

УДК 691.5

## ПЕНЕТРАЦІЯ ХЛОРИД-ІОНІВ ІЗ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ У ЦЕМЕНТНІ МАТЕРІАЛИ

Д-р техн. наук О. С. Борзяк, асп. В. В. Журавель

## PENETRATION OF CHLORIDE IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS INTO CEMENT MATERIALS

Dr. Sc. (Tech.) O. Borziak, PhD student V. Zhuravel

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320834>



**Анотація.** Основною проблемою корозії залізобетонних конструкцій є проникнення хлоридів, які руйнують пасивуючий шар сталевий арматури та сприяють її електрохімічній корозії. У статті досліджено процес проникнення хлорид-іонів у цементні матеріали. Метою роботи є аналіз впливу карбонатних добавок на глибину дифузії хлорид-іонів і міцність цементних композитів. Зразки цементно-піщаного розчину з різними типами цементу (портландцемент СЕМ I і цемент із карбонатними добавками СЕМ II) витримували у трьох середовищах: морській воді, 0,1 М розчині NaCl і проточній воді. Після семи днів витримки зразки з цементу СЕМ II показали вищу міцність на вигин, ніж зразки з СЕМ I. Проте після 28 днів міцність зразків СЕМ I стала вищою, незалежно від середовища. Зразки з СЕМ II демонстрували стабільну міцність у морській воді, тоді як у проточній воді та розчині NaCl міцність децю знижувалася. Дослідження глибини проникнення хлоридів показали, що зразки з карбонатними добавками (СЕМ II) мають більшу глибину дифузії хлоридів порівняно зі зразками з чистого портландцементу (СЕМ I). Це можна пояснити збільшенням капілярної пористості цементних композитів через введення карбонатів. У морській воді дифузія хлоридів була менш інтенсивною через присутність інших іонів, які можуть перешкоджати їх проникненню.

Виявлено, що карбонатні добавки мають суперечливий вплив на властивості цементних композитів. З одного боку, вони сприяють зв'язуванню хлоридів у гідратні фази, а з іншого — збільшують проникність матеріалу через модифікацію порової структури.

**Ключові слова:** цементні матеріали, корозія арматури, пенетрація хлоридів, карбонатні добавки.

**Abstract** The main problem of corrosion of reinforced concrete structures is the penetration of chlorides, which destroy the passivating layer of steel reinforcement and promote its electrochemical corrosion. This is especially relevant for hydraulic structures, transport infrastructure and other objects in contact with sea water or road reagents containing chlorides. The article examines the process of chloride ion penetration into cement materials. Analysis of preliminary studies showed that carbonate additives can both reduce chloride penetration by binding and increase it by changing

*the porosity of the cement structure. The aim of the work is to analyze the effect of carbonate additives on the depth of chloride ion diffusion and the strength of cement composites. Experimental studies were carried out on cement-sand mortars (cement: sand ratio - 1:3, water-cement ratio - 0.5). Cement-sand mortar specimens with different types of cement (Portland cement CEM I and cement with carbonate additives CEM II) were cured in three environments: seawater, 0.1 M NaCl solution and running water. Tests were carried out after 7 and 28 days to determine the compressive strength, flexural strength and chloride penetration depth.*

*After 7 days of curing, specimens with CEM II cement showed higher flexural strength than specimens with CEM I. However, after 28 days, the strength of CEM I specimens became higher regardless of the environment. CEM II specimens demonstrated stable strength in seawater, whereas in running water and NaCl solution, the strength slightly decreased.*

*Studies of the chloride penetration depth showed that specimens with carbonate additives (CEM II) have a greater chloride diffusion depth compared to specimens made of pure Portland cement (CEM I). This is explained by an increase in capillary porosity of cement composites due to the introduction of carbonates. In seawater, chloride diffusion was less intense due to the presence of other ions that could hinder their penetration.*

*It was found that carbonate additives have a contradictory effect on the properties of cement composites. On the one hand, they promote the binding of chlorides into hydrated phases, and on the other hand, they increase the permeability of the material through modification of the pore structure.*

*Cement with carbonate additives (CEM II) has a higher initial strength, but after 28 days it is inferior to cement without additives (CEM I).*

*Carbonate additives increase the permeability of concrete for chlorides due to modification of the pore structure.*

