

УДК 691.32

Голубничий А.В.<sup>1</sup>

## ОСОБЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНІВ НА ЦЕМЕНТАХ З ЗАЛІЗОВМІСНИМИ ШЛАКАМИ

**Вступ.** Проблема застосування кольорових шлаків в теперішній час відноситься до актуальних з наукової, технічної і екологічної точок зору. Поряд з тим, що вони являють собою цінну сировину, їх розміщення і зберігання призводить до значних фінансових витрат і забруднення оточуючого середовища.

В Україні та інших державах СНД проведені значні наукові роботи по вирішенню питання їх комплексного використання [1, 2, 3]. Внаслідок їх виконання розроблені технології виробництва мінеральної вати, литих виробів і деяких інших матеріалів. Що дозволяє частково корисно їх застосовувати. Цьому також повинно сприяти широке впровадження таких речовин у технології цементів і бетонів різного функціонального призначення.

Головним завданням цієї роботи є дослідження впливу виду і кількості введених кольорових шлаків на властивості бетонів на цементах з їх застосуванням.

**Метою роботи** є дослідження фізико-механічних властивостей, морозостійкості і сульфатостійкості важких бетонів на цементах з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками.

Дослідження виконані по стандартним методикам.

Хімічний склад застосованих при проведенні досліджень кольорових шлаків наведено у табл.1, а мінеральний склад портландцементних клінкерів – табл.2.

Закономірності змін властивостей важких бетонів на цементах з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками визначали при змінах у них вмісту останніх у межах 0...50 мас.%, питомої поверхні цементів – 250...400 м<sup>2</sup>/кг.

**Виклад основного матеріалу.** При дослідженні цементів з кольоровими шлаками визначено, що при збільшенні у останніх концентрації оксидів заліза, у тому числі FeO має місце наступне.

Подовжуються строки початку і кінця тужавлення цементних паст. Що особливо виразно спостерігається при збільшенні концентрації та-

ких оксидів у цих шлаках вище за 30 мас.% і при зменшенні у останніх такої SiO<sub>2</sub>, нижче за 35 мас.%.

Таблиця 1

Хімічний склад кольорових шлаків

| № п/п                                                                                  | Вид шлаків        | Вміст основних оксидів, мас.% |                                |       |       |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------|
|                                                                                        |                   | SiO <sub>2</sub>              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | CaO   | MgO  |
| 1                                                                                      | Побужський        | 51.95                         | 6.65                           | 11.60 | 22.85 | 6.55 |
| 2                                                                                      | Режський          | 44.85                         | 8.25                           | 18.20 | 19.45 | 7.65 |
| 3                                                                                      | Уфалійський       | 43.15                         | 7.90                           | 21.95 | 17.25 | 8.00 |
| 4                                                                                      | Северонікелю      | 41.05                         | 7.65                           | 25.60 | 15.35 | 7.95 |
| 5                                                                                      | Константинівський | 29.95                         | 8.25                           | 31.80 | 13.85 | 8.10 |
| Примітка: вміст Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мас.%; 0.90 (шлак №4), 1.65 (шлак №5) |                   |                               |                                |       |       |      |

Таблиця 2

Мінеральний склад клінкерів

| № п/п | Вид клінкеру          | Мінеральний склад, мас. % |                  |                  |                   |
|-------|-----------------------|---------------------------|------------------|------------------|-------------------|
|       |                       | C <sub>3</sub> S          | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| 1     | Амвросіївський        | 57.00                     | 25.00            | 4.40             | 11.06             |
| 2     | Кам'янець-Подільський | 58.00                     | 17.00            | 8.20             | 13.00             |

Це пов'язано з тим, що у початковий період гідратації цементів, при таких змінах складів залізовмісних речовин, когезійна взаємодія у цементних пастах послаблюється.

Міцність цементних каменів складним чином пов'язана з умовами і тривалістю їх твердіння, вмістом у цементах залізовмісних речовин. Так після твердіння цементних каменів на протязі 3 діб у нормальних умовах їх міцність, при збільшенні у складі цементів вмісту кольорових шлаків від 0 до 50 мас.%, змінюється зворотно. При чому залежності між міцностями і вмістами у цементах кольорових шлаків носять близький до прямо-пропорційного характер. Це підтверджує те, що стекла, які входять до складу цих залізовмісних речовин не значно активуються продуктами гідратації портландцементного клінкеру при температурі 293K на протязі 3 діб.

