

Представлені результати визначення корозійної стійкості за різними методиками високоміцних бетонів, модифікованих комплексною активною мінеральною добавкою з метакаоліну та золи виносу. Перша методика передбачає порівняння зміни міцності у часі бетонів після їх витримування в агресивних середовищах. Друга методика передбачає порівняння зміни міцності у часі бетонів, у яких з поверхні зразків видаляються продукти корозії. Показано, що видалення продуктів корозії прискорює процес руйнування бетону і дозволяє більш реалістично прогнозувати його довговічність

Ключові слова: бетон, цемент, корозія, видалення продуктів корозії, новоутворення, метакаолін, розчин сульфатної кислоти, зола виносу

В работе представлены результаты определения коррозионной стойкости по разным методикам высокопрочных бетонов, модифицированных комплексной активной минеральной добавкой из метакаолина и золы уноса. Первая методика предполагает сравнение изменения прочности во времени бетонов после их выдержки в агрессивной среде. Вторая методика предполагает сравнение изменения прочности бетонов во времени, с поверхности образцов которых удаляются продукты коррозии. Показано, что удаление продуктов коррозии ускоряет процесс разрушения бетонов и позволяет более реалистично прогнозировать его долговечность

Ключевые слова: бетон, цемент, коррозия, удаление продуктов коррозии, новообразования, метакаолин, сульфатная кислота, зола уноса

УДК 666.97(075.8)
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.64113

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОРОЗІЇ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ У СУЛЬФАТНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

А. С. Приймаченко
Аспірант*

E-mail: artem.pryymachenko@gmail.com

Л. О. Шейніч

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: schein@ndibk.gov.ua

*Відділ технології виробництва залізобетонних конструкцій

Державне підприємство

«Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

Мінрегіон України

вул. Преображенська, 5/2,

м. Київ, Україна, 03037

1. Вступ

Зараз у виробництві залізобетонних конструкцій мають перевагу бетони з комплексом високих спеціальних фізико-механічних показників. Такі бетони мають перевагу перед іншими, оскільки можуть бути застосовані в конструкціях, що експлуатуються в складних умовах, коли діє декілька руйнуючих чинників – не тільки навантаження, але й агресивне середовище. Для підвищення стійкості до агресивного середовища бетонів необхідно, щоб вони були стійкими до хімічної дії агресивних агентів.

Зараз основним методом дослідження стійкості бетону в агресивних середовищах є порівняння міцності бетону, що тверднув в агресивному середовищі, з міцністю бетону, що тверднув в неагресивному середовищі [1, 2].

Такий підхід до випробувань в багатьох випадках є достатньо ефективним, але ця методика не дозволяє проаналізувати вплив продуктів корозії бетону на міцність його цементної матриці. Такі дані можуть бути отримані у випадку видалення продуктів корозії з цементної матриці бетону [3].

Актуальність роботи складається у вивченні стійкості бетонів у агресивному середовищі при видаленні продуктів корозії, що дозволяє більш достовірно визначати довговічність роботи бетонів в агресивному середовищі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Введення активних мінеральних добавок до складу бетону дозволяє економити портландцемент та отримувати спеціальні бетони, що мають незначне тепловиділення і можуть бути застосовані для масивних конструкцій, спеціальних корозійно- та жаростійких бетонів тощо. Крім того, такі активні мінеральні добавки широко використовуються при отриманні багатофункціональних бетонів, високоміцних та самоущільнюючих. Вони також входять до складу ремонтних композицій, сухих будівельних сумішей тощо. Насьогодні проведено багато робіт українськими та закордонними вченими, які показали доцільність введення до складу бетону мінеральних наповнювачів, таких як зола виносу [4–8], мікрокремнезем [4, 9, 10], метакаолін [11–15]. В той же час сумісна дія цих добавок та пріоритетність їх вибору в складі комплексних активних мінеральних добавок (КАМД) багато в чому визначають ефективність виробництва і застосування матеріалів і тому вирішення цих питань потребує додаткових досліджень.

Тому в [1] були викладені результати досліджень щодо впливу суміші активних мінеральних добавок на властивості бетонів. Так, в роботі [1] отримані високоефективні корозійностійкі бетони з високими фізико-механічними показниками. Такі бетони мають міцність на стиск до 60 МПа, водонепроникність до

W10, морозостійкість F200. Такі високі показники пояснюються вмістом в бетоні комплексної активної мінеральної добавки (КАМД), що складається з суміші кислоти золи виносу та метакаоліну, введених в оптимальному співвідношенні. Через 1 рік витримування в розчині сульфатної кислот із рН 3,5, бетони підвищили свою міцність на 20–30 % по відношенню до міцності бетону, що твердів у воді.