*Protection against chloride diffusion can be improved by using nanodispersed additives and optimizing the particle size distribution of cementitious materials.*

**Keywords:** *cement materials, reinforcement corrosion, chloride penetration, carbonate additives.*

**Вступ.** Корозія є процесом руйнування матеріалів у результаті їхньої реакції з навколишнім середовищем і одним з основних факторів, що впливають на довговічність інженерних конструкцій. Однією з найважливіших переваг залізобетону порівняно з металами та іншими матеріалами є його висока корозійна стійкість. Бетон і залізобетон є довговічними матеріалами, якщо правильно підібраний склад композита, застосовані відповідна технологія виготовлення та ефективні захисні заходи.

Найбільш поширеними випадками корозійного пошкодження залізобетонних конструкцій є корозія сталевих арматур. Корозія сталі відбувається внаслідок впливу хлоридного середовища або в результаті карбонізації бетону, морозного руйнування бетону, у тому числі за посиленої

присутності солі, пошкодження бетону внаслідок капілярної абсорбції соляних розчинів і випаровування. Реальні умови експлуатації конструкції зазвичай пов'язані з наявністю декількох агресивних факторів.

Гідротехнічні морські споруди, такі як причали, хвилерізи, мости і бурові платформи, постійно зазнають впливу солоної води, багатой на хлориди, яка проникає в бетонні і сталеві елементи, викликаючи їх руйнування. Це явище сприяє значному скороченню терміну експлуатації таких об'єктів, що у свою чергу збільшує витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Так само транспортні споруди, як і мости, віадуки та дороги, особливо ті, що використовують узимку, регулярно зазнають впливу дорожньої солі, яка містить хлориди. Використання протиожеледних

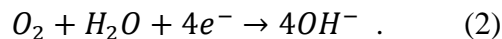
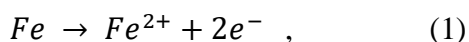
матеріалів, що містять хлориди, для доріг, хоч і є необхідним заходом для забезпечення транспортної безпеки, призводить до інтенсивної корозії елементів сталевих конструкцій, а також пошкодження бетонних поверхонь, що негативно позначається на довговічності всієї інфраструктури.

Розуміння механізмів хлоридної корозії та розроблення відповідних методів захисту є ключовим завданням у контексті їхньої довговічності та безпеки експлуатації.

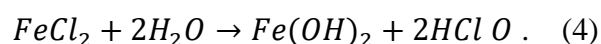
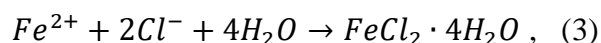
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хлориди в поєднанні з карбонізацією є двома основними факторами, які ініціюють депасивацію захисного шару арматури в залізобетоні, що призводить до її корозії [1]. Інфільтрація хлоридів є важливою причиною руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій. Дія хлоридів викликає значні втрати арматури, пластичності, міцності арматурної сталі та контакту між сталлю і бетоном, а також зниження здатності розсіювати енергію через безперервне старіння та деградацію в корозійному середовищі протягом тривалого часу експлуатації. Цей вплив набагато сильніший у морському середовищі через інтенсивність вологості та концентрацію хлоридів у морській воді та повітрі.

Сталі для армування і попереднього напруження піддають корозії внаслідок карбонізації та впливу іонів хлоридів. Бетон є проникним матеріалом, де агресивні агенти шляхом дифузії (теоретично) досягають арматурної сталі, викликаючи її депасивацію і корозію, за наявності води і кисню [2].

Корозія сталі в бетоні має електрохімічну природу і складається з двох реакцій [3]. На аноді залізо вивільняє електрони та розчиняється у двовалентному стані. Ці електрони мігрують до катода, де відбувається відновлення кисню в присутності кисню:



Наявність у рідкій фазі бетону хлорид-іонів значно пришвидшує корозію арматурної сталі. Роль іонів хлориду в анодній і катодній реакціях показано в рівняннях нижче. Ці рівняння показують, що іони хлориду не беруть участі в реакції, але вони відіграють важливу роль, оскільки каталізують реакції корозії та діють як носії, що транспортують продукт корозії [4]:



Початок явища корозії пов'язаний з активністю хлоридів, які проникають глибоко в бетон, поки концентрація хлоридів не досягне арматурного стрижня і не перевищить порогове значення. Наявність іонів хлориду в залізобетоні викликає руйнування пасивуючого шару арматурних стрижнів, зниження рН порового розчину, оскільки знижується розчинність гідроксиду кальцію, підвищення вологості за рахунок абсорбційних властивостей солей у бетоні, підвищення електропровідності бетону.

