

УДК 624.017

ОСОБЛИВОСТІ КОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАЛІЗОБЕТОНУ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ І СПОСОБИ ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД

В.Д. Макаренко¹,
д-р техн. наук, професор

В.І. Гоц¹,
д-р техн. наук, професор

А.А. Майстренко¹,
д-р техн. наук, професор

В.П. Азутов¹,
д-р техн. наук, професор

О.Е. Чигиринець²,
д-р техн. наук, професор

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

²Національний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.255-264

В статті розглянуті питання виготовлення бетону високої корозійної стійкості в найбільш розповсюджених середовищах і в сульфатних, хлоридних, кислих і ін. Показано що корозійна стійкість бетону визначається двома головними показниками – незначною проникливістю для агресивного середовища і позитивною реакційною здатністю з компонентами агресивного середовища наведені кількісні значення названих показників Використання бетонів високої корозійної стійкості дозволяє створити бетонні і залізобетонні конструкції з високою довговічністю в агресивних середовищах без застосування додаткового (вторинного) захисту від корозії. Встановлена максимально допустима концентрація хлоридів в агресивних середовищах експлуатації бетону, зокрема при товщині захисного шару бетону в зоні арматури, максимальна концентрація хлоридів відповідно в середньому складає 1300 1850 і 2700 мг/дм³. Крім того, ці величини можуть змінюватися в залежності від коефіцієнту дифузії хлор-іонів. Показано, що зі зміною рН середовища (від 3.5 до 1.0), яке контактує з арматурою бетону, швидкість корозії бетону змінюється відповідно від 0.3 до 20 мм/рік. Сутність корозійних процесів в сульфатному середовищі полягає в структурі бетону, гіпсу і гідросульфаталюмініатів зі збільшенням об'ємом твердих фаз, що спричиняє появу внутрішніх напружень, перевищуючих міцність бетону, що веде неминуче до руйнування бетону. Сульфатна корозія спостерігається при дії різних розчинів сульфатів чи при застосуванні заповнювачів, які містять домішки гіпсу (сульфідвмісний заповнювач в бетоні). Класичними заходами попередження сульфатної корозії є використання сульфатостійких цементів, які містять невелику кількість алюмініатів і трикальцієвого силікату, використання мінеральних домішок, зв'язуючих гідроксид кальцію цементного каменя в низькоосновні силікати кальцію. Ефективним засобом захисту від сульфатної корозії є зниження проникності бетону для іонів SO₄²⁻, що надходять із агресивного середовища. Досягається це вводом комплексів домішок в склад бетону, в тому числі водоредукуючих і мінеральних. Прикладом може служити використання модифікаторів бетону серії МБ. Такі подібні комплекси дозволяють отримувати високо сульфатостійкі бетони на рядових середньоалюмініатних портландцементних, що виключає необхідність застосування дефіцитного сульфатостійкого портландцементу, що забезпечує високу корозійну стійкість бетону. Підвищення марки бетону по водонепроникності до W8 і вище попереджує корозійні ушкодження бетону. Однак, це відноситься до сильно розбавлених розчинів кислот. У рядових бетонів марок по водонепроникності W4 помітна корозія спостерігалася при рН 6.5 і нижче, у бетонів особливо низької проникності марок W10 – W12 – при рН 3.5 і нижче. В останні десятиріччя увагу дослідників привертають два деструктивні процеси – пізні утворення етtringиту і таумаситу. Пізні утворення етtringиту (в затверділому бетоні) у відсутності впливу агресивного сульфатного середовища спостерігали в цементних бетонах при незбалансованому вмісті в цементі алюмініатів і сульфатів. У випадку, коли бетон твердіє при підвищеній температурі утворюється переважно моносульфатна форма гідросульфаталюмініату. У наступному моменті моносульфатна форма може перетворюватися в трьохсульфатну з приєднанням додаткової кількості води і збільшенням об'єму.

Ключові слова: сульфатна корозія, хлориди, кислоти, руйнування, бетонні споруди.

Актуальність теми та формулювання проблематики

В роботі розглянута довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій, які є основними елементами стійкого розвитку конструкційного бетону, який сприяє технологічній екологізації розвитку будівельних споруд [1-22]. Питання корозійної стійкості бетону є важливою складовою цієї проблеми. В даній статті буде зроблена спроба узагальнити деякі сторони задачі

– виробництва бетонів високої корозійної стійкості. Коротко розглядаються види корозійних впливів на бетон і залізобетон і способи підвищення корозійної стійкості.

Агресивні середовища, що впливають на бетонні і залізобетонні конструкції, класифікують по ряду ознак [3-8]:

- ступені агресивного впливу на бетон і залізобетон: неагресивні, слабо агресивні, середнє агресивні, сильно агресивні;
- фізичний стан – газів, рідин, тверді;
- хімічний склад – органічні і неорганічні, кислотні, солі, луги, які кристалізуються зі збільшенням об'єму, біологічно активні і ін.

Окрім того, в конкретних умовах експлуатації на бетон можуть впливати деякі фізичні процеси – зокрема, температура навколишнього середовища ($-30...+40^{\circ}\text{C}$). Слід відмітити, що бетон може ушкоджуватися без дії зовнішнього середовища - в результаті взаємодії лугів цементу і домішок з реакційно здатним діоксидом кремнію заповнювачів, пізнього утворення етtringиту і тауманситу.

В роботі детально розглянуто принципи створення бетону високої корозійної стійкості, що дозволяє будувати споруди довговічні з високою експлуатаційною надійністю. Показано, що корозійна стійкість бетонів визначається двома основними показниками – проникливістю для агресивного середовища і здатністю цементного каменю і заповнювача вступати в хімічну взаємодію з компонентами агресивного середовища [18-22]. Низька проникливість бетону забезпечується комплексом заходів і застосуванням водоредукуючих і гідрофобізуючих домішок, назначенням відповідного гранулометричного складу інгредієнтів (заповнювачів) бетону і мінеральних домішок, які забезпечують отримання структури бетону з мінімальним об'ємом і мінімальними розмірами пор і капілярів, ефективним ущільненням бетонної суміші, а також оптимальними режимом твердіння.



