

РЕГУЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН НА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Коверніченко Л. М., Шишкін О. О.

1. Вступ

При тривалому впливі води спостерігається ефект відновлення міцності, що зв'язано з гідратацією цементу, вирівнюванням вологісного стану бетону, погашенням або сгладжуванням вологісних напруг. Взаємодія цементного каменю з магnezійними силікатами, наприклад, тальком, глауконітом та ін. В в'язучому прошарку з'являються головним чином гідросилікати різної міри основності, гідросилікати магнію, гідрогранати алюмоферитні і феритні.

Велику роль в утворенні контактної зони грають процеси фізичної взаємодії заповнювачів з цементним каменем. Міцність адгезії цементного каменю з поверхнею вапняку у багато разів вище, ніж з кварцом, гранітом і іншими силікатними матеріалами і породами. Якщо в продуктах гідратації портландцементу, які межують з поверхнею карбонатного заповнювача, виявляється підвищений вміст вуглекислого газу CO_2 , то в поверхневих шарах карбонатних порід з'являється нова властивість. Менша розчинність в соляній кислоті, оскільки виявляється велика кількість кремнезему, чим в звичайному об'ємі тієї ж породи.

Мікрористалічні новоутворення гідрокарбоалюмінатів магнію і кальцію, зосереджені в контактній зоні, зростаються між собою і з поверхнею мікронаповнювачів і зернистих заповнювачів. В результаті виникають в цій зоні міцні мікрористалічні новоутворення. Ці ж процеси протікають в порах і капілярах заповнювача, в які проникає вода, насичена продуктами гідролізу і гідралізації клінкерних мінералів. Контактна зона є шаром добре розкристалізованої маси, що карбонізує, поширюється від зерен заповнювачів до цементного каменю зі взаємним проростанням кристалічних новоутворень і взаємозміцненням, зі зникненням межі розділу між ними.

Тому актуальним є дослідження впливу мікрористалічних новоутворень гідрокарбоалюмінатів та гідрокарбоферитів на стійкість в умовах дії агресивних середовищ.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є властивості бетону, що містить залізозміщуючі наповнювачі, які забезпечують його довговічність.

Під впливом кремнеземних заповнювачів та наповнювачів, які містять іони заліза, відбувається формування структури новотворів цементного каменю, які оточують і омонолічують зернистий заповнювач бетону.

Характер і повнота цих процесів залежать від багатьох чинників, але в першу чергу від:

- різновиду мінеральної в'язучої речовини;
- різновиду і дисперсності заповнювача;

- кристалохімічних властивостей і структури мінералів;
- складу рідкого середовища в суміші;
- присутності в системі сторонніх, наприклад, поверхнево-активних речовин;
- температури;
- міри ущільнення;
- інших зовнішніх і технологічних чинників.

Дослідження показують, що структура контактного шару завжди однорідніша і більш тонкодисперсна, ніж у цементного каменю і тим більше у заповнювача. Реакційна здатність моно- або полімінеральних неорганічних вяжучих речовин по відношенню до заповнювачів має вибірковий характер. У пограничних із заповнювачем ділянках контактної зони в 20–40 мкм концентруються новоутворення гідратів, кристалічність, щільність, міцність і мікротвердість яких відрізняються від внутрішньої мікроструктури тверднучої в'язучої речовини.

У зоні контакту знаходяться різні за кристалохімічною природою, мірою вивітрювання, а також орієнтацією, мінерали заповнювача, які взаємодіють з в'язучою речовиною і новоутвореннями в цій зоні. При взаємодії портландцементного каменю з поверхнею карбонатних заповнювачів контактна зона при твердненні в нормальних умовах характеризується присутністю гідрокарбоалюмінатів або гідрокарбоферитів в'язучої речовини і заповнювача.

Саме тому застосування алюмонато-алюмоферритових цементів прийнятніше при використанні вапнякових заповнювачів. Найбільш типовим в зоні контакту новим з'єднанням являється $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CaO}_3, \text{MgCO}_3) \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. Це новоутворення пов'язано з розчиненням і перекристалізацією кристалів, що сформувалися раніше.