Вільні іони хлориду в поровому розчині відповідають за початок і поширення корозії, тоді як зв'язані хлориди можна вважати нешкідливими.

Отже, одним із способів зменшення дифузії хлорид-іонів углиб бетону є їх зв'язування в стабільні продукти гідратації. У роботах [5, 6] розглянуто теоретичну можливість впливу зв'язування хлоридів на швидкість їх проникнення. Іони хлориду у звичному цементному камені асоціюються з продуктами гідратації портландцементу і в такий спосіб змінюють його мінералогію. Як показано в роботі [7], транспорт хлоридів через цементні матеріали визначено явищами розчинення портландиту і осадження мінералів на основі хлоридів, а саме солей Фріделя та Куазеля.

У цементних системах тверді фази складаються переважно з портландиту і гелеподібної фази, гідрату силікату кальцію, позначеного як C-S-H. Оксид алюмінію поєднується з водою, кальцієм і сульфатом, утворюючи фази AFt і AFm. Цементні пасти містять приблизно 5-15 % (AFm+AFt).

Іони хлориду, які надходять у цементну систему через воду для замішування або з утилітарного середовища, витісняють сульфати з моносольфоалюмінату, утворюючи в такий спосіб сіль Кузеля за нижчих концентрацій хлориду та сіль Фріделя за вищих концентрацій. Вивільнені сульфат-іони реагують із кальцієм і алюмінієм. Це призводить до утворення еtringіту, який зазвичай викликає розширення об'єму, але також закриває пори. За наявності гідрокарбоалюмінатів хлорид-іони витісняють карбонат із монокарбоалюмінатної фази і в такий спосіб утворюють сіль Фріделя [7, 8].

Вивченню впливу карбонатних домішок на зв'язування іонів хлору в цементних системах присвячені роботи [8-11]. Ці дослідження підтверджують, що системи, які містять карбонати, мають підвищену здатність зв'язувати хлориди. Карбонати гальмують потенційно експансивні реакції проникнення хлориду, але водночас знижують загальну здатність зв'язувати хлориди та збільшують співвідношення  $Cl^-/OH^-$  у воді [7].

У різних літературних джерелах є суперечливі відомості про вплив карбонатних добавок на проникнення хлоридів у бетон.

Карбонати часто використовують як компонент бетону. Одним із них є вапняковий пил, який походить переважно із заповнювачів, отриманих із осадочних гірських порід. Він служить заміною дрібного заповнювача [12]. Випробування, проведені на проникнення іонів хлориду в бетон із використанням вапнякового пилу, показують, що чим більше вапнякового порошку в бетоні, тим швидше в нього

проникають іони хлориду. Вапняковий порошок збільшує вміст капілярних пор, що є основним фактором, який впливає на швидкість дифузії хлорид-іонів у бетоні [12].

Інші ж дослідження [17] показали, що проникнення іонів хлориду в бетон значно знижується за використання мінеральних добавок, зокрема карбонатів кальцію.

У зв'язку з тим, що дані про вплив карбонатів на проникнення хлоридів суперечливі, доцільним є проведення експериментальних досліджень впливу мінерального складу цементу, а саме наявності карбонатних мінеральних добавок на глибину пенетрації хлорид-іонів у цементні композити.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета роботи – дослідження впливу карбонатних добавок на глибину дифузії хлорид-іонів і міцність цементних композитів. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання: розроблення методики експериментальних досліджень; виготовлення зразків цементних композитів із використанням двох типів цементів – портландцементу СЕМ I 42.5R і портландцементу з добавкою вапняку СЕМ II/A-LL 42.5; визначення міцності на вигин і стиск і визначення глибини проникнення хлорид-іонів зразків цементних композитів, витриманих у середовищах із різною концентрацією хлоридів; аналіз отриманих результатів дослідження.

**Основна частина дослідження.** У дослідженні використовували два типи цементів:

- портландцемент без добавок за стандартом EN 197-1 СЕМ I 42.5 R, позначений як СЕМ I;

- портландцемент із добавкою вапняку за стандартом PN-B 19707 СЕМ II/A-LL 42.5 R-NA, позначений як СЕМ II.