Рис. 1. Ушкодження стиків з'єднань залізобетонних плит морського причалу

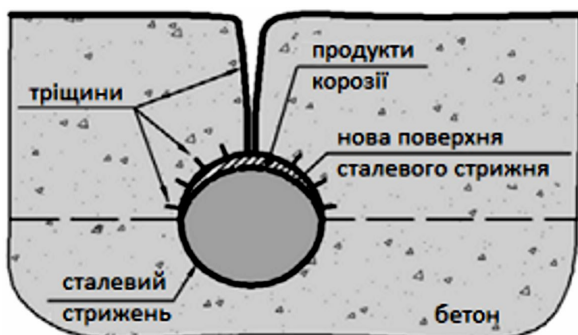


Рис. 2. Утворення мікротріщин та продуктів хлоридної корозії на межі “арматура-бетон”

Приклад ушкодження арматури залізобетонних конструкцій морського причалу наведений на рис. 1.

На рис. 2 приведений фрагмент зародження хлоридної корозії на границі арматури з бетоном.

Перенос агресивних середовищ в пористому тілі бетону забезпечується по механізму в'язкої течії під дією градієнту тиску і капілярних сил і по механізму дифузійного переносу при появленні градієнту концентрації агресивної речовини [8-13]. При цьому зі зменшенням пористості бетону відносна частка речовини, що переноситься по механізму в'язкої течії, починає переважати дифузійний перенос, тобто загальний об'єм перенесеної речовини зменшується. В бетоні з переважанням мікроскопічних пор основний об'єм речовини переноситься по механізму дифузії, при цьому на дифузійний перенос суттєво впливає заряд поверхневої пори, який залежить від речовинного складу цементного каменю. Від'ємний заряд поверхні цементного каменю ускладнює перенос агресивних аніонів – сульфатів і хлоридів [18, 19].

Ціллю роботи було дослідження корозійних процесів бетону і залізобетону в різних хімічно-агресивних

середовищах та пошук шляхів захисту від корозійних руйнувань будівельних споруд.

Результати досліджень і їх обговорення

Сульфатні середовища

Сутність корозійних процесів в сульфатному середовищі полягає в структурі бетону, гіпсу і гідросульфоалюмінатів зі збільшеним об'ємом твердих фаз, що спричиняє появу внутрішніх напружень, перевищуючих міцність бетону, що неминуче веде до руйнування бетону. Сульфатна корозія спостерігається при дії різних розчинів сульфатів чи при застосуванні заповнювачів, які містять домішки гіпсу (сульфидовмісний заповнювач в бетоні). Згідно ГОСТ8267 «Щебінь і гравій із щільних гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови» [20-21] сульфати і сульфідиди віднесені до нешкідливих домішок в заповнювачах бетону. Класичними заходами попередження сульфатної корозії є використання сульфатостійких цементів, які містять невелику кількість алюмінатів і трьохкальцієвого силікату, використання мінеральних домішок, зв'язуючих гідроксид кальцію цементного каменя в низькоосновні силікати кальцію. Сульфатостійкі цементи, особливо без мінеральних домішок, які виявляються дефіцитними. Додавання мінеральних домішок має і негативні наслідки – зниження морозостійкості і стійкості бетону в умовах змінної вологості і висушування. Спостерігалось глибоке луцення бетону морських причалів, зведених із залізобетону на пуцолановому цементі [18-20].

Ефективним засобом захисту від сульфатної корозії є зниження проникності бетону для іонів SO_4^{2-} , що надходять із агресивного середовища. Досягається це вводом комплексів домішок в склад бетону, в тому числі водоредукуючих і мінеральних. Прикладом може служити використання модифікаторів бетону серії МБ [21]. Такі і подібні комплекси дозволяють отримувати високо сульфатостійкі бетони на рядових середньоалюмінатних портландцементях, що виключає необхідність застосування дефіцитного сульфатостійкого портландцементу, що забезпечує високу корозійну стійкість бетону.

В останні десятиріччя увагу дослідників привертають два деструктивні процеси – пізне утворення етtringиту $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 32 H_2O$ і таумаситу $Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot (CO_3)_2 \cdot 24H_2O$. Огляд вітчизняних і зарубіжних робіт [18-21] з питань утворення етtringиту і таумаситу, наведений в джерелах [19,20]. Пізне утворення етtringиту (в затверділому бетоні) у відсутності впливу агресивного сульфатного середовища спостерігали в цементних бетонах при незбалансованому вмісті в цементі алюмінатів і сульфатів (надлишок сульфатів). У випадку, коли бетон твердів при підвищеній температурі утворюється переважно моносульфатна форма гідросульфоалюмінату. У наступному моменті моносульфатна форма може перетворюватися в трьохсульфатну з признанням додаткової кількості води і збільшенням об'єму. Так, ушкодження бетону внаслідок пізнього утворення етtringиту спостерігали у масивних конструкціях, в яких в початковий період твердіння внаслідок екзотермічних процесів температура підвищується до 80-90°C, при цьому відмічалась негативна роль підвищеного вмісту лугів в цементі [15-18].