Одним з найбільш проблемних місць є взаємодія портландцементного каменю з поверхнею карбонатних заповнювачів. Контактна зона при твердненні в нормальних умовах характеризується присутністю гідрокарбоалюмінатів або гідрокарбоферитів в'язучої речовини і заповнювача, на які впливають чисельні фактори при твердненні.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування розвитку структури в тверднучому тісті в'язучого, де протікають процеси по межах контакту з поверхнею заповнюючої частини та чинників, які на них впливають.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі:

1. Дослідити вплив залізовміщуючого наповнювача на морозостійкість бетону.
2. Дослідити вплив залізовміщуючого наповнювача на корозійну стійкість бетону.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Відомо, що як бетон середньої якості [1], так як і високоякісні бетони [2] та спеціальні [3] складаються з двох систем: цементного каменю та заповнювачів. Тому характер і повнота процесів, що відбуваються в об'ємі бетону на межі контакту цементного каменю та заповнювача, залежать від багатьох чинників, та безпосередньо

впливають на довговічність як бетону на цементі [4], так і шлаколузних [5].

Фізико-хімічна взаємодія між цементним тістом та заповнювачем відбувається на всіх стадіях готування бетону і проявляється у змочуванні, адсорбції й хемосорбції, утворенні адгезійних зв'язків різної природи (ван-дер-ваальсові, водневі, електричні, кристалохімічні та хімічні) [6]. Зазначені фактори впливають на інтенсивність процесів утворення контактів і міцність зчеплення гідратів цементного каменю із заповнювачем при забезпеченні основного вкладу у формування міцності цементних матеріалів [7].

Поряд із заповнювачем, цементним каменем та порами, зона контакту між цементним каменем та заповнювачем розглядається як окремий структурний елемент цементних матеріалів, який відповідає за їхні властивості та експлуатаційні можливості. Формування зони контакту відбувається за загальною схемою структуроутворення цементних матеріалів і обумовлює особливості структури, що виникає. За зону контакту вважають мікрооб'єм поблизу поверхні поділу «цементний камінь – заповнювач», що включає поверхневий шар заповнювача, шар цементного каменю, що прилягає, та границю поділу між ними [7].

Характер зони контакту визначається особливостями гідратаційного тверднення в'язучих і структурою штучного каменю навколо поверхні заповнювача з різними кристало-хімічними та структурними особливостями. Проте гідратаційне твердіння в'язучих залежить від їх складу, властивостей та комплексу зовнішніх факторів, що включають водотверде відношення, наявність різних добавок та різноманітних технологій, які використовуються.

Стан контактної зони (сила зчеплення цементного каменю із зернами заповнювача), склад та структура новоутворень на контакті визначають основні технічні властивості бетонів – міцність, морозостійкість, корозійну стійкість [8]. Морфологія, пористість, щільність та хімічний склад – це взаємозв'язані фактори, що впливають на структуру та міцність матеріалу.

Фізико-механічні властивості контактної зони обумовлено силою зчеплення цементного каменю із зерном заповнювача. Будова та взаємозв'язок елементів мікроструктури цементного каменю, розміри та характер пор, співвідношення між фазовими складовими залежать від складу продуктів гідратації, що визначаються хіміко-мінералогічними особливостями вихідних в'язучих речовин і кількістю води, необхідної для гідратації, при умові дотримання технології приготування бетонної суміші, часу та режиму тверднення.

Властивості контактної зони, що включає поверхню поділу між заповнювачем та цементним каменем, а також контактні шари цементного каменю та заповнювача, додатково обумовлені такими факторами, як [9]:

- хіміко-мінералогічний склад та фізико-механічні властивості заповнювача;
- способи приготування;
- укладки та ущільнення бетонної суміші;
- умови тверднення.

На основі оцінки структурних особливостей та фазового складу зони контакту до і після експлуатації бетону можна визначити його здатність чинити опір дії різних факторів, оцінити механізми, що обумовлюють стійкість

матеріалів у цілому. Участь заповнювача у формуванні зони контакту проявляється у впливі кристалохімічних особливостей та питомої поверхні мінералів, що входять до його складу, на процеси структуроутворення при гідратації в'язучих.