У цементних каменях після ТВО спостерігаються криволінійні залежності між показниками їх міцності і вмістом у цементах кольорових шлаків. Це свідчить про те, що силікатні і алюмосилікатні стекла шлаків у таких умовах твердіння цементних каменів активуються і виявляють в'язучі властивості внаслідок сумісної дії температурного фактору і продуктів гідратації портландцементного клінкеру.

Подібні залежності між вмістами у цементах кольорових шлаків і показниками міцності цементних каменів спостерігається і після 28 діб твердіння останніх у нормальних умовах.

У взятого для порівняння шлакопортландцементу з гранульованим доменним шлаком криволінійна залежність між міцністю цементного каменю і вмістом у складі в'язучого шлаку спостерігається при твердінні останнього як у нормальних, так і в умовах тепло-вологої обробки.

Міцність цементних каменів після їх твердіння на протязі 28 діб тільки у нормальних умовах або спочатку при ТВО, а потім у нормальних умовах загалом збільшується при зворотних змінах концентрацій оксидів заліза у залізовмісних речовинах цементів. Це особливо виразно спостерігається при зменшенні концентрації таких оксидів, у тому числі FeO, у кольорових шлаках нижче за 30 мас.%. Показник підвищується при наближенні складів стеклових кольорових шлаків до кристалічних фаз у ряду  $CF'S_2 > CF'S > F'S > F_2'S$ .

Особливостями хімічного складу гранульованих шлаків кольорової металургії, які відрізняють їх від більшості силікатної і алюмосилікатної техногенної сировини, яка використовується при виробництві цементів загально-будівельного призначення, є підвищений вміст оксиду двовалентного заліза, а фазового – склоподібних фаз. Ці відмінності цих шлаків впливають на властивості таких цементів крізь зміни у продуктах їх гідратації вмісту гідроксидів кальцію.

При визначенні впливу початкової температури цементного тіста на зміни його властивостей встановлене наступне. Водопотреба цементного тіста нормальної густини збільшується при зрос-

танні його початкової температури. Це особливо суттєво спостерігається при збільшенні останньої вище за 313K. Водопотреба цементного тіста нормальної густини залежить від їх початкової температури у значно більшій мірі, ніж від виду шлаків, які входять у склад цементів, питомої поверхні останніх.

Строки початку і кінця тужавлення цементного тіста нормальної густини скорочуються при збільшенні їх початкової температури. Це особливо суттєво спостерігається при збільшенні останньої вище за 313K. Строки початку і кінця тужавлення цементних паст нормальної густини також залежать від їх початкової температури у значно більшій мірі, ніж від виду шлаків, які входять у склад цементів, питомої поверхні останніх.

Результати, які отримані при визначенні впливу початкової температури цементного тіста на його властивості пояснюються наступним. Так, хімічна взаємодія клінкерних мінералів з водою починається миттєво після їх взаємного контакту з утворенням високо-лужного середовища, у якому накопичуються конструкційні іони ( $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{4-}$ ,  $OH^-$ ,  $H^+$  і інші) і продукти гідратації клінкерних мінералів. У подальшому стекла шлаків, склад яких наближується до кварцу або CS починають взаємодіяти з конструкційними іонами. На поверхні останніх, на відміну від інших стеклових цих шлаків, переважно конденсуються продукти гідратації клінкерних мінералів. Прискоренню проходження цих елементарних актів, при підвищенні початкової температури цементного тіста, призводить до іммобілізації вільної води, збільшенню зчеплення у цементних пастах.

При підвищенні терміну гідратації цементів наведені елементарні акти постійно повторюються, а швидкість їх протікання вже залежить не тільки від кінетичних факторів – швидкості взаємодії води із складовими клінкерів і шлаків, або конструкційних іонів між собою і з компонентами шлаків, а і від дифузійних – швидкостей транспортування  $H^+$  і  $OH^-$  крізь шар гідратних новоутворень в реакційну зону і гідратних новоутворень крізь водний розчин і їх конденсації на активних центрах поверхні частинок шлаків. При збільшенні початкової температури цементних паст швидкість дифузійних процесів також зростає. Що і призводить до скорочення строків початку і кінця тужавлення цементного тіста, індукційного періоду його структуроутворення.