В порівнянні з етtringитом таумасит утворюється в більш пізні терміни як для нормальних так і невисоких позитивних температурах В утворенні таумаситу крім сульфатів приймають участь карбонат-іони, які поступають в бетон із підземних вод, CO_2 повітря, карбонати зі складу заповнювачів і мінеральні домішки. Етtringит і таумасит в структурі цементного каменя

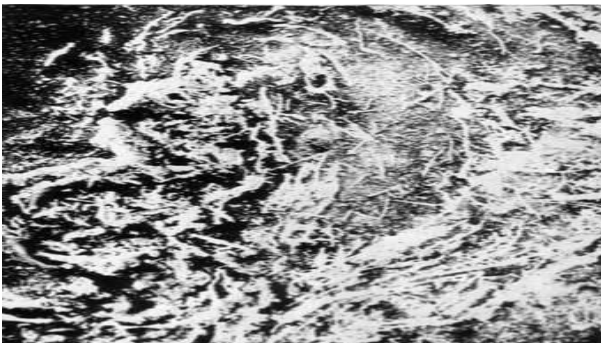


Рис. 3. Сліди карбонізації захисного шару арматури залізобетонних конструкцій (x10)

важко розрізнити навіть на рентгенограмах При наявності карбонат-іонів етtringит може заміщуватися таумаситом. Таумасит може утворюватися в бетоні навіть після утворення в ньому тріщин [16-21]. На рис. 3 наведені зображення продуктів ушкодження захисного шару арматури в бетоні.

Для попередження сульфатної корозії бетону НДІ ЗБ розробив і включив в БП28.13330 нормування виду цементу і проникності бетону (табл. 1).

Таблиця 1

Ступінь агресивного впливу різних сульфатних середовищ на бетоні (W4) і бетоні особливо низької проникності (W16-W20) [20, 21]

Група цементів по сульфат стійкості по ГОСТ Р566687	Вид цементу	Вміст сульфатів в різному середовищі в перерахунку на іони SO_4^{2-} , мг/дм ³	Вміст сульфатів в різному середовищі в перерахунку на іони SO_4^{2-} , мг/дм ³
		W4	W16 – W20
I	Портландцемент по ГОСТ 10178 ГОСТ 31108	≥ 250 до 500	≥250-2500
		≥ 500 - 1000	≥2500 - 5000
		≥ 1000	≥ 5000
II	Портландцемент по ГОСТ 10178 ГОСТ 31108 із вмістом в клінкері C_3S не більше 65% C_3A не більше 7% $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_3\text{AF}$ не більше 22% і портландцемент	1500 - 3000	8000 - 9000
		3000 - 4000	9000 - 10000
		≥ 4000	≥ 10000
III	Сульфатостійкі цементы по ГОСТ 22206	3000 - 6000	12000 - 15000
		6000 - 8000	15000 - 20000
		≥8000	≥ 20000

Примітка: Ступінь агресивного впливу середовища на бетон – середньоагресивний.

Хлоридні середовища

Хлориди небезпечні агресивним впливом на сталеву арматуру. Проникаючи в бетон з шкідливими матеріалами, а також з навколишнього середовища, вони спричиняють десипацію і корозію сталевих арматур. З підвищенням вологості і температури середовища швидкість дифузії хлоридів в бетоні збільшується, що характерно для розчинів з жарким і вологим кліматом. Відомо [3-6], що зі зміною вологості і температури в останні 100 років термін служби залізобетонних конструкцій зменшився на 2.9 – 10.2 роки. Деяка кількість хлоридів може потрапити в бетон з вихідним матеріалом – цементом, заповнювачами, водою для виготовлення розчину, домішками. Корозія починається у випадку, коли кількість хлоридів в кожному з перерахованих матеріалів досягає гранично допустимої величини для кожного матеріалу, тобто кількості дозволеної нормами ДП 28.13330 “Захист будівельних конструкцій від корозії [17-20]”.

В бетоні на алітовому, середне- і високоалюмінатному портландцементі, корозія сталевих арматур починається при вмісті хлоридів більш високому, ніж це вказано в ДП 28.13330 [11]. При карбонізації бетону зменшується кількість зв'язаних хлоридів, одночасно зменшується рН бетону, що спонукає дію хлоридів на арматуру. З цього слідує чекати, що в хлоридних середовищах карбонізація захисного шару бетону на поверхні арматури повинна бути виключена.

Основним засобом захисту сталевих арматур від хлоридної корозії в бетоні є призначення нормованих значень проникності і товщина захисного шару. Відповідні характеристики для умов експлуатації в зоні змінного горизонту мінералізованої води наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Максимально допустима концентрація хлоридів в умовах дії рідких хлоридних середовищ на сталеву арматуру залізобетонних конструкцій

Товщина захисного шару бетону, мм	Максимально допустима концентрація хлоридів, мг/дм ³ , в середовищі експлуатації для бетону з коефіцієнтом дифузії, см ² /с		
-	$\leq 5 \cdot 10^{-12}$ - $1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$ - $5 \cdot 10^{-13}$	$\leq 5 \cdot 10^{-13}$
20	500	1300	4100
30	700	1850	8300
50	1000	2700	18000

Відомий спосіб первинного захисту - застосування домішок-інгібіторів корозії сталі в бетоні - має обмежений термін дії (що обумовлено можливістю розчинення і вносу інгібітора з бетону) зміною хімічного складу (наприклад нітриту в нітрат) і невисокий захисний ефект. При використанні інгібіторів може збільшуватися критична кількість хлоридів в зоні сталеві арматури в залежності від виду інгібітора, що може складати до 2 раз [12]. Схематичне зображення корозії арматури в бетоні наведено на рис. 4.

На рис. 5 показані результати дослідження глибини хлоритизації бетону в залежності від вмісту хлоридів в агресивному середовищі.

На рис. 6 наведена залежність швидкості корозії арматурного стрижня в залежності від концентрації в розчині хлоридів.

Результати механічних випробувань зразків арматури показані на рис. 7.

За необхідності виконується додатковий (вторинний) захист. В нормальних середовищах він полягає в ізоляції поверхні бетону нормальними лакофарбовими покриттями, ущільнюючим просоченням і іншими аналогічними засобами. Маючи високу ефективність в початковий період експлуатації такі види захисту з певним терміном застосування пошкоджуються і вимагають відновлення, що не завжди можливо, наприклад, в конструкціях річкових та морських споруд. Слід зауважити, що хлоридна корозія повністю виключена при використанні композитної неметалевої арматури. Цей напрямок потрібно активно розвивати в нашій країні [19, 21].

