Слід відзначити, що у цементному камені в повітряно-сухих умовах тверднення зниження водовмісту становить 21,4 % на 7 добу тверднення, у подальшому відбувається приріст водовмісту на 4 % (рис. 2, б). Істотне зменшення водовмісту цементного каменю відбувається під час тверднення в повітряно-сухих умовах, що становить небезпеку під час спорудження монолітних конструкцій у літній період. Значне зниження водовмісту проходить у камені з вихідним В/Ц=0,28 та максимальною кількістю добавки полікарбоксилатів (1,0 мас.% ПКС), що зумовлено наявністю великої кількості вільної незв'язаної води, яка швидко випаровується. Так, зниження водовмісту системи, що проходить у період до 7 діб, становить 31,5 %, потім до 28 діб спостерігається приріст на 4 %.

Дослідження кінетики процесів гідратації і тверднення цементів, генезису мікроструктури цементного каменю з органо-мінеральними добавками має велике значення, оскільки відкриває шлях до наукового прогнозування його властивостей. У зв'язку з цим за допомогою методів фізико-хімічного аналізу вивчені особливості гідратації цементного каменю з добавками полікарбоксилатів на основі ПЦ П/Б-К-400 під час тверднення в нормальних та повітряно-сухих умовах. Аналіз дифрактограм зразків свідчить, що тверднення в нормальних умовах (рис. 3, а) сприяє покращанню процесу гідратації, що підтверджується підвищенням інтенсивності ліній еtringіту ($d/n=0,973$; 0,561 нм) і $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=0,493$; 0,263 нм), а також зменшенням інтенсивності ліній негідратованого цементу ($d/n=0,273$; 0,277 нм) порівняно з цементом, що тверднув в повітряно-сухих умовах. Слід відзначити, що введення 0,5 мас.% полікарбоксилату сприяє прискоренню і поглибленню процесів гідратації. Інтенсивність ліній гідросульфалюмінату кальцію, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та ступінь гідратації (74 %) є найбільшими. Під час тверднення в повітряно-сухих умовах (рис. 3, б) фазовий склад продуктів гідратації цементів без добавок і з добавкою 0,5 мас.% ПКС фактично не відрізняється. Основними гідратними фазами, які фіксуються, є незначної інтенсивності лінії еtringіту і гідроксиду кальцію.