Серед основних напрямків вирішення проблеми підвищення довговічності бетону можуть бути виділені, наприклад, застосування в'язучих речовин високої стійкості до дії агресивних середовищ [3, 10].

Що стосується досліджень впливу властивостей контактної зони між заповнювачем і цементним каменем на показники довговічності бетону, то вони обмежені:

- дослідженнями впливу мінералогічного складу цементу [11], властивостей міцності зчеплення із заповнювачами з аморфного кремнезему [12] та із карбонатних порід [13];

- взаємодії заповнювачів для бетону із водою [14].

Зокрема, робота [14] присвячена визначенню взаємодії заповнювачів з водою та розглянуто зв'язки вологи з матеріалом заповнювача.

Волога, що утримується в бетоні, класифікується по розміру енергії її зв'язку з його складовими. Узагалі, розрізняють три великі групи зв'язку вологи з матеріалом: хімічну, фізико-хімічну, фізико-механічну. Хімічний зв'язок води в бетоні в результаті хімічних реакцій гідратації цементу здійснюється в точних кількісних стехіометричних співвідношеннях. Фізико-хімічно (адсорбційно) зв'язана вода присутня на гідратних оболонках кристалів. Причина виникнення цього зв'язку – наявність силових полів атомно-молекулярної природи. Найбільш міцно зв'язаний мономолекулярний прошарок води. Наступні прошарки утримуються із силою, що слабшає.

Фізико-хімічно (адсорбційно) зв'язана вода присутня на гідратних оболонках кристалів. Причина виникнення цього зв'язку – наявність силових полів атомно-молекулярної природи. Найбільш міцно зв'язаний мономолекулярний прошарок води. Наступні прошарки утримуються із силою, що слабшає. Такий полімолекулярний прошарок адсорбційної води складає приблизно декілька сотих діаметрів водяних молекул. Адсорбційно-зв'язана вода володіє певними властивостями, що відрізняють її від звичайної води. Так, унаслідок підвищеної щільності, ця вода має властивості пружного тіла і виконує розклинюючу дію. Адсорбційний зв'язок води в бетоні відноситься до числа зв'язків середньої інтенсивності, що можуть бути зруйновані десорбцією й випаром, проте для цього потрібно визначити час [3].

Мінерали цементного каменю (гідросилікати, гідроалюмінати й гідроферити) можуть стійко існувати у твердій фазі тільки в тому випадку, коли концентрація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у воді, яка знаходиться у бетоні, залишається вище визначеної рівноважної для даного мінералу концентрації.

У початковій стадії дії прісної води (із малою тимчасовою жорсткістю) на бетон, концентрація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ залишається рівною концентрації насиченого розчину (при температурі 20 °C – 1,18 гр/л у розрахунку на CaO) у результаті розчинення вапна, що знаходиться у твердій фазі. Маса вільного вапна в портландцементному камені складає в 3-місячному віці біля 15 % маси

цементу. Після розчинення й виносу усього вільного вапна його концентрація у граничному обсязі бетону відновляється внаслідок переходу в рідку фазу кальцію, хімічно зв'язаного в мінералах цементного каменю [5, 6].

На думку авторів робіт [6, 13], слід зазначити, що при твердінні портландцементу рідка фаза насичується іонами Ca^{+2} , підвищуючи рН середовища. Це сприяє утворенню кременекисневих, алюмокисневих, а також залізокисневих аквакомплексів [3], що є основними структуроутворюючими мотивами низькоосновних гідросилікатів, що мають більш високу стійкість до дії агресивних середовищ. При цьому, чим менше концентрація CaO у розчині цементу, що твердіє, тим швидше гідроліз і гідратація C_3S і менше основність гідросилікатів, що утворюються.