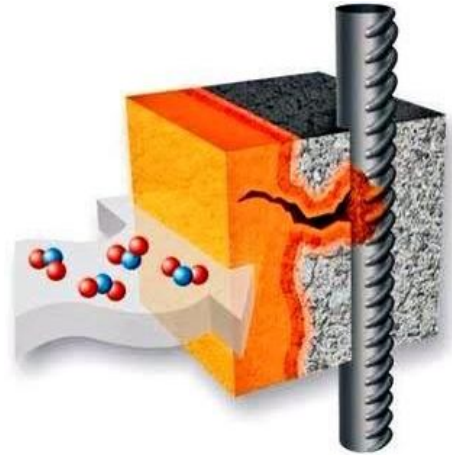


Рис. 4. Схематичне зображення виникнення корозії арматурної сталі

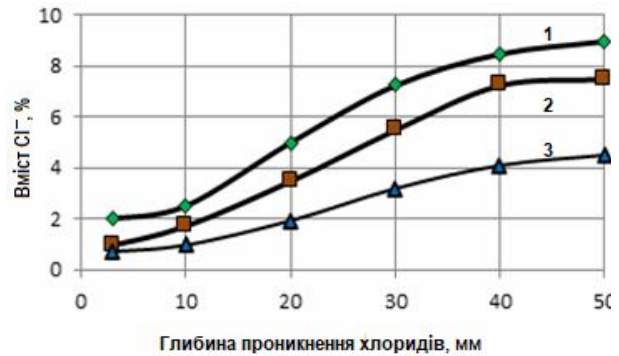


Рис. 5. Залежність глибини проникнення хлоридів в бетон від вмісту хлоридів в агресивному середовищі: 1 – бетон на звичайному цементі марки М300; 2 – бетон на портландцементі марки М500; 3 – бетон з водонепроникністю W12 на сульфатостійкому портландцементі марки М700

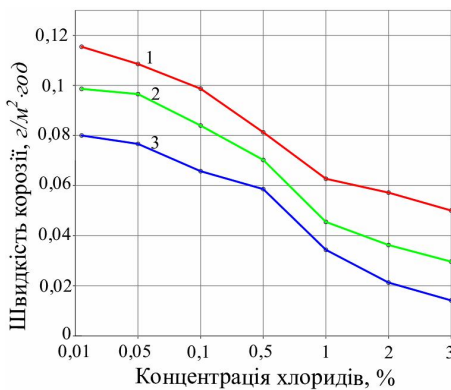


Рис. 6. Залежності швидкості корозії арматурних сталей від концентрації хлоридів в залізобетонних конструкціях:

1 – сталь 10; 2 – сталь 20ГС; 3 – 16Г2ФБ

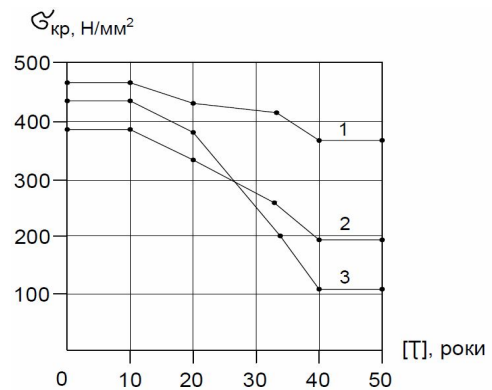


Рис. 7. Залежність критичного розтягувального напруження арматури залізобетонних конструкцій від терміну експлуатації: 1 – захищена бетонним шаром арматура залізобетонних конструкцій морських причалів; 2 – оголена арматура залізобетонних конструкцій; 3 – оголена арматура залізобетонних конструкцій змінної зони морських причалів

Кислотні середовища

В кислих середовищах бетон на портландцементі принципово не стійкий проти корозії. Основні (дугові) мінерали цементного каменю реагують з кислотами і руйнуються, утворюючи відповідні солі.

В табл. 3 наведені значення рН розчинів, нижче яких руйнуються основні з'єднання цементного каменю.

Таблиця 3

Значення рН розчинів кислот, нижче яких починається розчинення компонентів цементного каменю

Компоненти цементного каменю	рН розчину
Гідроксид кальцію	12.5
Гідросилікати кальцію	11.22- 9.9
Гідроалюмінати кальцію	8.1 – 8.2

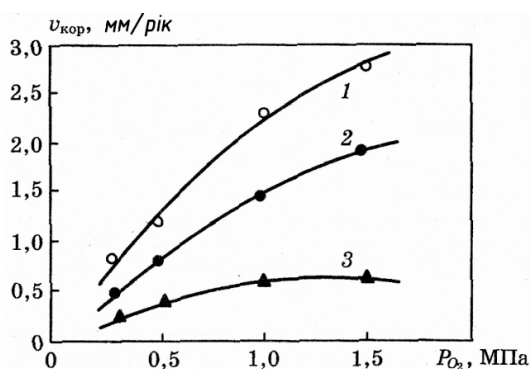


Рис. 8. Вплив вмісту кисню в агресивному середовищі на швидкість корозії арматурної сталі. Термін випробувань 96 год. Температура (°C): 1 – 40; 2 – 20; 3 – 10

W20.

Швидкість корозії бетону залежить від концентрації кислоти і розчинності кальцієвих солей.

Швидка корозія бетону спостерігається в розчинах соляної, сірчаної, оцтової, мурав'їної кислот, кальцієвої солі, які мають високу розчинність. Так, в розчинах соляної кислоти з рН=1 швидкість корозії марки по водонепроникності W4 може досягати 60 мм на рік.

Результати визначення кислотної корозії в залежності від концентрації кисню наведені на рис. 8.

В табл. 4 наведені значення швидкості корозії бетону особо низької проникності виготовленого з використанням модифікатора МБ-01 марка бетону по водонепроникності

Таблиця 4

Швидкість корозії бетону в розчинах сірчаної кислоти

рН розчину сірчаної кислоти	Швидкість корозії бетону, мм/рік
3.5	0.3
2.0	0.5
1.0	20

Раніше виконані разом з НДІЗБ дослідження показали, що кислі болотні води України містять гумінові кислоти – до 200 мг/л і агресивну вуглецеву кислоту – до 50 мг/л [2-5, 17-19].