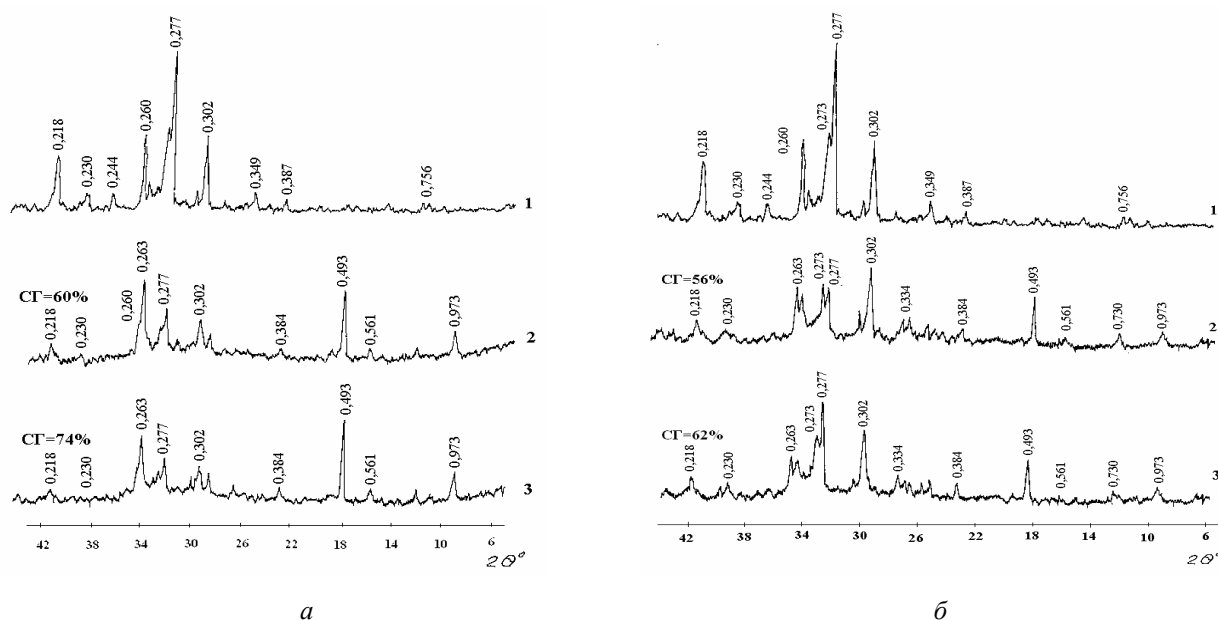


Рис. 3. Дифрактограми каменю на основі цементу ПЦ П/Б-К-400, гідратованого 180 діб у нормальних (а) та повітряно-сухих (б) умовах тверднення: 1 – негідратований; 2 – без добавок; 3 – з добавкою 0,5 мас.% полікарбоксилату

Використання методу растрової електронної мікроструктури доповнює дані про структуроутворення цементного каменю в нормальних та повітряно-сухих умовах тверднення. Формування мікроструктури і синтез міцності цементного каменю найперше визначається складом, розмірами та формою вихідних цементних зерен. Відомо [4, 5], що мікроструктура на

алітових ділянок зерен портландцементу представлена дрібнодисперсними гідросилікатами кальцію та паралельними шарами портландиту. На білих ділянках зерен цементу внаслідок ритмічності процесу гідратації виникають шари гідратних новоутворень з голчасто-луско-подібною поверхнею.

Руйнування цементного каменю під дією зовнішніх механічних сил починається з утворення закритих мікроскопічних тріщин в кристалоагрегатах та між ними. Кількість цих тріщин і їх розміри зростають з підвищенням навантаження. При об'єднанні тріщин відбувається остаточне руйнування каменю на межі контакту зростання кристалів в блоки, пошарово та в блоках цементного гелю [1].

Згідно з [4, 5] мікроструктура з дрібнодисперсними гідросилікатами в цементному камені позитивно впливає на його міцність; наявність крупнокристалічних блоків портландиту, гідроалюмоферитів, гідросульфоалюмоферитів кальцію в мікроструктурі негативно впливає на міцність каменю. Для підвищення міцності цементного каменю необхідно зменшити кількість та розміри в його мікроструктурі крупнокристалічних блоків портландиту, гідроалюмоферитів, гідросульфоалюмоферитів кальцію та одночасно збільшити кількість дрібнодисперсної складової, що досягається зниженням водоцементного відношення і компактнішим розміщенням вихідних цементуючих зерен в системі „цемент-вода” за рахунок використання модифікаторів.

Для досліджуваного зразка на основі ПЦ П/Б-К-400 без добавок під час тверднення у нормальних умовах (рис. 4, а) характерна наявність незначної кількості пор. Відомо, що пори бувають відкриті і замкнуті. Пори першого виду початково утворені між цементними зернами, які знаходяться в обмеженому геометричному об'ємі. У нормальних умовах тверднення вони заповнені водою і в них відбувається ріст гідратних новоутворень, насамперед сплутановолокнистих кристалів гідросилікатів кальцію (рис. 4, б). Для інших пор (рис. 4, в) характерна наявність великої кількості гексагональних призматичних кристалів і їх друз. Грані цих кристалів не є чіткими, що свідчить про їх ріст з розчину.