Вибір хімічної складової агресивного середовища був обумовлений як бажанням дослідити вплив тільки $(SO_4)^{2-}$ «у чистому вигляді» на стійкість цементного каменя і бетону на його основі, так і тим, що така корозія при експлуатації залізобетонних конструкцій зустрічається досить часто, наприклад, це стосується труб для каналізаційних мереж, лотків, труб для водовідведення, фундаментів у кислих ґрунтах, димарів тощо. При дослідженні корозійної стійкості бетону в сульфатній кислоті не буде здійснювати свій негативний вплив катіони типу – Na^+ , K^+ , Mg^{2+} тощо, що присутні при корозійному впливі розчинів сірчанних солей.

На сьогоднішній основним методом дослідження стійкості бетону в агресивних середовищах є порівняння міцності бетону, що тверднув в агресивному середовищі з міцністю бетону, що тверднув в неагресивному середовищі [1, 2]. Згідно цієї методики тривалість випробувань складає досить тривалий час – від 0,5 року до року залежно від середовища, в якому буде експлуатуватися конструкція та мети, яку ставлять дослідники.

Такий підхід до випробувань в багатьох випадках є достатньо ефективним, але ця методика не дозволяє проаналізувати вплив продуктів корозії бетону на міцність його цементної матриці. Такі дані можуть бути отримані у випадку видалення продуктів корозії з цементної матриці бетону. В роботі [3] були проведені подібні дослідження, коли продукти корозії видалялися з поверхні бетону, що піддавався дії агресивного середовища, спеціальними щіточками. Така методика показала свою ефективність і можливість отримання для аналізу нових даних. Видалення продуктів корозії прискорює процеси руйнування бетону, що негативно відбивається на довговічності бетонних конструкцій, що експлуатуються. Тому, для подальших досліджень корозійної стійкості бетону в агресивному середовищі були використані 2 вищенаведені методики.

3. Ціль та задачі досліджень

Проведені дослідження ставили за мету моделювання процесу корозійної стійкості у випадку видалення з поверхні бетонної конструкції продуктів взаємодії бетону з розчином сульфатної кислоти з наступним аналізом фазового складу цементної матриці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити корозійну стійкість бетонів в розчині сульфатної кислоти з рН3,5 в умовах видалення продуктів корозії з поверхні зразка;
- встановити особливості формування мікроструктури в'язучої речовини бетону з КАМД в умовах дії розчину сульфатної кислоти.

4. Матеріали та методи досліджень

4.1 Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувалось в експерименті

- Як сировину використовували такі матеріали:
- Портландцемент ПЦІІ/А-Ш-400 (СЕМ ІІ/В-С) виробництва Волинь-цемент в Україні.
 - Дніпровський кварцовий пісок, його зерновий склад наведений в табл. 1.
 - Кварцовий пісок Воскресенського родовища, його гранулометричний склад наведений в табл. 2.

Таблиця 1

Гранулометричний склад Дніпровського кварцового піску

Розміри отворів сит, мм	Повні залишки на ситі, %
2,5	–
1,25	0,5
0,63	3,2
0,315	30,5
0,14	93,0
пройшло через 0,14	0,15
Мкр	1,27

Таблиця 2

Гранулометричний склад кварцового піску Воскресенського родовища

Розміри отворів сит, мм	Повні залишки на ситі, %
2,5	1,31
1,25	2,02
0,63	35,65
0,315	78,48
0,14	91,65
пройшло через 0,14	8,35
Мкр	2,09

- Гранітний щебінь фр.5–10 та 10–20мм, виробництва ТОВ “Юнігран”, м. Малин, Україна.
- Зола виносу Ладижинської ТЕС.
- Метакаолін (Centrilit NC) та суперпластифікатор PCE FK 63.30, виробництва МЦ Баухемі. Хімічні склади наведені в табл. 3.
- Питну воду.

Таблиця 3

Хімічний склад мінеральних добавок, % мас.

Назва матеріалу	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	R ₂ O	SO ₃	H ₂ O	ВВП
Метакаолін (Centrilit NC)	52–56	0,01–0,04	0,2–0,41	0,41–0,72	–	41,3–44,6	0,45–0,81	0,035–0,05	–	1,21–1,60
Зола виносу	53–59	2,8–4,5	2,0–3,0	9–14	–	22–26	1,5–2,1	0,5–0,62	–	1,5–2,1

Технічну сульфатну кислоту для утворення розчинів з рН 3,5.

На рис. 1 наведені рентгенограми вихідних матеріалів.

На рентгенограмі вихідного портландцементу (рис. 1, кр. 1) наявність певних дифракційних відображень свідчить про присутність основних фаз портландцементного клінкеру, а саме: C_3S ($d=0,387; 0,6278; 0,2602; 0,232; 0,208; 0,194; 0,1926; 0,177$ нм); $\beta-C_2S$ ($d=0,304; 0,278; 0,275; 0,271; 0,261; 0,228; 0,192$ нм), C_3A ($d=0,27; 0,228; 0,193$).