При одночасній дії мінусових температур такі болотні води мають середній ступень агресивності по відношенню до бетонів марки W4 по водонепроникності.

Підвищення марки бетону по водонепроникності до W8 і вище пеопереджує корозійні ушкодження бетону. Однак, це відноситься до сильно розбавлених розчинів кислот. У рядових бетонів марок по водонепроникності W4 помітна корозія спостерігалася при рН 6.5 і нижче, у бетонів особливо низької проникності марок W10 – W12 – при рН3.5 і нижче.

Таким чином, заходами захисту від корозії бетону в кислих середовищах можуть бути технологічні засоби, які направлені на зниження водонепроникності бетону. Такі заходи ефективні тільки для значень рН вище вказаних граничних значень. При менших значеннях рН потрібний вторинний захист ізолюючого типу.

Висновки

1. Встановлена максимально допустима концентрація хлоридів в агресивних середовищах експлуатації бетону, зокрема при товщина захисного шару бетону в зоні арматури, максимальна концентрація хлоридів відповідно в середньому складає 1300 1850 і 2700 мг/дм³. Крім того, ці величини можуть змінюватися в залежності від коефіцієнту дифузії хлор-іонів.

2. Показано, що зі зміною рН середовища (від 3.5 до 1.0), яке контактує з арматурою бетону, швидкість корозії бетону змінюється відповідно від 0.3 до 20 мм/рік.

3. Сутність корозійних процесів в сульфатному середовищі полягає в структурі бетону, гіпсу і гідросульфоалюмінатів зі збільшеним об'ємом твердих фаз, що спричиняє появу внутрішніх напружень, перевищуючих міцність бетону, що веде неминуче до руйнування бетону. Сульфатна корозія спостерігається при дії різних розчинів сульфатів чи при застосуванні заповнювачів, які містять домішки гіпсу (сульфідвмісний заповнювач в бетоні). Класичними заходами попередження сульфатної корозії є використання сульфатостійких цементів, які містять невелику кількість алюмінатів і трьохкальцієвого силікату, використання мінеральних домішок, зв'язуючих гідроксид кальцію цементного каменя в низькоосновні силікати кальцію.

4. Ефективним засобом захисту від сульфатної корозії є зниження проникності бетону для іонів SO₄²⁻, що надходять із агресивного середовища. Досягається це вводом комплексів домішок в склад бетону, в тому числі водоредукуючих і мінеральних. Прикладом може служити використання модифікаторів бетону серії МБ. Такі і подібні комплекси дозволяють отримувати високо сульфатостійкі бетони на рядових середньоалюмінатних портландцементях, що виключає необхідність застосування дефіцитного сульфатостійкого портландцементу, що забезпечує високу корозійну стійкість бетону.

5. Підвищення марки бетону по водонепроникності до W8 і вище попереджує корозійні ушкодження бетону. Однак, це відноситься до сильно розбавлених розчинів кислот. У рядових бетонів марок по водонепроникності W4 помітна корозія спостерігалася при рН 6.5 і нижче, у бетонів особо низької проникності марок W10 – W12 – при рН 3.5 і нижче.

6. В останні десятиріччя увагу дослідників привертають два деструктивні процеси – пізні утворення етtringиту і таумаситу. Пізні утворення етtringиту (в затверділому бетоні) у відсутності впливу агресивного сульфатного середовища спостерігали в цементних бетонах при незбалансованому вмісті в цементі алюмінатів і сульфатів. У випадку, коли бетон твердів при підвищеній температурі утворюється переважно моносульфатна форма гідросульфоалюмінату. У наступному моменті моносульфатна форма може перетворюватися в трьохсульфатну з приєднанням додаткової кількості води і збільшенням об'єму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрейків О.Є., Никифорчин Г.М., Ткачов В.І. Міцнісні руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневомісних середовищах // Фізико-механічний інститут: - Під ред. В.В. Панасюка, НАН України, Фізико-механічний інститут. Г.В. Карпенка. - Львів: Простір-М, 2001. - С. 248-286.
2. Василенко І.І., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. – Киев: Наук, думка, 1977. - 265 с.
3. Дмитрах І.М., Панасюк В.В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. - Львів: Львівська обласна книжкова друкарня, 1999. - 342 с.
4. Крижанівський Є.І., Цирульник О.Т., Петрина Д.Ю. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1999. - № 5. - С. 67-70.
5. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірководневому середовищі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000. - №3. - С. 93-97.
6. NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H₂S Environments // NACE. – Houston. P.O. BOX 218340. 1990.-22 p.
7. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel, Fukui University, Японія: Теоретические основы инженерных расчетов (Труды Американского общества инженеров-механиков); изд-во Мир, 1985, №3, S.98-107.
8. Ткачов В.І. Проблеми водневої деградації металів// Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000.-№4.—С.7-14
9. Борисова Н.С., Амосова Л.М. К вопросу об аномальном поведении водорода в сталях при низких температурах// Физ.-хим. механика материалов. –Львов. -1986.-№12.-С.10-13
10. Панасюк В.В., Андрейків А.Е., Харин В.С. Модель роста трещин в деформированных металлах при воздействии водорода// Физ.-хим. механика материалов.-1987.-№2.-С.3-17
11. Швачко В.И. Макромеханические аспекты обратной водородной хрупкости// Физ.-хим. механика материалов. -2000.- №4.-С.36-40
12. Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Чернов В.Ю. Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів// Нафтова і газова промисловість. -2002.-№6.-С.42-44.
13. Самойленко М.І., Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем// Харків: ХНАМП. – 2009.-184с