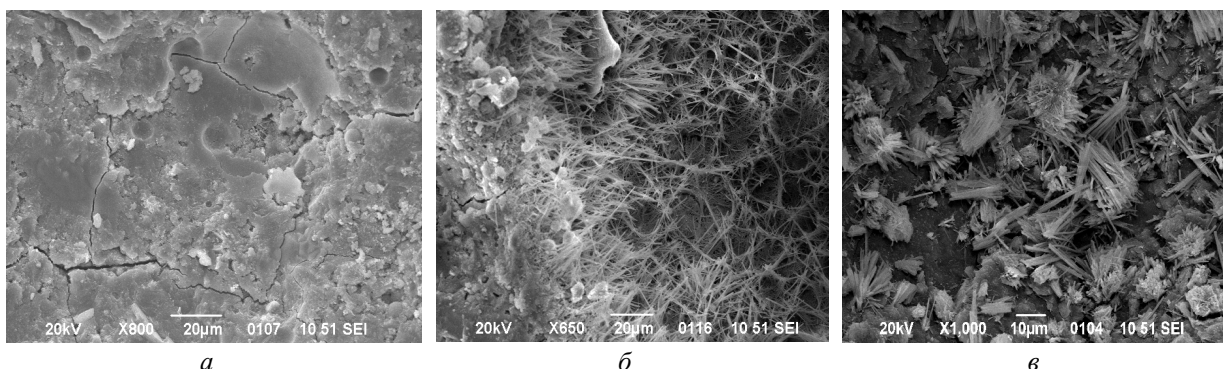


Рис. 4. Мікроструктура каменю на основі ПЦ П/Б-К-400 без добавок (а, б, в) під час тверднення 180 діб у нормальних умовах

Для каменю на основі цементу ПЦ П/Б-К-400 з добавкою 0,5 мас.% ПКС під час тверднення у нормальних умовах характерна доволі щільна мікроструктура з великою кількістю пор, що або вже заросли гідратними новоутвореннями, або знаходяться в стадії заростання (рис. 5, а). Важливою є наявність паралельно орієнтованих призматичних, пластинчастих і волокнистих кристалів, що мають досконалу спайність у напрямку їх росту. Розмір кристалів, що становлять блоки, може сягати до 10 мкм. Розколювання їх відбувається по-різному: вздовж пластин спайності і впоперек.

Слід відзначити, що з часом тверднення відбувається поступове зростання цих кристалів в полісинтетичні двійники, по-різному орієнтовані в об'ємі каменю. Подібно відбувається ритмічна пошарова кристалізація новоутворень на кожному зерні в'язучого (рис. 5, б). Для мікроструктури досліджуваного цементного каменю характерна наявність пор, що вже майже повністю заросли волокнистими кристалами гідросилікатів кальцію, а також короткими призматичними гексагональними кристалами $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 5, в).

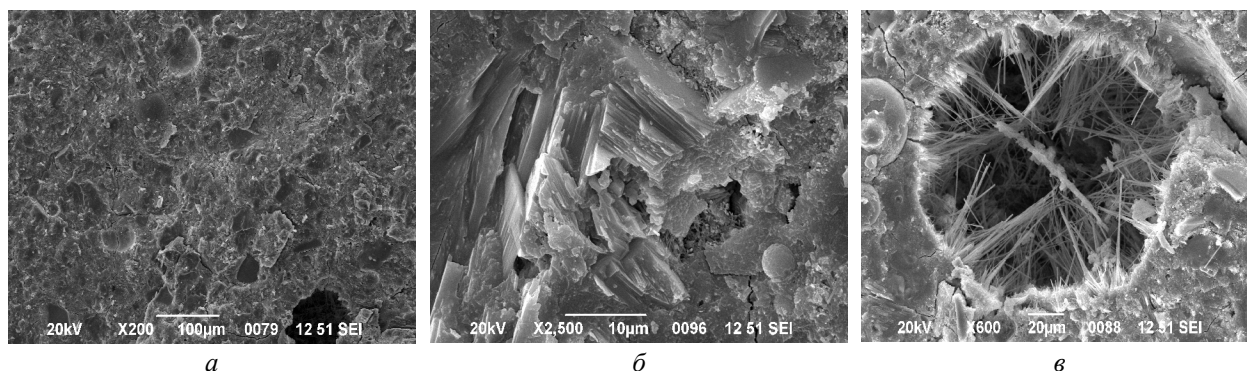


Рис. 5. Мікроструктура каменю на основі ПЦ П/Б-К-400 з 0,5 мас.% полікарбоксилату (а, б, в) під час тверднення 180 діб у нормальних умовах