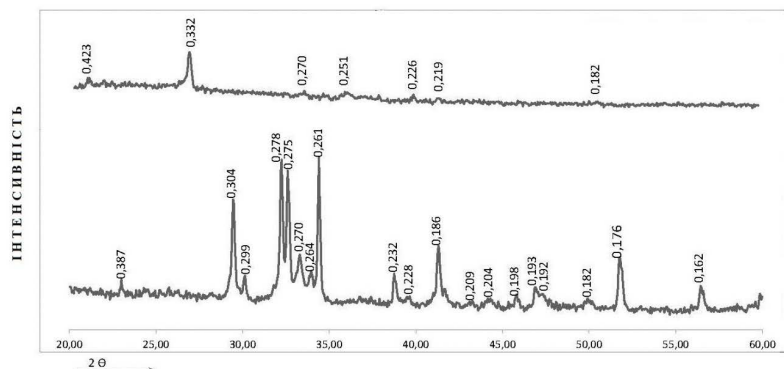


Рис. 1. Рентгенограми вихідних компонентів: 1 – портландцемент ПЦII/A-Ш-400; 2 – метаколін (торгова марка Centrilit NC)

Метаколін, що утворюється після випалювання каоліну при $T=800$ °С, (рис. 1, кр. 2) представлений рентгеноаморфною алюмосилікатною фазою, що містить незначну кількість кварцових кристалічних включень ($d=0,332$ нм).

Зола-вінесення Ладжиженської ТЕС (рис. 2) представлена переважно аморфною алюмосилікатною речовиною, що містить незначну кількість $\beta-SiO_2$ ($d=0,424; 0,334; 0,228; 0,181$ нм) та силіманіту $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ($d=0,43; 0,332; 0,251; 0,227; 0,218; 0,182$ нм).

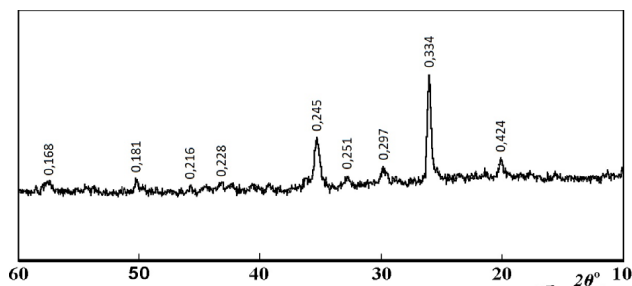


Рис. 2. Рентгенограма золи-вінесення Ладжиженської ТЕС

При дослідженні корозійної стійкості бетонів використовували бетони, склади яких наведені в табл. 4.

Склади бетонів на 1 м^3

№ п/п	Цемент, кг	Вода, дм^3	Зола, кг	Centrilit NC, кг	PCE FK 63.30, %	Пісок Днепр., кг	Пісок Вознесенський, кг	Щебінь, кг, фр.	
								5/10	10/20
Контрольний склад бетону	400	160	0	0	0,90	269	358	269	896
Оптимальний склад бетону з добавкою	270	132	80	26	2,2	286	358	282	941

Сировинні матеріали, що були використані в дослідженнях, відповідають відповідним нормативним вимогам.

4. 2. Методика визначення показників властивостей зразків

Міцність на стиск бетону визначали на зразках-кубах розміром $100 \times 100 \times 100$ мм.

Визначення корозійної стійкості бетону визначали згідно [1–3].

Рентгенофазовий аналіз проводили методом іонізаційної реєстрації інтенсивностей рентгеновського випромінювання на установці ДРОН-3 з лічильником кута повороту від $2\theta=10^\circ$ до $2\theta=60^\circ$. Рентгенограми розшифровували шляхом їх порівняння з природними і штучними мінералами, описаними в літературі [16–19].

Дифференційно-термічний аналіз проводили на дериватографі системи [20] при швидкості нагрівання 10 °С. Ідентифікацію новоутворень проводили шляхом порівняння з відомими в літературі мінералами або штучними новоутвореннями [16–19].

Електронно-мікроскопічні дослідження проводили на скануючому електронному мікроскопі ISM 6060 LA за методикою [17]. Розшифрування мікроскопічних знімків здійснювали шляхом порівняння їх з відомими в літературі [16, 17].

5. Результати досліджень показників властивостей бетонних зразків

Результати визначення корозійної стійкості бетонів наведені в табл. 5.