Досліджуваним матеріалом є цементно-піщані розчини, рецептура приготування яких відповідає EN 196-1 [13] у таких пропорціях: цемент : пісок – 1 : 3; В/Ц – 0,5.

Для проведення подальших випробувань міцності на згин і стиск і перевірки глибини проникнення хлорид-іонів були виготовлені зразки-балочки розмірами 40x40x160 мм відповідно до рекомендацій стандарту EN 196-1.

У зв'язку з тим, що залізобетонні конструкції використовують у різних типах середовищ, а одним з основних факторів, що руйнують ці конструкції, є корозія арматурної сталі, викликана хлоридами, зразки були поміщені для витримки в середовищах із різною концентрацією хлоридів.

Лабораторні випробування конструкцій, що використовують у морських умовах, часто проводять із використанням розчинів NaCl для наближення до морських умов. Однак морська вода, крім хлоридів натрію, також містить інші іони, такі як сульфати, карбонати і магній, які можуть впливати на проникнення хлоридів. Тому для порівняння як одне середовище була використана морська вода з Балтійського моря. Середня солоність прибережних вод Балтійського моря [NaCl] становить близько 5,1 г/дм<sup>3</sup>, що за молярної маси 58,5 г/моль

відповідає молярній концентрації 0,1 М [14-15].

Друге середовище, створене для зразків, було середовищем із подібними умовами солоності з використанням кристалічної солі з чистотою 95 %. Концентрація цього розчину становила 0,1 М [15].

Третім середовищем, у якому витримували зразки, було вибрано звичайну проточну воду, щоб виключити присутність у цій воді хлоридів і порівняти фізичні властивості зразків.

Дослідження проводили у два етапи через 7 і 28 днів. На кожній стадії тестували три зразки, що містять певний цемент, і з кожного середовища, у якому вони були витримані.

Визначення міцності на вигин і стиск зразків проводили відповідно до стандартів EN 196-1:2016-07 за допомогою випробувальної машини Walter + bai (Löhnigen, Швейцарія).

На рис. 1 і 2 наведено результати визначення міцності на вигин і стиск зразків цементно-піщаного розчину, витриманих у проточній і морській воді та розчині хлориду натрію.