Одними з найбільше відомих мінералів, що утворюються при твердінні портландцементних композицій, що містять значну кількість хімічно пов'язаної води, є гідросульфоалюмінати кальцію, з яких найбільше відомі два гідросульфоалюмінати $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$ і $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot12\text{H}_2\text{O}$, а також $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot12\text{H}_2\text{O}$. Означені мінерали стійкі у водяних розчинах Na_2SO_4 , NaCl , CaCl_2 , тобто обумовлюють корозійну стійкість системи в даних агресивних середовищах. А також зв'язують значну кількість води, підвищуючи щільність цементного каменю й величину його початкового модуля пружності. Отже, забезпечення виникнення у продуктах гідратації дисперсної системи, що твердіє, значної кількості мінералів типу гідросульфоалюмінітів та гідросульфоферитів кальцію забезпечить підвищення щільності цементного каменя і, як наслідок, міцності і корозійної стійкості. А також зниження його деформативності. Проте кількість цих мінералів у відомих дисперсних системах на основі портландцементу обмежено, а їх взаємодія із заповнювачами бетону недостатньо вивчена, що й викликало необхідність виконання даної роботи.

5. Методи досліджень

При дослідженні були використані наступні наукові методи:

- метод визначення морозостійкості бетону згідно з вимогами державних стандартів України;
- метод визначення стійкості бетону до дії агресивних середовищ.

6. Результати досліджень

При твердінні зразків бетону в повітряно-сухих умовах спостерігається збільшення міцності, оптимум якого досягається на 90 добу твердіння, проте на 180 доби відзначається зниження призменої міцності внаслідок процесів перекристалізації, що протікають, гідратних новотворі. Це призводить до зміни пружно-пластичного стану штучного каменю.

Зразки бетону нормального твердіння характеризуються інтенсивним ростом модуля пружності в перші 28 доби, після 90 діб – модуль пружності стабілізується і надалі змінюється незначно. Пропарювання при зниженій температурі ізотермії (338 ± 5) К і наступне збереження в нормальних умовах дозволяє одержати штучний камінь, модуль пружності якого у віці 28 доби порівнянний зі значенням модуля

пружності бетону при твердінні у природних умовах. Причому, порівнюючи модулі пружності портландцементного й шлаколужного бетонів одного класу, відзначимо більш низьку деформативність останнього.

У процесі подальшого формування структури бетону за рахунок рівномірного розподілу внутрішніх напруг спостерігається відповідний ріст призменої міцності бетону у віці 270 діб. На противагу викладеному, кубикова міцність відрізняється постійним ростом у досліджуваному інтервалі часу.

Кінетичні криві зміни значень модуля пружності і призменої міцності бетону в повітряно-сухих умовах подібні. Причому, зниження названих показників у віці 180 діб характерно і для портландцементного бетону і для шлаколужного бетону, який твердів в аналогічних умовах.

Це викликано, мабуть, причинами, що визначають пружно-пластичний стан бетону, зокрема концентрацією напруг в окремих зонах бетону й виникненням через нерівномірне висихання усадочних тріщин, що знижують пружні властивості матеріалу.

Морозостійкість бетону є його властивістю, що забезпечує його довговічність. У даній групі експериментів досліджена морозостійкість бетону, як композиційного матеріалу, отриманого в результаті твердіння системи «гідралічна в'язуча речовина – залізовмісний наповнювач – заповнювач», в залежності від її складу і вмісту в ній залізовмісного заповнювача.

В умовах проведення експерименту наявність в системі залізовмісного заповнювача призводить до підвищення морозостійкість бетону на 20...30 % (табл. 1).

Таблиця 1

Морозостійкість бетону, отриманого на основі системи «портландцемент – залізовмісний наповнювач – заповнювач»

Витрати компонентів, кг/м ³					Морозостійкість, цикли
ПЦ	Вода	Пісок	Щебінь	ЗН	
439	175	464	1280	–	110
351	175	464	1280	88	135
350	210	464	1280	–	75
280	210	464	1280	70	95

Примітка: ПЦ – портландцемент, ЗН – залізовмісний наповнювач.

У наступній групі експериментів досліджена стійкість бетону в умовах дії агресивних середовищ в залежності від його складу і виду агресивного середовища.

При проведенні досліджень визначалися: кислотостійкість, сульфатостійкість, стійкість до видужування в залежності від кількості залізовмісного наповнювача в бетоні складу 1: 1,8: 4,3 на портландцементі.

Визначення кислотостійкості проводилося випробуванням на вигин зразків-балочок розміром 10x10x40 см, що зберігалися в водному розчині кислоти протягом 6 міс.

В умовах проведення експерименту введення в систему залізовмісного наповнювача підвищує стійкість бетону на 15...20 % при його твердінні в середовищі 0,01 Н розчину HCL (табл. 2).