14. Насоніна Н.Г., Антоненко С.Е. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж// Сучасне промислове та цивільне будівництво. -2019.-Том15.-№1.-С23-34.
15. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Аргатенко Т.В. і ін. Дослідження аварійних трубопроводів// Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, вип.42. -2023.-С.49-58.
16. Бриду А., Лафранс М., Прову И. Разработка новых сортов стали с повышенными характеристиками для транспорта кислого газа и нефти// Нефтегаз-Франция –ЮзичорАсье, 1986. -19с
17. Исследование отечественных и зарубежных низколегированных сероводородостойких сталей длнефтегазопроводного оборудования / А.И.Радкевич, Р.К.Мелехов, Я.И.Спектор, Р.В.Яценко// Межотраслевая науч-конф. Конструкционные стали – прогрессивные процессы производства и эффективность применения. Днепропетровск, 1995. – С.58-59.
18. Василенко І.І., Шульте О.Ю., Радкевич О.І. Вплив хімічного складу і технології виробництва сталей на їх чутливість до водневого тріщини утворення та сірководневого корозійного розтріскування//Фіз-хім механіка матеріалів. -1990.-№4.-С.8-22.
19. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами /О.Чапля,О.Радкевич,О.П'ясецький, Я.Спектор//Машинознавство. -1999.-№8.-С52-56.
20. Основні закономірності наводнювання та поверхневого пухиріннятрубно'істалі в сірководневих середовищах / О. Радкевич, Г. Чумало, І. Доминюк і ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 2004. - Спец. вип. № 4, т. 1. - С. 446-449.
21. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
22. Rodrigues A. A neu accelerated montar bar test to assesser the potential deleteriaes effect of Sulfide – beatingqqreqate in concrete// Cement and Conerete Resarc. -2015 ,vol.73, p.96-110
23. Mideires –Junior Ronaldo A. Servise life of concrete structures considering the effects of temperature and relatixe humidity on chloride transport// Enxironment Dev. Sustapnability,2015, vol.17,№5, p. 1103-1119.
24. Silva M.R.Біопошкодження бетонних конструкцій в прибережній зоні // Third International. Conference on Systainable Construction Materials and Technoligies.- Kyoto, Japan, 2013, p.418-423.
25. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І. і ін. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 469-482.

REFERENCES

1. Andreikiv O.Ie., Nykyforchyn H.M., Tkachov B.I. Mitsnist I ruinuвання metalichnykh materialiv elementiv konstruktssii u vodnevomisnykh seredovyschakh (Strength and destruction of metallic materials and structural elements in hydrogen-containing environments) // Fizyko-mekhanichnyi instytut: - Pid red. V.V. Panasiuka, NANUkrainy, Fizyko-mekhanichnyiinstytutim. H.V. Karpenka. - Lviv: Prostir-M, 2001. - S. 248-286
2. Vasilenko I.I., Melekhov R.K. Korrozionnoe rastreskivanie stalej (Stress corrosion cracking of steels) – Kiev: Nauk, dumka, 1977. - 265 s.
3. Dmytrakh I.M., Panasiuk V.V. Vplyv koroziiynykh seredovysch na lokalne ruinuвання metaliv bilia kontsentratoriv napruzhen (The influence of corrosive environments on the local destruction of metals near stress concentrators)//Lviv: Lvivskaoblasnaknyzhkovadrakarnia, 1999. - 342 s.
4. Kryzhanivskiy Ye.I., Tsyruulnyk O.T., Petryna D.Yu. Vplyv navodniuвання ta poperednoho plastychnoho deformuвання stali na yii trishchynostiikist (The influence of water treatment and preliminary plastic deformation of steel on its crack resistance) // Fiz.-khim. mexanikamaterialiv. - 1999. - № 5. - S. 67-70.
5. Radkevych O.I., Piasetskyi O.C., Vasylenko I.I. Korozino-mekhanichna tryvkist trubnoi stali v sirkovodneomu seredovyschchi (Corrosion-mechanical durability of pipe steel in a hydrogen sulfide environment)// Fiz.-khim. mexanikamaterialiv. -2000. -№3. - S. 93-97.
6. NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H₂S Environments// NACE. – Houston. P.O. BOX 218340. 1990.-22 p.
7. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel, Fukui University, Japan: Theoretical foundations of engineering calculations //izd-vo Mir, 1985, №3, S.98-107.
8. Tkachov V.I. Problemy vodnevoi dehradatsii metaliv (Problems of hydrogen degradation of metals)// Fiz.-khim. Mekhanika materialiv. -2000.--№4.—S.7-14
9. Borisova N.C., Amosova L.M. K voprosu ob anomal'nom povedenii vodoroda v stalyakh pri nizkikh temperaturakh (On the issue of anomalous behavior of hydrogen in steels at low temperatures)// Fiz.-khim. Mekhanika materialov. –L'vov. -1986.-№12.-S.10-13
10. Panasyuk V.V., Andrejkiv A.E., Kharin V.S. Model' rostatreshchinvdeformirovannykhmetallakhprivozdejstvii vodoroda (Model of crack growth in deformed metals under the influence of hydrogen) //Fiz.-khim. mexanika materialiv.-1987.-№2.-S.3-17
11. Shvachko V.I. Makromekhanicheskie aspekty obratimoi vodorodnoj khрупkosti (Macromechanical aspects of reversible hydrogen embrittlement)// Fiz.-khim. Mekhanika materialov. -2000. -№4.-S.36-40
12. Makarenko V.D., Kryzhanivskiy Ye.I., Chernov V.Iu. Problemy korozii noi stiikosti promyslovykh truboprovodiv (Problems of corrosion resistance of industrial pipe lines)// Naftova i hazovapromyslovist. -2002.-№6.-S.42-44
13. Samoilenko M.I. Funktsionalna nadiinist truboprovodnykh transportnykh system (Functional reliability of pipeline transport systems)// Kharkiv: KhNAMP. – 2009.-184s
14. Nasonina N.H., AntonenkoS.Ie. Analiz poshkodzenosti vodoprovodnykh i kanalizatsiynykh merezh (Analysis of damage to water supply and sewage networks)// Suchasne promyslove ta tsyvilne budivnytstvo. -2019.-Том 15.-№1.-S23-34
15. Makarenko V.D., Hots V.I., Arhatenko T.V. i in. Doslidzhennia avariynykh truboprovodiv (Investigation of emergency pipelines) // Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki, vyp. 42. -2023.-S.49-58
16. Bridu A., Lafrans M., Provu I. Razrabotka novykh sortov stali s povyshennymi kharakteristikami dlya transporta kislogo gaza I nefti (Development of new grades of steel with improved characteristics for the transport of acid gas and oil)// Neftegaz-Franciya – YuzichorAs'e, 1986. -19s
17. A.I. Radkevich, R.K. Melekhov, Ya.I. Spektor, R.V. Yacenko. Issledovanie otechestvennykh I zarubezhnykh nizkolegировannykh serovodoroldostojkikh stalej dlia neftegazoprovodnogo oborudovaniya (Research of domestic and foreign low-alloy hydrogen sulfide-resistant steels for oil and gas pipeline equipment)//Mezhotraslevaya науч-конф. Konstrukcionnyestali – progressivnyeprocessyproduktstvaieh'effektivnost' primeneniya. Dnepropetrovsk, 1995. – S.58-59