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що методика [3] дозволяє дослідити вплив продуктів корозії та їх кількості на швидкість процесу корозії. Видалення цих продуктів прискорює процес корозії. Так, без зачищення поверхні спостерігається ріст міцності бетону як контрольного складу, так і оптимального через 1 рік твердіння в сульфатній кислоті. В той же час при зачищенні поверхні бетону спостерігається падіння міцності бетону контрольного складу (без комплексної активної мінеральної добавки), в той час бетон оптимального складу з КАМД продовжує набирати міцність у часі.

Таблиця 4

Аналіз даних рентгенофазового та диференціально-термічного аналізів гідратованого портландцементу показує, що після 28 діб твердіння у воді (рис. 3, кр.2) поряд з реліктовими дифракційними максимумами, які відносяться до безводних мінералів клінкеру, присутні дифракційні відобра-

ження портландиту ($d=0,262; 0,193$ нм) та низькоосновних гідросилікатів кальцію CSH(B) ($d=0,304; 0,199; 0,182; 0,170$ нм).

Таблиця 5

Результати випробувань бетону з зачищеними та незачищеними поверхнями

№ п/п	Міцність бетону, МПа, після тверднення				
	28 діб	в сульфатній кислоті 1 рік			
		поверхня зразка бетону			
		незачищена		зачищена	
фактична	відносна зміна міцності по відношенню до міцності на 28 добу, %	фактична	відносна зміна міцності по відношенню до міцності на 28 добу		
1	62,7	78,6	+25,4	79,3	+26,5
Контр.	51,9	66,3	+27,7	50,54	-2,6

Аналіз даних диференціально-термічного аналізу (рис. 4) проказує, що криві ДТА для композицій на основі портландцементу та портландцементу з добавкою 15 % КАМД, що тверділи 28 діб у воді, майже однакові. Це свідчить про подібність продуктів гідратації в обох випадках. Але в разі використання КАМД продукти гідратації є більш закристалізованими, що підтверджується зменшенням ендоефектів на 10–20 °С на кривих ДТА. Це може бути пов'язано з тим, що композиції на основі портландцементу з 15 % КАМД, вміщують також певну кількість рентгеноаморфних гідроалюмосилікатів.

Утворення останніх підтверджується також даними термогравіметричного аналізу. Кількість хімічно зв'язаної води для портландцементних композицій на 28 добу становить 15 %, а для композицій, що містять комплексну добавку – 18 %.

Після тверднення зразків протягом 0,5 року в воді та розчині сульфатної кислоти були проведені аналогічні дослідження.

На рис. 5 наведені рентгенограми зразків цементного каменю з КАМД та без добавки, що тверділи в розчині сульфатної кислоти протягом 0,5 року.

Аналізуючи дані, наведені на рис. 5, і порівнюючи їх з даними, що наведені на рис. 3, можна прийти до висновку, що рентгенограми цементного каменю з і без КАМД, що тверднули в воді і розчині сульфатної кислоти, близькі.

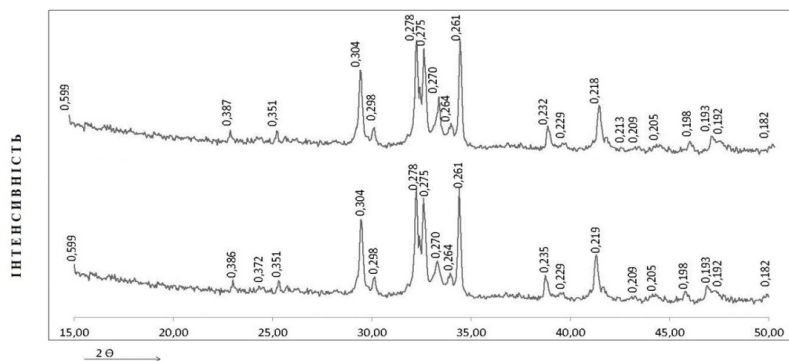


Рис. 3. Рентгенограми зразків, отримані на основі: портландцементу з КАМД (1) та портландцементу без добавок (2), що тверділи 28 діб у воді