Таблиця 2

Кислотостійкість бетону, отриманого на основі системи «портландцемент – залізовмісний наповнювач – заповнювач», в 0,01н розчині НСІ

Водоцементне відношення	Міцність бетону, МПа, при вмісті ЗН, %			
	0	20	30	40
0,40	10,0	8,4	7,5	6,2
0,45	9,5	8,0	7,1	5,7
0,50	8,6	7,9	7,2	5,9

Сульфатостійкість бетону визначалася при впливі на нього розчинів різного складу:

- 1 – питна вода (контрольний);
- 2 – 5 %-ий розчин Na_2SO_4 ;
- 3 – 1 %-ий розчин MgSO_4 ;
- 4 – 5 %-ий розчин рівній суміші Na_2SO_4 і MgSO_4 .

Після 6 місяців зберігання в зазначених розчинах, бетонні зразки-балочки, які мали розмір 10x10x40 см, виготовлені з бетону складу 1:1,8:4,3 на портландцементі. Були випробувані на вигин. В умовах експерименту введення в систему залізовмісного наповнювача підвищує сульфатостійкість одержуваного бетону (табл. 3).

Таблиця 3

Сульфатостійкість бетону, отриманого на основі системи «портландцемент – залізовмісний наповнювач – заповнювач»

Водоцементне відношення	Коефіцієнт стійкості бетону, при вмісті залізовміщуючого наповнювача, %, для середовищ											
	0			20			30			40		
	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
0,40	0,99	1,2	1,1	0,96	1,08	0,9	0,94	1,05	0,9	0,99	1,0	0,9
0,45	0,92	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,91	1,02	0,98	0,92	1,0	0,9
0,50	0,90	0,9	0,8	0,88	1,0	0,9	0,90	0,97	0,95	0,97	1,0	0,9

Бетон на основі системи «портландцементний клінкер – залізовмісний наповнювач – заповнювач» приготований зі складу 1:1,8:4,3 на основі портландцементу та після зберігання протягом 6 міс. в проточній дистильованій воді показав такі результати стійкості випробуванням на вигин зразків-балочок розміром 10x10x40 см (табл. 4). Визначено, що даний бетон володіє досить високою стійкістю до корозії 1-го виду.

Таблиця 4

Стійкість бетону, отриманого на основі системи «портландцемент – залізовмісний наповнювач – заповнювач», до вилугування

Склад дисперсної системи, %		Міцність бетону, МПа, в віці, міс.		
ПЦ	ЗН	0,033	3	6
100	0	8,0	7,8	7,1
90	10	9,0	9,0	7,3
80	20	10,6	9,7	8,8
60	40	8,9	7,8	6,6

Таким чином, проведені дослідження показали, що бетон, отриманий на основі системи «портландцемент – залізовмісний наповнювач – заповнювач» має підвищену корозійну стійкість в порівнянні з бетоном, отриманим на бездобавочному портландцементі. Підвищену корозійну стійкість отриманого бетону можна пояснити утворенням мінералів на основі заліза з високим вмістом зв'язаної води (рис. 1), що призводить до зниження його проникності для зовнішніх середовищ.