Для досліджуваного зразка на основі ПЦ П/Б-К-400 без добавок, що тверднув у повітряно-сухих умовах (рис. б, а), характерна наявність великої кількості пор. Окрім того, наявною є велика кількість дрібнодисперсних аморфних гідросилікатних фаз (рис. б, б), які огортають цементні зерна. Під час тверднення в повітряно-сухих умовах у деяких місцях спостерігається незначна кількість гексагональних пластинок гідроксиду кальцію (рис. б, в).

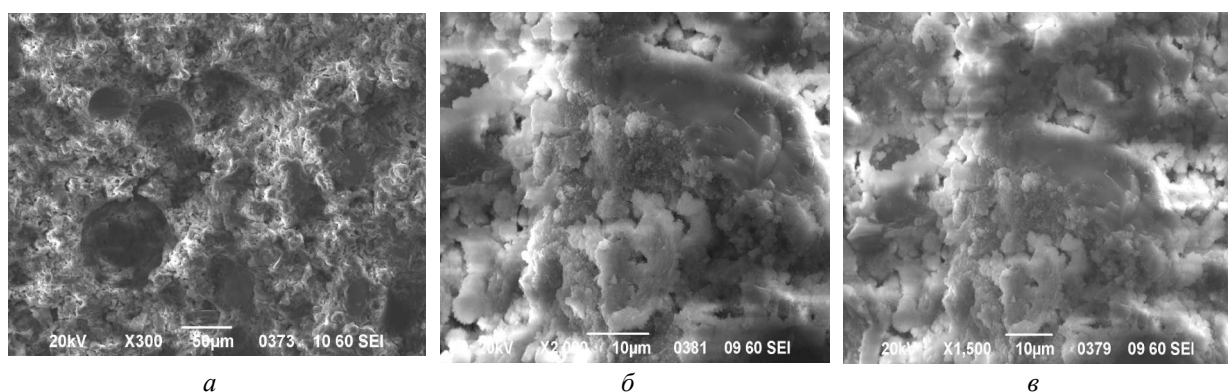


Рис. 6. Мікроструктура каменю на основі ПЦ П/Б-К-400 без добавок (а, б, в) під час тверднення 180 діб у повітряно-сухих умовах

Ведення полікарбоксилату в кількості 0,5 мас.% сприяє деякому ущільненню структури, однак пористість при цьому є ще значною (рис. 7, а). В деяких місцях зразка з добавкою ПКС спостерігаються добре сформовані агрегати гексагональних пластинок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 7, б). У повітряно-сухих умовах в структурі досліджуваного зразка з полікарбоксилатом спостерігається заростання пор голчастими кристалами гідросилікатів кальцію та довгими призматичними кристалами еtringіту (рис. 7, в).