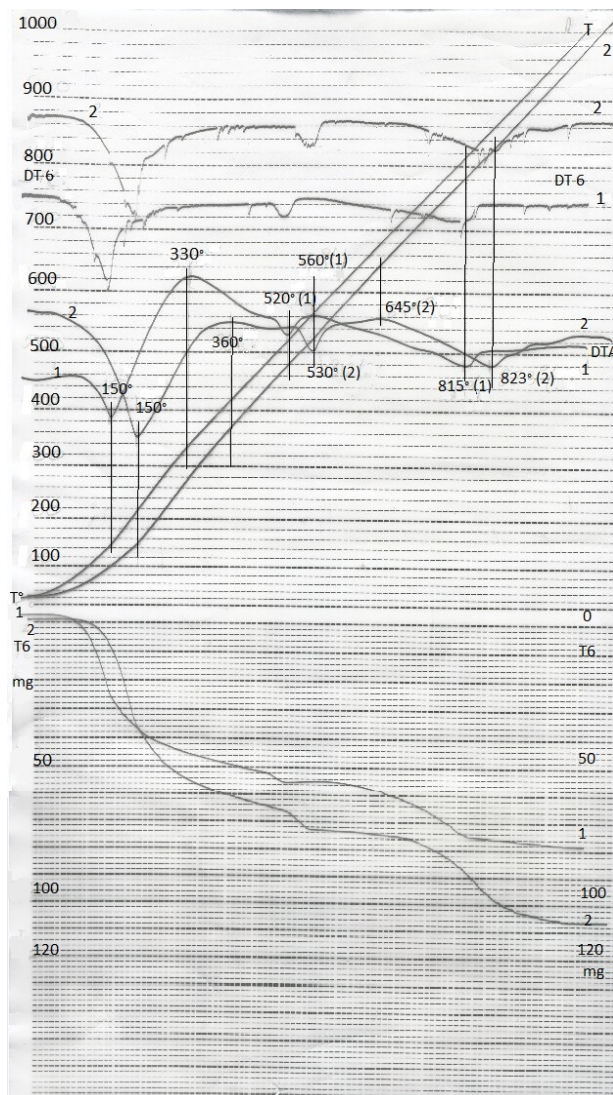


Рис. 4. Дифрактограми композицій на основі портландцементу (1) та портландцементу з добавкою 15 % КАМД (2), що тверділи 28 діб у воді

В той же час інтенсивність піків на рентгенограмах порівнювальних складів зі збільшенням часу дослідження від 28 діб до 0,5 року значно зростає. Це свідчить про збільшення кількості і кристалізацію продуктів гідратації. Особливо це стосується рентгенограми цементного каменю з КАМД по відношенню до рентгенограми цементного каменю без КАМД у віці 0,5 року. Можна з певністю констатувати, що процеси гідратації портландцементу з КАМД протікають більш інтенсивно, ніж аналогічні процеси при твердінні цементу без добавки КАМД. В такому випадку це повинно призводити до утворення значної кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію CSH(B) ($d=0,307; 0,280; 0,182$ нм), що, згідно [15, 17], характеризуються більшою стійкістю в агресивних середовищах, ніж високоосновні.

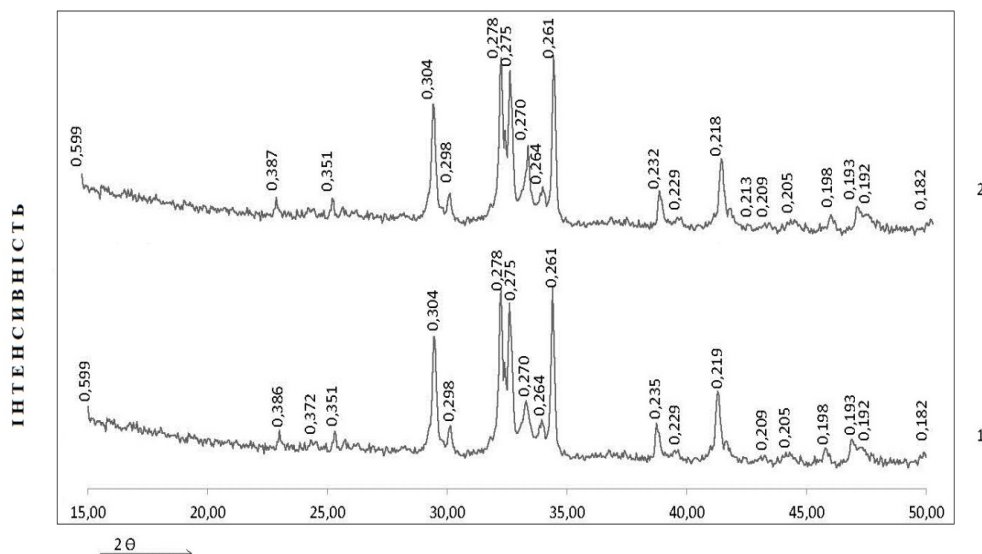


Рис. 5. Рентгенограми зразків, отримані на основі: портландцементу з КАМД (1) та портландцементу без добавок (2), що тверділи 180 діб у розчині сульфатної кислоти

Порівняння рентгенограм дозволяє відмітити можливість утворення у складі продуктів гідратації цементу з добавкою КАМД певної кількості гідро алюмосилікатів, що представлені твердими розчинами $C_2ASH-CAS_2H$, а саме можливо утворення: $2CaOAl_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ ($d=0,279; 0,236; 0,208; 0,181$ нм); $CaOAl_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ ($d=0,592; 0,378; 0,301; 0,295; 0,275; 0,271; 0,262$ нм); $CaOAl_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ($d=0,365; 0,272; 0,263; 0,261; 0,231; 0,227; 0,218; 0,196$ нм).