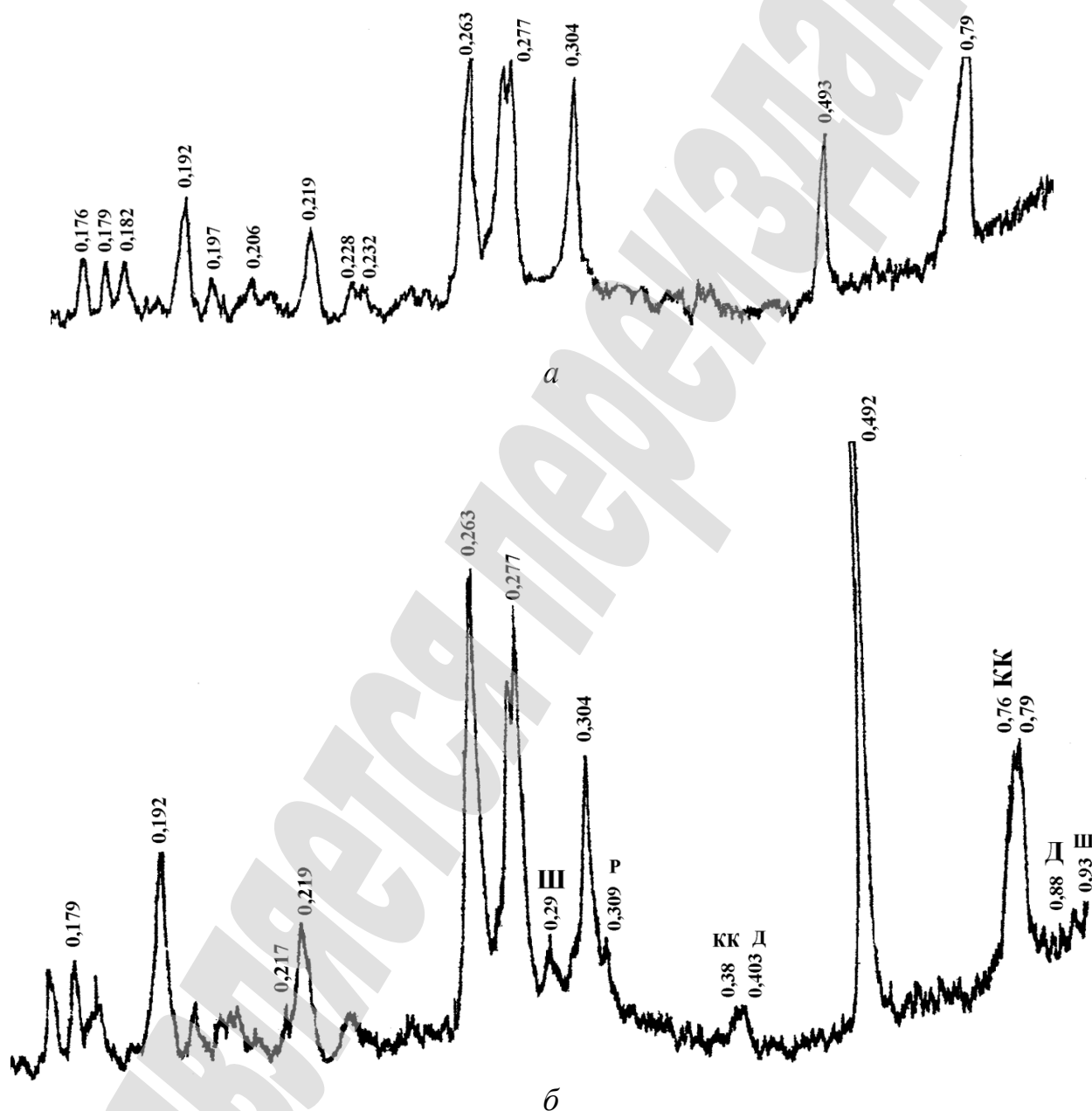


Рис. 1. Рентгенограми цементного каменю, отриманого в наслідок твердіння: а – криворізького портландцементу без добавок; б – дисперсної системи «портландцемент – залізовмісний наповнювач», що містить 80 % портландцементу та 20 % залізовміщуючого наповнювача.

Р – рибекіт, Ш – шабазіт, К – канкриніт, Д – десмін,
 К – $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{Al}_2\text{O}_3)\cdot\text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Кількість і швидкість утворення гідрокарбоалюмінату кальцію підвищуються зі збільшенням ступеню подрібнення карбонатного заповнювача або наповнювача.