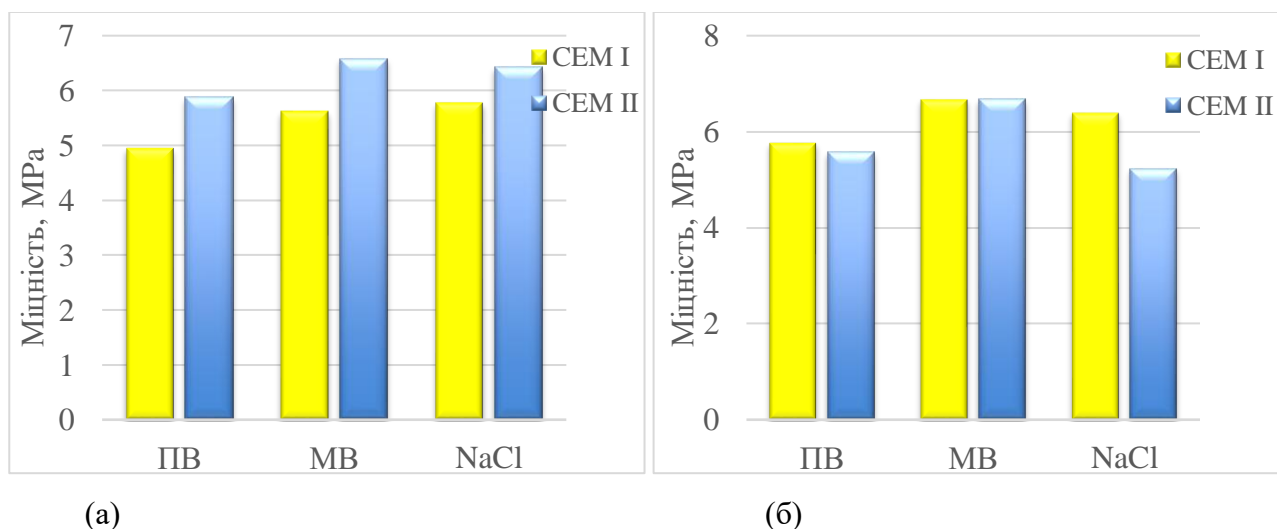
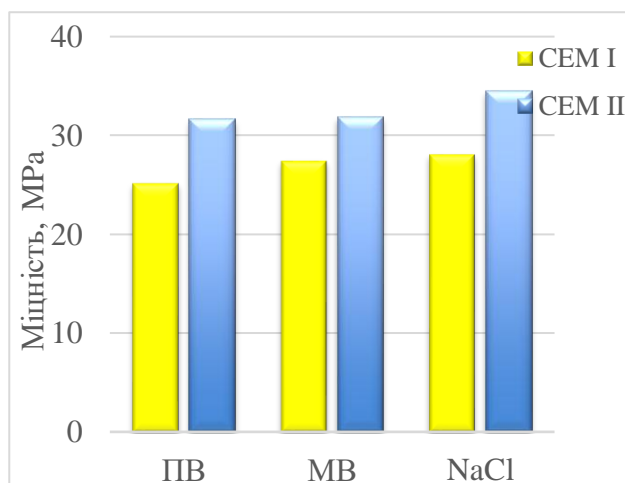
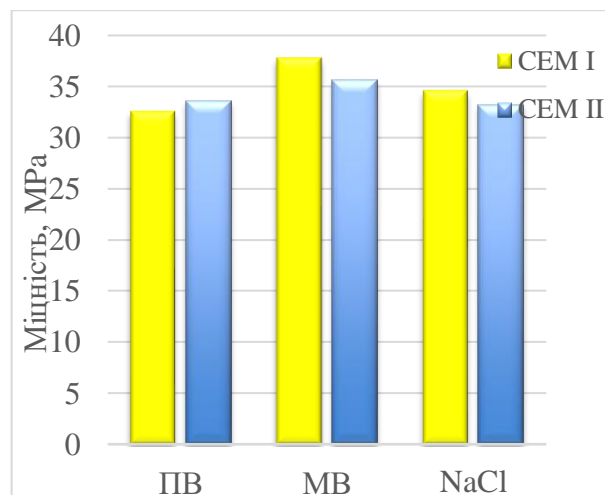


Рис. 1. Міцність на вигин зразків цементно-піщаного розчину у віці 7 (а) і 28 (б) діб, які витримували у проточній (ПВ) і морській (МВ) воді та розчині хлориду натрію (NaCl)



(а)



(б)

Рис. 2. Міцність на стиск зразків цементно-піщаного розчину у віці 7 (а) і 28 (б) діб, які витримували у проточній (ПВ) і морській (МВ) воді та розчині хлориду натрію (NaCl)

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що після 7 днів у кожному середовищі для зразків із СЕМ II характерна вища міцність на вигин, ніж для зразків із СЕМ I. Однак через 28 днів тенденція є абсолютно протилежною. Міцність на вигин зразків СЕМ I закономірно змінюється з часом, незалежно від умов витримки. Міцність на вигин зразків СЕМ II після 28 діб витримки в морській воді практично не змінилася порівняно з міцністю через сім діб, а в простій воді та 0,1 М розчині солі навіть знизилася.

Подібно до міцності на вигин, міцність на стиск зразків СЕМ I закономірно змінюється з часом, незалежно від умов твердіння. У всіх рідких середовищах зразки з СЕМ II у віці семи днів, мають вищу міцність, ніж зразки з СЕМ I.

Загалом за даними випробувань встановлено, що карбонатні добавки знижують міцність цементно-піщаного розчину відносно міцності зразків без добавок. Зразки, які були піддані впливу розчину солі, мають вищу міцність на вигин порівняно зі зразками у воді.

Однак, як відомо, хлориди насправді не істотно впливають на міцність цементних

композитів. Іони хлору набагато небезпечніші для арматурної сталі. Тому дослідження глибини проникнення іонів хлору вглиб цементно-піщаних розчинів є більш важливими.