На рис. 6 наведені дані диференціально-термічного аналізу зразків цементного каменю з КАМД та без цієї добавки, що тверділи в розчині сульфатної кислоти протягом 0,5 року. Аналізуючи дані, наведені на рис. 6, і порівнюючи їх з даними, що наведені на рис. 4, можна прийти до висновку, що криві ДТА зразків цементного каменю незалежно від його складу, що тверділи у воді і в розчині сульфатної кислоти – близькі і корелюють з даними рентгенофазового аналізу. Введення комплексної добавки до складу портландцементу сприяє інтенсифікації процесу гідратації та утворенню більшої кількості гідросилікатних та гідроалюмосилікатних фаз, внаслідок чого за даними термогравіметричного аналізу кількість хімічно зв'язаної води досягає 28 %, в той час як при гідратації контрольного складу портландцементу кількість хімічно зв'язаної води не перевищує 20 % (рис. 6, кр. 1, 2).

Слід звернути увагу на те, що на кривій ДТА цементного каменю з КАМД, після твердіння зразків 0,5 року в розчині сульфатної кислоти, існує значно більший екзотермічний пік в температурному інтервалі 940–980 °C ніж на кривій для аналогічної суміші, але в віці 28 діб. Такий екзопік відсутній на кривих ДТА без КАМД. Наявність такого екзоэффекту, згідно [11], характерно для низькоосновних гідросилікатів кальцію, які відрізняються більшою стійкістю в агресивних середовищах ніж більш високоосновні.

Дані рентгенофазового та диференціально-термічного аналізів підтверджуються даними електронної растрової мікроскопії (рис. 7, 8).

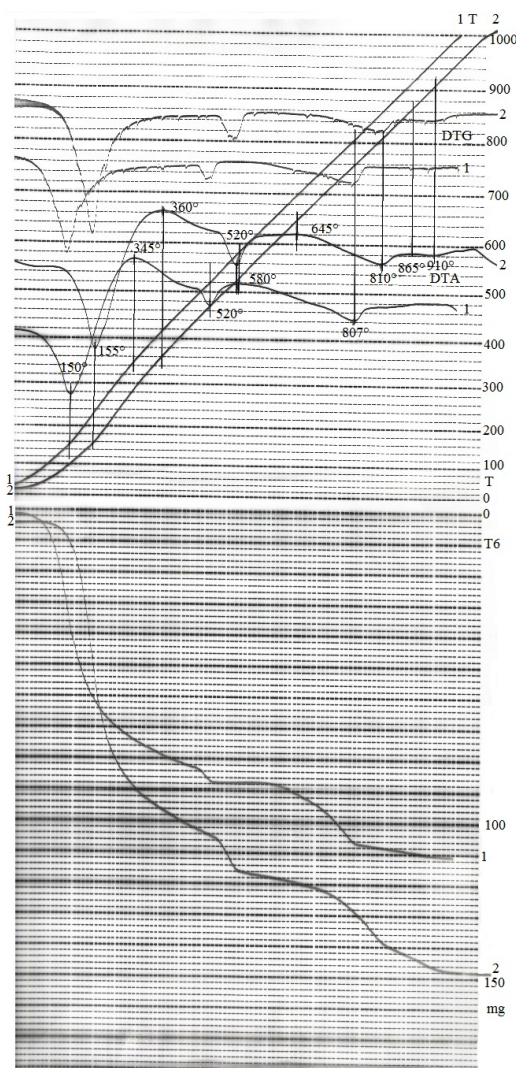


Рис. 6. Дифрактограми зразків гідратованого портландцементу (1) та портландцементу з добавкою 15 % КАМД (2), що тверділи 0,5 року у розчині сульфатної кислоти

На рис. 7 наведені фотографії поверхні сколу каменя, отриманого на основі портландцементу, що 0,5 року перебував в розчині сульфатної кислоти. На рис. 7 можна побачити глибокі тріщини, що, мабуть, утворилися в результаті вимивання легкорозчинних речовин типу портландиту. Такий процес повинен супроводжуватися зниженням корозійної стійкості таких композицій.