При взаємодії цементного тіста з кремнеземними заповнювачами піщаником, кварцем, туфом, трепелом та ін. в нормальних умовах тверднення в контактній зоні утворюються в основному гідросилікати кальцію, $CSH(B)$, CS_2H і гідрогранати. Взаємодія тверднучого цементного тіста з алюмосілікатними заповнювачами типу ортоклазів, альбитів і ін. в контактній зоні з'являється підвищена кількість гідросилікатів різної міри основності, гідроалюмінати, гідрогранати з різним співвідношенням SiO_2 , Fe_2O_3 , H_2O . В умовах пропарювання і автоклавної обробки основність гідросилікатів кальцію знижується, а гідрогранати збагачуються кремнеземом і окислом заліза зі зміною співвідношення фаз. Взаємодія цементного каменю з магнезійними силікатами, наприклад, тальком, глауконітом та ін. в в'язучому прошарку з'являються головним чином гідросилікати різної міри основності, гідросилікати магнію, гідрогранати алюмоферритні і ферритні. При взаємодії цементного тіста з заповнювачами з магматичних порід – граніту, сіеніту, діабазу, габро, діорита, базальту відбувається утворення в контактній зоні за нормальних умов тверднення гідросилікатів кальцію різної міри основності. На міцність зчеплення в цій зоні роблять певний вплив також структурно-текстурні особливості гірських порід, використовуваних при виробництві заповнювачів. З метою підвищити адгезію в систему вносять мінералізатори у вигляді хлористого кальцію, сірчаноокислого глинозему, рідкого скла або залізовміщуючий наповнювач. Контактний шар, що виникає в результаті взаємодії тверднучого цементного тіста з поверхнею забезпечує в тому або іншому ступені зчеплення заповнювача в загальний моноліт. Подібно до інших склеювальних речовин його адгезійні властивості і здатність до створення моноліту залежать від фазового складу і структури цементного каменю. Міцність зчеплення, як правило, зростає у міру збільшення в контактній зоні гідросилікатів кальцію типу $CSH(B)$ з подальшим переходом в стійкішу форму тоберморита типу $C_5S_6H_5$, феритних і алюмоферритних гідрогранатів, гідросилікатів магнію. Зчеплення на межі контактуючих компонентів збільшується також з підвищенням міри дисперсності контактної зони, зростанням кристалічних решіток цементного каменю і породотворюючих мінералів.

У ділянці знижених температур (нижче $0^\circ C$) спостерігаються енергетичні і кінетичні відхилення в процесі тверднення цементного тіста. Сповільнюються, але не призупиняються процеси взаємодії клінкерних мінералів з водою навіть при досить низьких негативних температурах, що залежить від ряду причин, особливо від стадії гідратації цементу до заморожування, наприклад до $-10^\circ C$ і нижче. Цьому сприяють екзотермічні реакції, що виникають при дифузійному проникненні вологи до свіжої поверхні часток цементу через гелієві прошарки, а також переохолоджений стан рідкої фази у присутності іонів-мінералізаторів, що сприяє закону зміщення рівноваги фаз. Кристалогідрати, що поступово утворюються в переохолодженій рідині, – еtringіт і тоберморит – є при знижених температурах стійкішими, ніж при нормальних температурах, які мають порівняно підвищену дисперсність, чим при звичайній гідратації. Це позитивно відбивається на міцності цементного каменю. Замерзання

перериває процеси гідратації цементу. Проте цемент сприяє відновленню і продовженню звичайних процесів гідратації. Активним способом зміцнення мікродисперсного матеріалу є введення додаткових речовин в неорганічні в'язучі матеріали, в зону контактування або в цементне тісто. Ці речовини підвищують адгезію за рахунок акумуляції води, закупорки пор і тріщин, збільшення змочуваності і розчинності мінералів цементу, виникнення нових комплексних кристалічних утворень і тому подібне. Окрім поверхнево-активних речовин, що відзначаються вище, у багатьох випадках виявляються дуже корисними порошкоподібні добавки мікронаповнювачі, наприклад, до портландцементу. У оптимальних кількостях, іноді до 15–30 % і вище по масі цементу, можуть сприятливо відбиватися на щільності без значного зниження міцності. Як за рахунок механічного заповнення мікропор, так і під впливом виникнення додаткової кількості нових комплексних цементуючих новоутворень, наприклад, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{Al}_2\text{O}_3)\cdot\text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ або $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ та ін.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Мікронаповнювачі сприяють зменшенню деформацій усадки і набрякання, характерних при твердненні високодисперсної клінкерної частини цементу, можуть підвищувати стійкість цементного каменю проти дії агресивних чинників, знижують витрату цементу і вартість бетону.