При дослідженні впливу температури ізоtermічного прогріву на міцність цементних каменів встановлено, що вона, при використанні у цементах будь-якого із застосованих кольорових шлаків, при збільшенні температури ізоtermічного прогріву зростає як безпосередньо після ТВО, так і після наступного твердіння цементних каменів у нормальних умовах. При цьо-

<sup>1</sup> Голубничий А.В. к.т.н доц. КНУБА

му спостерігається підвищення співвідношення між міцностями цементних каменів при стиску і згині. Також визначено, що міцність цементних каменів на цементах із застосуванням цих шлаків після їх твердінні в умовах ТВО змінюються у меншій мірі, ніж таких на цементах із застосуванням доменних гранульованих шлаків.

Наявність у продуктах гідратації цементів із застосованими залізовмісними речовинами низькоосновних гідросилікатів кальцію і гідросульфоалюмінатів кальцію, відсутність нових, крім існуючих у вихідних шлаках сполук тривалентного заліза свідчить про те, що при твердінні цементів у нормальних умовах або при ТВО  $\text{FeO}$  як у склоподібних, так і кристалічних фазах є стійким. Отже взаємодія цих залізовмісних шлаків з водою і продуктами гідратації клінкерних мінералів відбувається за рахунок хімічної і теплової активації стекл, близький порядок структур яких наближується до таких у силікатів кальцію або кварцу.

Отримані результати досліджень властивостей цементного тіста і каменів у різних умовах твердіння дозволяють пояснити те, що при підвищенні у залізовмісних шлаках концентрації оксидів дво- і тривалентного заліза, за рахунок зменшення такої оксидів кремнію або кальцію гідралічна активність цементів з застосуванням залізовмісних шлаків кольорової металургії знижується. Це обумовлено зменшенням здатності цих залізовмісних речовин, при таких змінах їх складів, до фізичної і хімічної взаємодії з водою і продуктами гідратації клінкерних мінералів.

Дослідження адсорбційної і гідратаційної активності цементів із застосуванням залізовмісних шлаків кольорової металургії; процесів тузавлення цементного тіста; твердіння цементних каменів дозволяють вважати ймовірним наступний механізм гідратації таких цементів. Так початковим його етапом є взаємодія клінкерних мінералів з водою. Гідратація цих залізовмісних шлаків проходить у такій послідовності: адсорбція води на активних центрах і їх збудження; транспортування іонів  $\text{H}^+$  і  $\text{OH}^-$  у реакційну зону; розривання зв'язків  $\text{Si-O-Si}$ ,  $\text{Si-O-Al}$ ,  $\text{Si-O-Ca}$  на поверхні шлаків; взаємодія груп  $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{AlO}_4^{5-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{4-}$  з утворенням шарів із гідросилікатів і гідросульфоалюмінатів кальцію; адсорбція на останніх продуктів гідратації клінкерних мінералів; утворення із продуктів гідратації плівко, транспортування протонів і  $\text{OH}^-$  груп крізь шари новоутворень у реакційну зону; утворення гідратаційних фаз під шарами початкових новоутворень на частинках шлаків.

Досліджено вплив кольорових шлаків на експлуатаційні властивості бетонів на цементах з їх застосуванням: міцність при твердінні на протязі

10 років, сульфатостійкість, морозостійкість. Вони залежать від вихідного складу цементів; водоцементного співвідношення; умов твердіння та інших факторів.

Встановлено, що при подовженні терміну твердіння цементних каменів у нормальних умовах від 1-ї до 3650 діб їх загальна пористість зменшується. Це обумовлено підвищенням у них вмісту гідратних новоутворень. При збільшенні у залізовмісних шлаках цементів концентрації оксидів заліза загальна пористість цементних каменів збільшується. Це особливо виразно спостерігається при зростанні концентрації таких оксидів у залізовмісних речовинах вище за 30 мас.%. По впливу на зменшення пористості цементних каменів на цементах із цими шлаками оксиди системи „ $\text{FeO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ ” розташовуються у ряду:  $\text{CaO} > \text{SiO}_2 > \text{FeO}$ . Пористість зменшується при наближенні складів стекл залізовмісних шлаків до кристалічних фаз у ряду:  $\text{CF}'\text{S}_2 > \text{CF}'\text{S} > \text{F}'\text{S} > \text{F}_2'\text{S}$ .