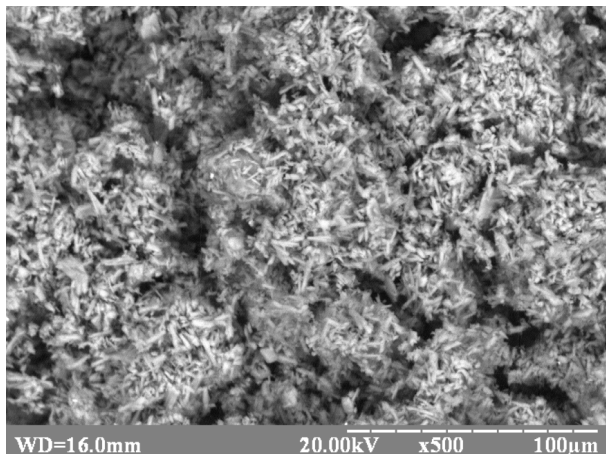


Рис. 7. Фотографії поверхні сколу каменя на основі портландцементу, що 180 діб твердів у розчині сульфатної кислоти

На рис. 8 наведені фотографії, зроблені за допомогою растрового мікроскопу, з поверхні сколу каменя, отриманого на основі портландцементу з добавкою КАМД (зразки тверділи 0,5 року в розчині сульфатної кислоти).

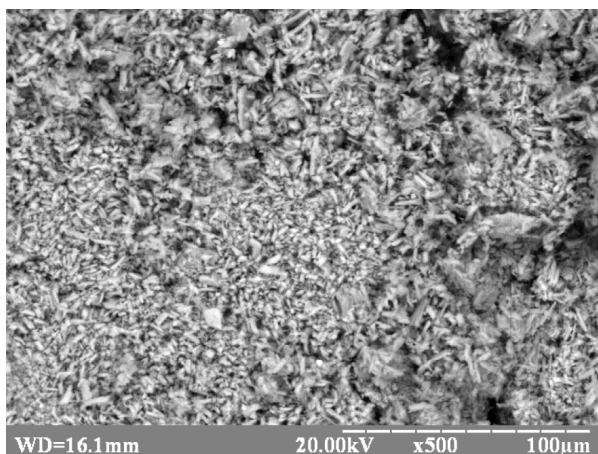


Рис. 8. Фотографія поверхні сколу каменя на основі портландцементу з модифікуючою мінеральною добавкою (КАМД), після 180 діб перебування у розчині сульфатної кислоти

Структура такого каменя є досить щільною, однорідною, представлена дрібнокристалічними фазами, які за своєю морфологією можна віднести до гідросилікатної фази та твердих розчинів гідроалюмосилікатного складу. На поверхні зразка майже відсутні пори, що свідчить про майже повне зв'язування портландиту у нерозчинні сполуки та про відсутність процесу вимивання легкорозчинних речовин, внаслідок чого та-

кий цементний камінь повинен мати значну корозійну стійкість.

6. Обговорення результатів дослідження впливу КАМД на корозійну стійкість бетонів

В результаті проведених фізико-механічних випробувань бетонів встановлено, що бетони з КАМД після зачищення поверхні мають більшу міцність ніж бетони без КАМД. Це може свідчити про те, що в випадку застосування суміші активних добавок утворюється міцний цементний каркас без вільного портландиту з малорозчинними сполуками. В той час, контрольний склад бетону містить значну кількість водорозчинних сполук та продуктів корозії, і тому цементна матриця має меншу міцність і більш піддається впливу сульфатної кислоти.

Ці дані підтверджуються результатами фізико-хімічних досліджень. Так, комплексом фізико-хімічних досліджень процесів структуроутворення цементного каменя з КАМД та без неї встановлено, що для композицій з КАМД характерно утворення щільної структури зі значною кількістю низькоосновних гідросилікатів та твердих розчинів гідроалюмосилікатного складу (гідрогеленіту – гідроанортиту), в протилежність композиціям без КАМД, для яких характерно вимивання в агресивному середовищі (розчині сульфатної кислоти) розчинних сполук типу портландиту і формування більш високоосновних гідросилікатів кальцію. Такі особливості структуроутворення цементного каменя з КАМД обумовлюють більш високу його корозійну стійкість порівняно зі стійкістю цементного каменя без КАМД.

7. Висновки

1. Визначення корозійної стійкості бетонів шляхом зачищення поверхні бетонних зразків від продуктів корозії бетону з наступним їх випробуванням дозволило отримати нові результати порівняно з відомими методами, згідно яких корозійну стійкість визначають порівнянням міцності бетонів, що тверднули у корозійному середовищі з міцністю бетонів, що перебували в неагресивному середовищі, без зачищення поверхонь бетонних зразків.

2. Встановлено, що цементний каркас бетону з КАМД має більшу міцність і корозійну стійкість ніж цементний каркас бетону без КАМД.

3. Комплексом фізико-хімічних методів досліджень показано, що наявність в складі бетону комплексної активної мінеральної добавки призводить до особливостей структуроутворення цементу. Так, встановлено, що для композицій з КАМД характерно утворення щільної структури зі значною кількістю низькоосновних гідросилікатів кальцію та твердих розчинів гідроалюмосилікатного складу (гідрогеленіту – гідроанортиту), в протилежність композиціям без КАМД, для яких характерно вимивання в агресивному середовищі (розчині сульфатної кислоти) розчинних сполук типу портландиту, причому цей процес інтенсифікується при зачищенні поверхні зразка. Ці особливості структуроутворення цементної матриці пояснюють високу корозійну стійкість бетонів.