Weaknesses. У зв'язку з тим, що механізм позитивного впливу повторної вібрації ще не зовсім з'ясований, через 1,5–2 г з моменту заповнення цементу водою відбувається:

- механічне руйнування оболонок новоутворень;
- оголюються нові поверхні цементних зерен;
- залучаються нові маси в процесі гідратації;
- збільшується кількість зв'язної води новоутвореннями;
- зміцнюється цементний камінь і адгезія по межах контакту його із заповнювачем.

Opportunities. Необхідно дослідити механізм позитивного впливу повторної вібрації при формуванні бетонних виробів.

Threats. Можливі додаткові затрати на матеріали та енергію. Наприклад, міцність зчеплення, як правило, зростає у міру збільшення в контактній зоні гідросилікатів кальцію типу CSH(B) з подальшим переходом в стійкішу форму тоберморита типу $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$, феритних і алюмоферитних гідрогранатів, гідросилікатів магнію. Якщо в продуктах гідратації портландцементу, межуючих з поверхнею карбонатного заповнювача, виявляється підвищений вміст вуглекислого газу CO_2 , то в поверхневих шарах карбонатних порід з'являється нова властивість. А саме – менша розчинність в соляній кислоті, оскільки виявляється велика кількість кремнезему, чим в звичайному об'ємі тієї ж породи.

8. Висновки

1. Досліджено вплив залізовміщуючого наповнювача на морозостійкість бетону. Встановлено, що введення залізовміщуючого наповнювача в бетон призводить до збільшення його морозостійкості на 15...40 %.

2. Досліджено вплив залізовміщуючого наповнювача на корозійну стійкість бетону. Встановлено, що введення залізовміщуючого наповнювача в бетон призводить до збільшення його корозійної стійкості на 25...40 %.

Література

1. Murthy A., Palani G., Iyer N. Impact Analysis of Concrete Structural Components // Defence Science Journal. 2010. Vol. 60, No. 3. P. 307–319. doi: <http://doi.org/10.14429/dsj.60.358>

2. Rana N., Tiwari A., Srivastava A. K. High performance concrete and its applications in the field of civil engineering construction // International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. Vol. 6, No. 3. P. 982–985.

3. Shyshkin O. O. Spetsialni betony dlia pidsylennia budivelnykh konstrukttsii, shcho ekspluatuiutsia v umovakh dii ahresyvnykh seredovyshch: monograph. Kryvyi Rih: Mineral, 2001. 113 p.

4. Iokhen Sh., Bernd V. Dolgovechnost' betona / ed. by Krivenko P. Kyiv: Oranta, 2004. 301 p.

5. Kryvenko P. V., Pushkarova K. K. Dovhovichnist shlakoluzhnoho betonu. Kyiv: Budivelnyk, 1993. 224 p.

6. Stark J. Alkali-Kieselsäure-Reaktion F. A. Finzer Institute für Baustoffkunde, 2008. 139 p.

7. Midness S., Young J. F., Darwin D. Concrete. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. P. 142–154.

8. Torrijos M. C., Giaccio G., Zerbino R. Internal cracking and transport properties in damaged concretes // Materials and Structures. 2010. Vol. 43, No. 1. P. 109–121. doi: <http://doi.org/10.1617/s11527-010-9602-z>

9. Ostertag C. P. Alkali silica reaction: effect of cracks on gel formation: proceedings // Concrete durability and service life planning. 2006. P. 112-118. doi: <http://doi.org/10.1617/291214390x.013>

10. Shishkin A. Study of the effect of compounds of transition elements on the micellar catalysis of strength formation of reactive powder concrete // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 2, No. 6 (80). P. 60–65. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.63957>

11. Copeland L. E., Bodor E., Chang T. N. Reaction of Tobermorite Gel with Aluminates, Ferrites and Sulphates // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1967. Vol. 9. P. 61–74.

12. Reschke T. Untersuchungen und Instandsetzung von Wasserbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind // Beton. 2004. Vol. 54, No. 1. P. 14-21.

13. Yasar E., Erdogan Y., Kilic A. Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength // Materials Letters. 2004. Vol. 58, No. 5. P. 772–777. doi: <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.06.004>

14. Kovernichenko L. M. Zapovniuvachi dlia betonu i vzaiemodiia yikh z vodoiu // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2017. No. 8. P. 103–110.