Метод визначення глибини проникнення хлоридів углиб матеріалу заснований на осадженні хлор-іонів 0,025 н. водним розчином нітрату срібла ( $\text{AgNO}_3$ ) [16]. Глибина проникнення хлоридів – це товщина шару розчину, на якому утворився світлий наліт. Для дослідження глибини дифузії іонів хлору зразки розколювали, а на відколену поверхню наносили водний розчин нітрату срібла. Випробування проводили після 7 і 28 витримок зразків у середовищах. Результати є середнім арифметичним вимірювання глибини проникнення хлоридів у двох напрямках. На рис. 3 подано результати дослідження глибини penetрації хлорид-іонів вглиб зразків цементно-піщаного розчину.

У середовищі з концентрацією 0,1 М проникнення відбувається набагато швидше через сім днів, ніж у морському середовищі. Можливо, це пов'язано з тим, що морська вода містить сполуки, які перешкоджають дифузії хлоридів у бетон.

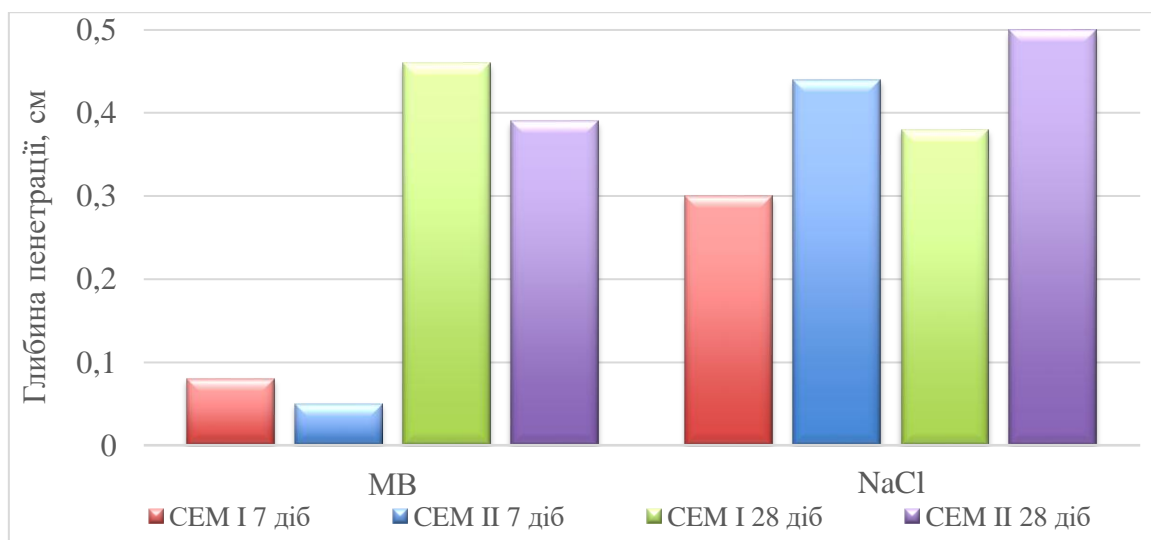


Рис. 3. Глибина penetрації хлорид-іонів вглиб зразків цементно-піщаного розчину у віці 7 і 28 діб, які витримували в морській воді (MB) і розчині хлориду натрію (NaCl)

За результатами дослідження, глибина проникнення іонів хлору збільшується з додаванням карбонатних добавок. Ці результати не збігаються з попередніми теоретичними припущеннями. Подібні результати отримані в роботі [12]. Такий вплив карбонатів на глибину дифузії хлоридів у роботах [12, 17] пояснюють перерозподілом розмірів пор. Отже, глибина дифузії хлоридів насамперед визначена формою і розміром пор. Більш ефективним у захисті від проникнення агресивного середовища буде реалізація підходу, заснованого на оптимізації гранулометричного складу компонентів цементної композиції.

**Висновки.** Результати досліджень показали, що мінеральний склад цементу і хімічний склад середовища, у якому зберігали зразки, впливають на міцнісні властивості цементно-піщаних розчинів і глибину проникнення хлорид-іонів. Після семи днів твердіння зразки цементно-піщаного розчину на основі портландцементу з добавкою вапняку показали значно більшу міцність порівняно зі зразками на основі портландцементу без

добавок. Це узгоджується з літературними даними про можливість утворення кристалічних продуктів гідратації на ранніх стадіях, так званих фаз AFt і AFm.

Як показали дослідження, заміна частини в'язучого на карбонатні добавки без урахування їхньої дисперсності не знижує проникність бетону для іонів хлориду.