При збільшенні температури ізотермічного прогріву при ТВО від 323K до 365K загальна пористість цементних каменів підвищується. Причому особливо інтенсивно, якщо температура ізотермічного прогріву перевищує 358K. При збільшенні концентрації оксидів заліза у шлаках у цементних каменях, що тверділи у нормальних умовах, підвищується об'єм пор з розмірами радіусів у межах 10...1, 1...0.1 мкм. Це особливо виразно спостерігається при зростанні концентрації таких оксидів у залізовмісних шлаках вище за 30 мас.%. Подібне має місце і при підвищенні температури ізотермічного прогріву при ТВО, особливо вище за 358K.

У цементних каменів, що тверділи у нормальних умовах або при ТВО, із збільшенням концентрації оксидів заліза у шлаках, знижується об'єм пор з розмірами радіусів у межах 0.01...0.001 мкм і менше. Це особливо виразно спостерігається при зростанні концентрації таких оксидів у залізовмісних речовинах вище за 30 мас.%. Подібне характерно і при зменшенні концентрації  $\text{SiO}_2$  нижче за 35 мас.%.

По впливу на підвищення об'єму таких пор у цементних каменях на цементах із залізовмісними шлаками оксиди системи „ $\text{FeO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ ” розташовуються у ряду:  $\text{CaO} > \text{SiO}_2 > \text{FeO}$ . Об'єм таких пор зменшується при наближенні складів стекл залізовмісних шлаків до кристалічних фаз у ряду:  $\text{CF}'\text{S}_2 > \text{CF}'\text{S} > \text{F}'\text{S} > \text{F}_2'\text{S}$ . Пори з такими розмірами відносяться до гелевих і мають у своєму складі такі з діаметром близько 0.002 мкм, що є середнім розміром частинок CSH (I). Їх об'єм збільшується при зростанні температури ізотермічного прогріву при ТВО.

Міцність цементних каменів на цементах з вмістом 5...50 мас.% залізовмісних шлаків як при

згині, так і стиску стабільно зростала при їх твердінні у нормальних умовах на протязі 10 років. При підвищенні концентрації оксидів заліза у шлаках міцність цементних каменів після їх тривалого твердіння також зменшується. Це особливо виразно спостерігається при зростанні концентрації таких оксидів у шлаках вище за 30 мас.%. Подібне характерно і при зменшенні концентрації  $\text{SiO}_2$  нижче за 35 мас.%.

По впливу на підвищення міцності цементних каменів на цementsах із кольоровими шлаками після їх тривалого твердіння оксиди системи „ $\text{FeO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ ” розташовуються у ряду:  $\text{CaO} > \text{SiO}_2 > \text{FeO}$ . Міцність цементних каменів змінюється при наближенні складів стекл залізовмісних шлаків до кристалічних фаз у ряду:  $\text{CF}'\text{S}_2 > \text{CF}'\text{S} > \text{F}'\text{S} > \text{F}_2'\text{S}$ .

Залежності міцності цементних каменів на цementsах із цими залізовмісними шлаками від тривалості їх твердіння характеризуються наявністю таких етапів: найбільшій швидкості збільшення міцності (до 3-х діб твердіння), великої швидкості її збільшення (4...28 діб), посередньої швидкості її збільшення (29...180 діб), малої швидкості її збільшення (181...1080 діб), дуже малої швидкості збільшення міцності - тривалість твердіння в нормальних умовах перевищує 1081 добу. Це пов'язано з тим, що у перші 28 діб, а особливо 3 доби гідратації з водою переважно хімічно взаємодіють мінерали портландцементного клінкеру. У цей період на активних ділянках поверхні шлаків конденсуються продукти гідратації клінкерних мінералів, а в лужному середовищі - стекла шлаків, склади яких наближуються до метасилікату кальцію або кварцу, взаємодіють з конструкційними іонами, які утворюються внаслідок гідратації клінкерних мінералів. Це незначно впливає на підвищення міцності цементних каменів у зв'язку з невеликою кількістю виникаючих внаслідок такої взаємодії новоутворень. Що підтверджується тим, що кількість гідрооксиду кальцію після 28 діб гідратації цементів у нормальних умовах суттєво (у 2 рази і більше) переважає таку після 3-х діб їх гідратації.