18. *Vasylenko I.I., Shulte O.Iu., Radkevych O.I.* Vplyv khimichnoho skladu i tekhnologii vyrobnytstva stali na yikh chutlyvist do vodnoho trishchynoutvorennia ta sirkovodnoho koroziiinoho roztriskuvannia (The influence of the chemical composition and production technology of steels on their sensitivity to hydrogen cracking and hydrogen sulfide corrosion cracking)// Fiz-khimmekhanikamaterialiv. -1990.-№4.-S.8-22
19. *O. Chaplia, O. Radkevych, O. Piasevskiy, Ya. Spector.* Porivnialnyi analiz koroziiino-mekhanichnykh vlastyvostei vitychznianoї trubnoi stali 20YuCh z inozemnymy analohamy (Comparative analysis of corrosion-mechanical properties of domestic pipe steel 20YuCh with foreign analogues)//Mashynoznavstvo. -1999.-№8.- S52-56
20. *O. Radkevych, H. Chumalo, I. Domyniuk i in.* Osnovni zakonimirostii navodniuвання ta poverkhevoho pukhyrinnia trubnoї stali v sirkovodnykh seredovyshchakh (The main regularities of water logging and surface blistering of pipe steel in hydrogen sulfide environments)// Fiz-khim. mexanikamaterialiv. - 2004. - Spets. vyp. № 4, t. 1. - S. 446-449.
21. *Tyson W.R.* Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
22. *Rodrigues A.* A Neu accelerated montar bar test to assess the potential deleterious effect of Sulfide–Cement and Concrete Researc.- 2015 ,vol.73, p.96-110
23. *Mideires–Junior Ronaldo A.* Servise life of concrete structures considering the effects of temperature and relatixe humidity on chloride transport// Environment Dev. Sustainability,2015, vol.17,№5, p.1103-1119.
24. *Silva M.R.* Biodamage of concrete structures in the coastal zone// Third Inter national. Conference on Systainable Construction Materials and Technoligies.- Kyoto, Japan, 2013, p.418-423.
25. *Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Makarenko Y.V.* Experimental studies of crack growth kinetics and bearing capacity of steel pipes of underground water distribution systems // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2023. – Issue 110. – P. 469-482.

Стаття надійшла 19.02.2025

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Майстренко А.А., Азутів В.П., Чижиринець О.Е.

ОСОБЛИВОСТІ КОРОЗИЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАЛІЗБЕТОНУ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ І СПОСОБИ ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД

В статті розглянуті питання виготовлення бетону високої корозійної стійкості в найбільш розповсюджених середовищах і в сульфатних хлоридних кислот і ін. Показано що корозійна стійкість бетону визначається двома головними показниками – незначною проникливістю для агресивного середовища і позитивною реакційною здатністю з компонентами агресивного середовища наведені кількісні значення названих показників Використання бетонів високої корозійної стійкості дозволяє створити бетонні і залізобетонні конструкції володіючі високою довговічністю ав агресивних середовищах без застосування додаткового (вторинного) захисту від корозії. Встановлена максимально допустима концентрація хлоридів в агресивних середовищах експлуатації бетону, зокрема при товщина захисного шару бетону в зоні арматури, максимальна концентрація хлоридів відповідно в середньому складає 1300 1850 і 2700 мг/дм³. Крім того, ці величини можуть змінюватися в залежності від коефіцієнту дифузії хлор-іонів. Показано, що зі зміною рН середовища (від 3.5 до 1.0), яке контактує з арматурою бетону, швидкість корозії бетону змінюється відповідно від 0.3 до 20 мм/рік. Сутність корозійних процесів в сульфатному середовищі полягає в в структурі бетону, гіпсу і гдросульфоалюмінатів зі збільшеним об'ємом твердих фаз, що спричиняє появу внутрішніх напружень, перевищуючих міцність бетону, що веде неминуче до руйнування бетону. Сульфатна корозія спостерігається при дії різних розчинів сульфатів чи при застосуванні заповнювачів, які містять домішки гіпсу (сульфідмісний заповнювач в бетоні). Класичний заходом попередження сульфатної корозії є використання сульфатостійких цементів, які містять невелику кількість алюмінатів і трьохкальцієвого силікату, використання мінеральних домішок, зв'язуючих гідроксид кальцію цементного каменя в низькоосновні силікати кальцію. Ефективним засобом захисту від сульфатної корозії є зниження прониклості бетону для іонів SO₄²⁻, поступаючих із агресивного середовища. Досягається це вводом комплексів домішок в склад бетону, в тому числі водоредукуючих і мінеральних. Прикладом може служити використання модифікаторів бетону серії МБ. Такі подібні комплекси дозволяють отримувати високо сульфатостійкі бетони на рядових середньоалюмінатнихпортландцементях, що виключає необхідність застосування дефіцитного сульфатостійкого портландцементу, що забезпечує високу корозійну стійкість бетону. Підвищення марки бетону по водонепроникності до W8 і вище попереджує корозійні ушкодження бетону. Однак, це відноситься до сильно розбавлених розчинів кислот. У рядових бетонів марок по водонепроникностіW4 помітна корозія спостерігалася при рН 6.5 і нижче, у бетонів особо низької проникності марокW10 – W12 – при рН 3.5 і нижче. В останні десятиріччя увагу дослідників привертають два деструктивні процеси – пізне утворення еттрингіту і таумаситу. Пізне утворення еттрингіту (в затвердішому бетоні) у відсутності впливу агресивного сульфатного середовища спостерігали в цементних бетонах при незбалансованому вмісті в цементі алюмінатів і сульфатів. У випадку, коли бетон твердів при підвищеній температурі утворюється переважно моносульфатна форма гідросульфоалюмінату. У наступному моменті моносульфатна форма може перетворюватися в трьохсульфатну з приєднанням додаткової кількості води і збільшенням об'єму.