Дифузія іонів хлору відбувається через систему пор і капілярів. Для цементних композитів із підвищеною пористістю запропонований вміст карбонатних добавок недостатній для зв'язування великої кількості хлорид-іонів у стабільні продукти гідратації. Цементні композити зі зниженою проникністю для агресивних середовищ повинні мати структуру, оптимізовану шляхом варіювання гранулометричного складу та електричних властивостей поверхні компонентів. Заплановано подальше проведення досліджень щодо модифікації структури цементних композитів нанодисперсними добавками. Введення в такі композити карбонатних добавок буде ефективним захистом від дифузії хлорид-іонів.

Список використаних джерел

1. Agboola O., Kupolati K. W., Fayomi O. S. I. A Review on Corrosion in Concrete Structure: Inhibiting Admixtures and Their Compatibility in Concrete. *J Bio Tribo Corros.* 2022, **8**, 25. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00624-2>.
2. Vaysburd A. M., Emmons P. H. How to make today's repairs durable for tomorrow — corrosion protection in concrete repair. *Construction and Building Materials.* 2000, Vol. 14, Issue 4, 189-197. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00022-2).
3. Broomfield J. P. (2023). Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>.
4. Neville A. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures.* 1995, **28**, 63–70. <https://doi.org/10.1007/BF02473172>.
5. Glass G. K., Buenfeld N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science.* 2000, **42(2)**, 329–344. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X97000097?via%3Dihub>.
6. De Weerd K. Chloride binding in concrete: recent investigations and recognised knowledge gaps: RILEM Robert L'Hermite Medal Paper. *Mater Struct.* 2021, **54**, 214. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01793-9>.
7. Cherif R., El Almine Hamami A., Ait-Mokhtar A., Bosschaerts W., Thermodynamic equilibria-based modelling of reactive chloride transport in blended cementitious materials. *Cement and Concrete Research.* 2022, **156**, 106770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106770>.
8. Balonis M., Lothenbach B., Le Saout G., Glasser F. P. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research.* 2010, Tom 40, Numer 7, 1009-1022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461000058X?via%3Dihub>.
9. Zhijian Chen and Hailong Ye. Influence of metakaolin and limestone on chloride binding of slag activated by mixed magnesium oxide and sodium hydroxide. *Cem. and Concr. Compos.* 2022, **127**, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104397>.
10. Chepurna S., Borziak O., Zubenko S. Concretes, Modified by the Addition of High-Diffused Chalk, for Small Architectural Forms. *MSF.* 2019, **968**, 82–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.82>.
11. Borziak O., Zhuravel V., Hudymenko M. The influence of chloride ion diffusion on the structure of cement composites containing carbonate additives. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024, **1376**, 012023. DOI 10.1088/1755-1315/1376/1/012023.
12. Kępciak M., Woyciechowski P., Łukowski P., Kuziak J., Kobyłka R. The Durability of Concrete Modified by Waste Limestone Powder in the Chemically Aggressive Environment. *Materials.* 2019, **12**, 1693. <https://doi.org/10.3390/ma12101693>.
13. ДСТУ EN 196-1:2007. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT)
14. Borowski T., Hryniewicz T. Spadek zasolenia Morza Bałtyckiego jako naturalne zjawisko. *Rocznik Ochrona Srodowiska.* 2004, 223-232.
15. De Weerd K., Lothenbach B., Geiker M. R. Comparing chloride ingress from seawater and NaCl solution in Portland cement mortar. *Cement and Concrete Research.* 2019. Vol. 115. P. 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.014>.
16. Real L. V., Oliviera D. R. B., Soares T., Medeiros M. H. F. AgNO<sub>3</sub> spray method for measurement of chloride penetration: the state of art. *Rev. ALCONPAT* [online]. 2015, Vol. 5, n. 2. P. 151-161. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>.



17. Ngala V. T. and Page C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cem. and Concr. Res.* 1997, **27(7)**, 995–1007. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884697001026>.

---

Борзяк Ольга Сергіївна, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936.

E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Журавель Віталій Вікторович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1348-6631.

E-mail: 1987robota@gmail.com.

Borziak Olga, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Zhuravel Vitalii, postgraduate student, Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1348-6631. E-mail: 1987robota@gmail.com.

Статтю прийнято 11.12.2024 р.