При подовженні терміну твердіння від 29 до 180 діб вплив продуктів гідратації шлаків на зростання міцності цементних каменів значно посилюється. Це пов'язано із уповільненням взаємодії клінкерних мінералів з водою внаслідок утворення навколо частинок клінкеру щільних плівок із гідратних новоутворень. Про активізацію взаємодії конструкційних іонів і води з стеклами шлаків, склад яких наближується до кварцу або метасилікату кальцію, у цей період твердіння цементних каменів свідчить те, що кількість гідрооксиду кальцію у останніх після 180 діб їх твердіння менша за таку після 28 діб, але

більша, ніж після 3-х діб. Те, що гідроксид кальцію переважно взаємодіє із стеклами шлаків, склади яких наближуються до кварцу або метасилікату кальцію, і у меншій мірі з залізовмісними стеклами і кристалічними фазами, підтверджується результатами досліджень гідратаційної активності цементів з застосуванням цих залізовмісних кольорових шлаків.

При подовженні терміну твердіння цементних каменів від 361 до 1080 діб швидкість підвищення їх міцності подовжує уповільнюватись. При цьому має місце подальше переважне зв'язування гідрооксиду кальцію стеклами шлаків, склади яких наближуються до кварцу і метасилікату кальцію. Це підтверджується меншою кількістю у цементних каменях після 1080 діб їх твердіння вільного гідрооксиду кальцію у порівнянні з такою після 3-х діб.

У цей період твердіння цементних каменів  $\text{FeO}$  у залізовмісних стеклах шлаків є також хімічно стійким по відношенню до води і продуктів гідратації клінкерних мінералів. При подовженні термінів твердіння цементних каменів понад 1080 діб швидкість підвищення їх міцності суттєво уповільнюється. Це пов'язано з утворенням щільних плівок із гідратних новоутворень не тільки навколо клінкерних, а і частинок шлаків. Але вплив залізовмісних стекл шлаків на міцність цементних каменів подібний такому, який спостерігається при їх твердінні у межах 180...1080 діб.

Отримані результати досліджень непрямо свідчать про те, що у нормальних умовах твердіння на протязі навіть 10 років  $\text{FeO}$  у залізовмісних стеклах, близький порядок структур яких наближується до таких у піроксенів (геденбергіту, діопсиду), фаяліту, залізистих монтічеліту і акерманіту і однойменних кристалічних фазах, є стійким. Не спостерігається його перетворення у оксиди тривалентного заліза і їх сполуки.

Між міцністю і пористістю цементних каменів на цementsах з цими залізовмісними шлаками при їх твердінні на протязі до 10 років, спостерігаються визначені експоненціальні залежності. Це пов'язано з тим, що при гідратації таких цементів синтезується різна кількість однакових новоутворень.

При дослідженні морозостійкості важких бетонів на цementsах з застосованими залізовмісними речовинами визначено, що їх клас по морозостійкості залежить від виду застосованих шлаків і умов твердіння. Так показник після їх твердіння у нижче наведених умовах складає: в нормальних умовах – F100; після твердіння спочатку при ТВО з температурами ізотермічного прогріву у межах 323...358 K, а потім в нормальних умовах – F150; після твердіння спочатку при ТВО з температу-

рою ізотермічного прогріву у межах 363...368 K, а потім в нормальних умовах – F100.

Клас по морозостійкості важких бетонів на цементах з доменним шлаком після твердіння в нормальних умовах складає F150.