Ключові слова: сульфатна корозія, хлориди, кислоти, руйнування, бетонні споруди.

Makarenko V.D., Gots V.I., Maistrenko A.A., Azutov V.P., Chyhyrynets O.E.

FEATURES OF REINFORCED CONCRETE CORROSION PROCESSES IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS AND METHODS OF CORROSION PROTECTION OF BUILDING STRUCTURES

The article deals with the production of concrete with high corrosion resistance in the most common environments and in sulfate, chloride, acid, etc. It is shown that the corrosion resistance of concrete is determined by two main indicators - a slight permeability to an aggressive environment and positive reactivity with the components of an aggressive environment. Quantitative values of these indicators are given. The use of concrete with high corrosion resistance makes it possible to create concrete and reinforced concrete structures with high durability in aggressive environments with out the use of additional (secondary) protection against corrosion. Respectively, on average it is 1300, 1850 and 2700 mg/dm³. In addition, these values may vary depending on the diffusion coefficient of chlorine ions. It is shown that with a change in the pH of the environment (from 3.5 to 1.0), which is in contact with the concrete reinforcement, the rate of concrete corrosion changes from 0.3 to 20 mm/year, respectively. The essence of corrosion processes in a sulfate environment lies in the structure of concrete, gypsum and hydrosulfoaluminates with an increased volume of solid phases, which causes the appearance of internal stresses exceeding the strength of concrete, which inevitably leads to the destruction of concrete. Sulfate corrosion is observed under the action of various sulfate solutions or when using aggregates that contain gypsum impurities (sulfide-containing aggregate in

concrete). Classic measures to prevent sulfate corrosion are the use of sulfate-resistance cements that contain a small amount of aluminates and tricalcium salt, the use of mineral admixtures that bind the calcium hydroxide of the cement stone into low-base calcium silicates. Reducing the permeability of concrete to SO_4^{2-} ions coming from an aggressive environment is an effective means of protection against sulfate corrosion. This is achieved by introducing admixture complexes into the composition of concrete, including water-reducing and mineral ions. An example can be the use of concrete modifiers of the MB series. Such similar complexes make it possible to obtain highly sulfate-resistant concrete or binary medium-aluminate portlandcements, which eliminates the need to use deficient sulfate-resistant portlandcement, which ensures high corrosion resistance of concrete. Increasing the water proofing grade of concrete to W8 and above prevents corrosion damage to concrete. However, this applies to highly diluted solutions of acids. Noticeable corrosion was observed in ordinary concretes of W4 water proofing grades at pH 6.5 and below, in particularly low-permeability concretes of W10 - W12 grades at pH 3.5 and below. In recent decades, two destructive processes have attracted the attention of researchers – the late formation of ettringite and taumansite. Late formation of ettringite (in hardened concrete) in the absence of exposure to an aggressive sulfate environment was observed in cement concrete with an unbalanced content of aluminates and sulfates in the cement. In the case when the concrete hardens at an elevated temperature, the monosulfate form of hydrosulfoaluminate is mainly formed. At the next moment, the monosulfate form can be transformed into the trisulfate form with the addition of an additional amount of water and an increase in volume.

Keywords: sulfate corrosion, chlorides, acids, destruction, concrete structures.

УДК 624.017

Макаренко В.Д., Савенко В.І., Гоц В.І., Макаренко Ю.В., Чигиринець О.Е. Особливості корозійних процесів залізобетону в агресивних середовищах і способи захисту від корозії будівельних споруд // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. – 2025. – Вип. 114 – С. 255-264.
Табл. 4. Іл. 8. Бібліогр. 25 назв.

UDC 624.017

Maikarenko V.D., Hots V.I., Maistrenko A.A., Azutov V.P., Chyhyrynets O.E. Features of reinforced concrete corrosion processes in aggressive environments and methods of corrosion protection of building structures // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. – 2025. – Issue 114. – P. 255-264.
Tabl. 1. Fig. 8. Ref. 25.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури Макаренко Валерій Дмитрович

Адреса робоча: 03037, м. Київ, просп. Повітряних Сил, 31, КНУБА

Тел +38(066)-747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедри залізобетонних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури Гоц Володимир Іванович

Адреса робоча: 03037 м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, КНУБА

Тел +38(050)-732-77-80

E-mail: gots.vi@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури Майстренко Алла Анатоліївна

Адреса робоча: 03037 м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, КНУБА

E-mail: maistrenko.aa@knuba.edu.ua

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури Азутов Володимир Павлович

Адреса робоча: 03037 м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, КНУБА

E-mail: azutov.vp@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3071-367X>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри фізико-хімічних матеріалів Національного університету Київська політехніка імені Ігоря Сікорського Чигиринець Олена Едуардівна

E-mail: o.chygyrynets@kpi.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>