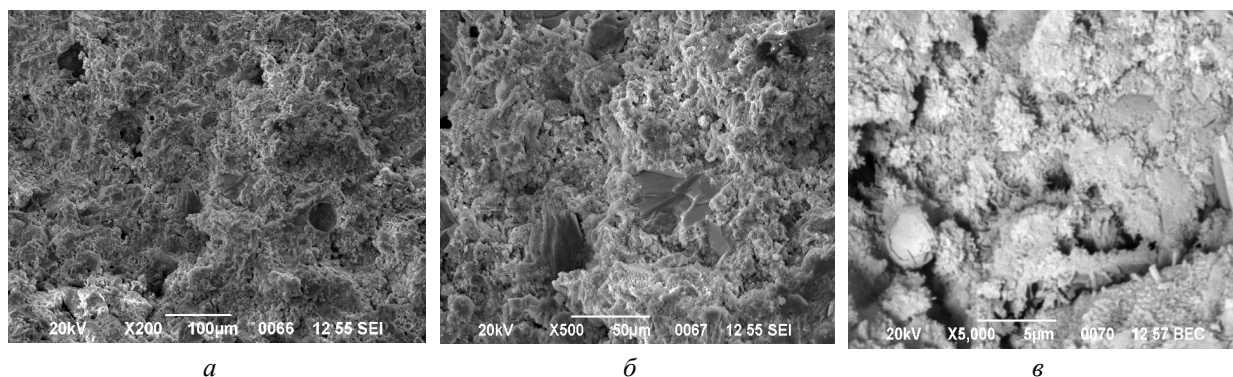


Рис. 7. Мікроструктура каменю на основі ПЦ П/Б-К-400 з добавкою 0,5 мас.% полікарбоксилату (а, б, в) під час тверднення 180 діб у повітряно-сухих умовах

Висновок. Чинник рухливості, що є однією з найважливіших характеристик цементного тіста, значною мірою визначає будівельно-технічні властивості штучного каменю. Дослідженнями впливу зміни водовмісту, фазового складу та мікроструктури цементного каменю на основі високорухливих модифікованих цементних систем встановлено, що введення полікарбосилату забезпечує оптимальне формування структури цементного каменю в нормальних умовах та в кінцевому результаті призводить до зростання його міцності. У той самий час під час тверднення в повітряно-сухих умовах для штучного каменю, модифікованого добавками полікарбосилатів, більшою мірою спостерігається явище „самообезводнення”, що може істотно впливати на властивості високоякісного бетону, отриманого на основі високорухливих бетонних сумішей. Внаслідок цього процесу сповільнюється кінетика реакції гідратації алітової фази та зростання усадкових деформацій бетону.

Мікроструктура цементного каменю значною мірою визначає його міцність; наявність крупнокристалічних блоків портландиту, а також голчастих кристалів гідросульфатоалюмоферитів кальцію (вторинного етрингіту) негативно впливає на міцність каменю. Для підвищення міцності цементного каменю доцільно зменшити кількість та розміри крупнокристалічних блоків портландиту та AF_7 -фаз, що досягається зниженням водоцементного відношення і компактнішим розміщенням вихідних зерен у цементуючій системі з модифікаторами гіперпластифікуючої дії. Руйнування цементного каменю під дією зовнішніх механічних сил починається з утворення закритих мікроскопічних тріщин в кристалоагрегатах і на межі контакту зростання кристалів в блоки, пошарово та в блоках цементного гелю.

* Дослідження мікроструктури цементного каменю проведено за допомогою растрового електронного мікроскопа JEOL JSM-6490LV спільно з к. ф.-м. н. Тиньковим В.О. в рамках договору між київським представництвом компанії “TOKYO BOEKI CIS LTD” та Національним університетом “Львівська політехніка”.

1. Штарк Й., Вихт Б. Цемент и известь / Пер. с нем. А. Тулаганова; Под ред. П. Кривенко. – К., 2008. – 480 с. 2. Гоц В.І. Бетони і будівельні розчини. – К.: ТОВ УВПК, 2003. – 472 с. 3. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с. 4. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Под ред. Л.Г. Шпыновой. – Львов: Вища шк., 1981. – 160 с. 5. Электронная стереомикроскопия цементного камня автоклавного твердения / Под. ред. Л.Г. Шпыновой. – Львов: Вища шк., 1978. – 123 с. 6. Високофункціональні бетони на снові модифікаторів нової генерації / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, І.І. Кіракевич, Б.Г. Русин // Вісник Національного університету „Львівська політехніка” „Теорія і практика будівництва”. – 2008. – №627. – С. 191–197. 7. 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. 8. Модифікатори нової генерації для бетонів / Саницький М.А., Позняк О.Р., Маруцак У.Д. та ін. // Будівельні матеріали та виробу. – 2006. – №1. – С. 5–7. 9. Paschmann H. Self compacting concrete – practical advice // Concrete Plant + Precast Technology. – 1999. – № 11. – P. 34–42.