Коефіцієнт морозостійкості композиційних матеріалів підвищується при протилежних змінах концентрації оксидів заліза у залізовмісних речовинах за рахунок підвищення такої CaO або SiO<sub>2</sub>. Подібне спостерігається і при зростанні температури ізотермічного прогріву при TBO від 323 до 358K. При підвищенні температури ізотермічного прогріву при TBO вище за 363K, клас важких бетонів по морозостійкості зменшується і дорівнює такому у бетонів, які тверділи тільки у нормальних умовах. Клас важких бетонів по морозостійкості на цементі з доменним шлаком після їх твердіння у нормальних умовах перевищує такий у бетонів на цементах з кольоровими шлаками, що тверділи у подібних умовах.

Морозостійкість композиційних матеріалів на цементах з кольоровими шлаками покращується при зростанні у них об'єму пор з розміром радіусів менше 0.001мкм. Такі зміни пов'язані із збільшенням у цементних каменях і важких бетонів в цілому вмісту низькоосновних гідросилікатів кальцію типу CSH(I).

Морозостійкість важких бетонів на цементах з залізовмісними шлаками також покращується при збільшенні у них об'єму пор з розмірами радіусів у межах 0.01...0.001 мкм. Такі зміни також частково пов'язані із збільшенням у цементних каменях і важких бетонів вмісту низькоосновних гідросилікатів кальцію типу CSH(I).

По впливу на підвищення морозостійкості цих композиційних матеріалів і цементних каменів на цементах із залізовмісними шлаками оксиди системи „FeO – CaO – SiO<sub>2</sub>” розташовуються у ряду: CaO > SiO<sub>2</sub> > FeO. Це особливо виразно спостерігається при зменшенні у залізовмісних шлаках концентрації SiO<sub>2</sub> нижче за 35 мас. % і збільшенні такої оксидів заліза, у тому числі FeO, вище за 30 мас. %.

Стійкість важких бетонів на цементах з цими шлаками до попереминого заморожування – відтаювання покращується при підвищенні температури ізотермічного прогріву при TBO до 358K. При подальшому її зміні у цьому напрямку морозостійкість цих матеріалів зменшується.

Отримані результати досліджень свідчать про те, що найбільш негативно на стійкість важких бетонів на цементах з залізовмісними кольоровими шлаками до попереминого заморожування – відтаювання впливають пори з розмірами радіусів у межах 0.1...10 мкм, а найбільш позитивно – такі з розмірами менше 0.001мкм.

Виконані дослідження дозволили запропонувати імовірний механізм руйнування бетонів на цементах з застосуванням цих залізовмісних шлаків при їх попереминому заморожуванні – відтаюванні, який полягає у наступному. При першому заморожуванні таких матеріалів у них у лід перетворюється вода, яка знаходиться у порах з розміром радіусів у межах 0.1...100мкм, які розташовані у поверхневих шарах. У подальшому границя заморожування води у порах таких розмірів переміщується у глибину матеріалу, а у поверхневих шарах починає замерзати вода у порах менших розмірів. Внаслідок наявності градієнтів температур між поверхневими і внутрішніми шарами у матеріалах при заморожуванні спостерігаються лінійні і об'ємні деформації. Причому на початку заморожування в поверхневих шарах матеріалів вони більші, ніж у внутрішніх. Це обумовлює виникнення внутрішніх напружень і призводить до початку деструкції поверхневих шарів матеріалів вже на початку їх першого заморожування. У подальшому градієнти температур у матеріалах зменшуються і більш вагоме значення має внутрішній тиск, який утворюється внаслідок розширення води при її перетворенні у лід, а деструкція поширюється і на глибинні шари матеріалів. Вона проходить по їх дефектним місцям, якими у матеріалів на цементах з застосуванням залізовмісних шлаків є місця контактів продуктів гідратації клінкерних мінералів з поверхнею

частинок шлаків. Агресивній дії внутрішніх напружень протидіють когезійні і адгезійні сили зчеплення. При відтаюванні матеріалів деформації у них мають зворотній напрямок у порівнянні з такими при заморожуванні. Руйнуванню матеріалів по їх дефектним місцям внаслідок напружень, які обумовлені розширенням твердих компонентів матеріалів при відтаюванні, також протидіють адгезійні і когезійні сили зчеплення. Повторення циклів заморожування – відтаювання призводить до послаблення адгезійних і когезійних сил зчеплення, що фіксується зменшенням його міцності.