Література

1. Приймаченко, А. С. Вплив комплексної активної мінеральної добавки різного складу на міцність бетону [Текст] / А. С. Приймаченко, Л. О. Шейніч, К. К. Пушкарьова, С. І. Гедулян // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2013. – Вип. 26. – С. 126–128.
2. Hornbostel, K. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review [Text] / K. Hornbostel, C. K. Larsen, M. R. Geiker // Cement and Concrete Composites. – 2013. – Vol. 39. – P. 60–72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019
3. von Lohaus, L. Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den Kühlturmbau [Text] / L. von Lohaus, L. Petersen // Artikel aus: Beton-Informationen. – 2007. – Jg.: 47, Nr.5/6. – P. 71–79.
4. Damtoft, J. S. Concrete binders, mineral additions and chemical admixtures: state of the art and challengers for the 21st century [Text] / J. S. Damtoft, D. Herfort, E. Yde // Creating with Concrete: the Intern. Conf.: Proc. – Dundee (Scotland), 1999. – P. 1–15.
5. Naik, T. R. Use of superplasticizers in the production of HVFA concrete containing clean-coal ash and class F fly ash [Text] / R. N. Kraus, R. Siddique, F. Botha // The Seven CANMET/ACI Intern. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, 2003: Proc. – Berlin (Germany), 2003. – P. 1–31.
6. Celik, K. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder [Text] / K. Celik, C. Meral, A. Petek Gursel, P. K. Mehta, A. Horvath, P. J. M. Monteiro // Cement and Concrete Composites. – 2015. – Vol. 56. – P. 59–72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003
7. Temuujin, J. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars [Text] / J. Temuujin, A. van Riessen, K. J. D. MacKenzie // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, Issue 10. – P. 1906–1910. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.012
8. Rivera, F. Massive volume fly-ash concrete: a more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates [Text] / F. Rivera, P. Martínez, J. Castro, M. López // Cement and Concrete Composites. – 2015. – Vol. 63. – P. 104–112. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001
9. Шейніч, Л. А. Высокопрочные бетоны для монолитного домостроения [Текст] / Л. А. Шейніч, П. В. Попруга // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Будівельні конструкції”. – 2005. – Вип. 63. – С. 95–99.
10. Collepardi, M. Beneficiated Fly Ash Versus Normal Fly Ash or Silica Fume [Text] / M. Collepardi, S. Collepardi, J. J. Ogoumah, R. Troli // The 9th CANMET/ACI Intern. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and natural Pozzolans in Concrete: Proc. – Warsaw (Poland), 2007. – P. 1–8.
11. Дворкін, Л. Й. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах [Текст] / Л. Й. Дворкін, Н. В. Лушнікова, Р. Ф. Рунова, В. В. Троян. – К.: Вид-во КНУБА, 2007. – 216 с.
12. Sabir, B. B. Metakaolin and Calcined Clays as pozzolans for concrete: a review [Text] / B. B. Sabir, S. Wild, J. Bai // Cement and Concrete Composites. – 2001. – Vol. 23, Issue 6. – P. 441–445. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00092-5
13. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite [Text] / R. Fernandez, F. Martirena, K. L. Scrivener // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41, Issue 1. – P. 113–122. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013
14. Mostafa, N. Y. High replacements of reactive pozzolan in blended cements: Microstructure and mechanical properties [Text] / N. Y. Mostafa, Q. Mohsen, S. A. S. El-Hemaly, S. A. El-Korashy, P. W. Brown // Cement and Concrete Composites. – 2010. – Vol. 32, Issue 5. – P. 386–391. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.02.003
15. Vejmelková, E. High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics [Text] / E. Vejmelková, M. Pavlíková, M. Keppert, Z. Keršner, P. Rovnaníková, M. Ondráček et. al. // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, Issue 8. – P. 1404–1411. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.017
16. Бутт, Ю. М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов [Текст] / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1973. – 499 с.
17. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 334 с.
18. Index (inorganic) to the powder diffraction file [Text]. – ASTM. 1969. – Publication PD1S – 1911. American society for testing and materials. – York, Pennsylvania, 1969. – 216 p.
19. Семенов, Е. И. Минералогические таблицы [Текст]: справочник / Е. И. Семенов, О. Е. Юшко-Захарова, И. Е. Максимок и др. – М.: Недра, 1981. – 399 с.
20. Левин, Е. В. Основы современной строительной термографии [Текст] / Е. В. Левин, А. Ю. Окунев, Н. П. Умнякова, И. Л. Шубин; под ред. И. Л. Шубина. – М.: НИИСФ РААСН, 2012. – 176 с.