Сульфатостійкість цементних каменів на цементах з кольоровими шлаками покращується при підвищенні у останніх концентрації SiO<sub>2</sub> особливо вище за 35 мас. % і поменшанні такої оксидів заліза, у тому числі FeO, особливо нижче за 30 мас. %. По впливу на підвищення цього коефіцієнту у цементних каменях на цементах із залізовмісними шлаками оксиди системи „FeO – CaO – SiO<sub>2</sub>” розташовуються у ряду: CaO > SiO<sub>2</sub> > FeO.

Сульфатостійкість цементних каменів на цих цементах зростає при підвищенні температури ізотермічного прогріву при TBO від 333 до 368K.

У цементних каменях, які підлягають дії водного розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , мають місце як конструктивні, так і деструктивні процеси. Перші пов'язані з подальшим продовженням хімічної взаємодії з водою не гідратованих клінкерних мінералів, а також різних аніонів і катіонів із стеклами залізовмісних шлаків, склади яких в першу чергу наближуються до такого у кварцу або метасилікату кальцію. Що сприяє зростанню сульфатостійкості цементних каменів і важких бетонів. Другі пов'язані з хімічною взаємодією гідроксиду і гідроалюмінатів кальцію з сульфатом натрію. Що призводить до синтезу у цементних каменях і бе-

тонах етрінгіту і, як наслідок, їх деструкції. Корозійна стійкість цементних каменів і важких бетонів на цementsах з кольоровими шлаками підвищується при зв'язуванні гідроксиду кальцію у гідросилікати кальцію.

Отримані результати досліджень по визначенню сульфатостійкості цементних каменів і бетонів на цих цementsах свідчать про стійкість FeO у стеклах шлаків, близький порядок структур яких наближується до таких у геденбергіту, фаяліту, залізистих монтічеліту і акерманіту до дії розчинів  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

## Висновки

1. Міцність цементних каменів і важких бетонів на цementsах з кольоровими шлаками після їх твердіння на протязі 1...3650 діб тільки у нормальних умовах або спочатку при ТВО, а потім у нормальних умовах суттєво збільшується, а пористість – подібно зменшується при зростанні у цих залізовмісних речовинах концентрації  $\text{SiO}_2$  за рахунок зниження такої загальної оксидів заліза. Такий вплив останніх послаблюється при зменшенні їх концентрації, у тому числі FeO, нижче за 30 мас. %.

2. Морозостійкість і сульфатостійкість цементних каменів і важких бетонів на цementsах з кольоровими шлаками покращується при зростанні у шлаках концентрації  $\text{SiO}_2$ , за рахунок зниження такої оксидів заліза. Такий вплив останніх послаблюється при зменшенні їх концентрації, у тому числі FeO, нижче за 30 мас. %.

3. Важкі бетони на цementsах з кольоровими шлаками після їх твердіння у нижче наведених умовах характеризується наступними класами по морозостійкості: у нормальних – F100; після твердіння спочатку при ТВО з температурами ізотермічного прогріву у межах 323...358 K, а потім в нормальних умовах – F150, після твердіння спочатку при ТВО з температурами ізотермічного прогріву у межах 363...368 K, а потім в нормальних умовах – F100.

4. Корозійна стійкість цементних каменів і важких бетонів на цementsах з залізовмісними кольоровими шлаками по відношенню до дії розчинів сульфатів натрію підвищується при збільшенні у складі гідратних новоутворень низько основних гідросилікатів кальцію. FeO у стеклах шлаків, склад яких наближується до таких у геденбергіту, фаяліту, залізистих монтічеліту і акерманіту, а також цих кристалічних фазах є стійким в умовах дії на них: повітря, пари, води з температурою у межах 253...368K або розчинів сульфатів натрію.

## Література

1. Шелудяков Л.Н., Косьянов Э.А. Комплексная переработка шлаков цветной металлургии. - Алма-Ата: Наука, 1990. - 168 с.
2. Горшков В.С., Александров С.Е., Иващенко С.И., Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве.- М.: Стройиздат. 1985.-273с.
3. Лакерник М.М., Мазурчук Э.Н., Петкер С.Я., Шабалина Р.И. Переработка шлаков цветной металлургии.- М.: Металлургия, 1977.- 160с.