

КАРБОНІЗАЦІЯ БЕТОНУ І КОРОЗІЯ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДЗЕМНИХ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Валерій Макаренко¹, Володимир Гоц², Тетяна Хомуцька³, Юлія Макаренко⁴,
Тетяна Аргатенко⁵, Ірина Прибителько⁶, Олена Панченко⁷

^{1,2,3,5,7} Київський національний університет будівництва і архітектури,
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

⁴ Медичний університет Манітобо, м. Вінніпег, Канада;

⁶ Національний університет «Чернігівська політехніка»,
м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, 14035, Україна

¹ докт. техн. наук, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9178-9657

² докт. техн. наук, gots.vi@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-7702-1609

³ докт. техн. наук, khomutetska.tp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-0153-4920

⁴ бакалавр, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1252-4231

⁵ канд. техн. наук, argatenko.tv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-2516-2906

⁶ канд. техн. наук, chdtu_welding@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8550-8318

⁷ panchenko@nikti.org.ua, orcid.org/0000-0003-3680-7036

DOI: 10.32347/2524-0021.2021.37.47-56

Анотація. Вивчався процес карбонізації бетону з різним співвідношенням води до цементу (В/Ц), а також досліджували вплив середовища на корозійні ушкодження арматури залізобетону. Наведені результати дослідження карбонізації бетону на спеціально приготовлених модельних зразках бетону розміром 250x250x250мм з терміном експозиції в розчині НАСЕ на протязі 500 діб без зовнішнього навантаження. Виконані заміри корозійних ушкоджень арматурних стрижнів, які були розміщені всередині бетонних кубів. Методика оцінки величини карбонізації бетону і корозії арматури детально викладена у відомих наукових роботах. Отримані дані свідчать про активну карбонізацію бетону впродовж всього терміну експозиції зразків в розчині НАСЕ, однак особливо значній за інтенсивністю карбонізації піддається бетон, приготовлений на співвідношенні В/Ц = 0,5 і 0,6. Меншою мірою піддається ушкодженням бетон із співвідношенням В/Ц = 0,7. Причому, аналогічна тенденція спостерігається й для корозії арматури. Це пояснюється тим, що збільшення водного середовища в бетонній масі полегшує дифузійні процеси доставки до реактивної зони хімічно-агресивних інгредієнтів, таких як вуглекислого газу, хлорид-іонів, водню, сірки, сульфат-іонів, різних видів бактерій тощо. Експериментально досліджена кінетика карбонізації бетону і корозії арматурних стрижнів в хімічно-агресивному середовищі НАСЕ в залежності від терміну експозиції зразків в модельному розчині. Встановлено, що зі збільшенням водно-цементного відношення В/Ц від 0,5 до 0,7 різко зростає глибина карбонізації і товщина шару корозійних продуктів. Експериментальним шляхом встановлено наводнення поверхневих шарів арматури та їх сильне окрихчення в процесі тривалої експлуатації арматури в структурі залізобетону, що спричиняє зниження тріщиностійкості в цілому залізобетонних конструкцій. Експериментально із залученням високоточного металографічного обладнання досліджена деградація арматурної сталі в процесі тривалої експлуатації в агресивних середовищах, що призводить до передчасних корозійних ушкоджень арматури з подальшим руйнуванням конструкції.

Ключові слова: корозія, арматура, карбонізація, бетон, експозиція.

© Макаренко В., Гоц В., Хомуцька Т.,
Макаренко Ю., Аргатенко Т., Прибителько І.,
Панченко О., 2021

ВСТУП

На каналізаційні конструкції і спорудження впливають різні рідкі агресивні середовища. Це стічні і ґрунтові води (опорні стінки галерей), залізобетонні конструкції станцій аерації, атмосферні опади у вигляді дощу, туманів, промислові водні стоки, лужні і кислі середовища тощо [1,2,3]

Згідно сучасними уявленнями, корозію бетону та залізобетону класифікують в рідких середовищах на 3 види [1-4]:

I вид – корозія, пов'язана з дією водних середовищ з малим вмістом солей з переважно нейтральною реакцією ($pH=6,8\div 7,2$);

II вид – корозія при дії вельми агресивних середовищ, наприклад, кислот, лугів, деяких солей, таких, як хлориди натрію чи магнію;

III вид – корозія, обумовлена проникненням в пори бетону рідких середовищ, які містять компоненти, що утворюють з поровою рідиною чи цементним камнем нерозчинні кристалічні сполуки.

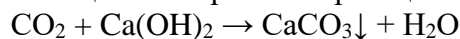
Кожний вид корозії характеризується своїми особливостями, специфічними фізико-хімічними процесами і реакціями, які визначають характер корозійного руйнування. В залізобетоні, наряду з корозією бетону, може протікати корозія сталевих арматур. Крім того, спостерігаються і специфічні види корозії, пов'язані, наприклад, з дією на бетон і залізобетон бактерій, грибів, водоростей тощо.

Корозія бетону і залізобетону в каналізаційних підземних умовах

Газова корозія – найбільш поширений вид корозії. При цьому на бетон діють такі фактори атмосфери, як температура (коливання температур), вологість, наявність в атмосфері газів, осаду у вигляді дощу, снігу та ін.[2,3,5-14].

Суха атмосфера (відносна вологість < 60%) для бетону і залізобетону є безпечною. При вологості більше 60% на поверхні бетону і в капілярах починає конденсуватися волога, в якій розчиняються атмосферні гази. Залежно від місцевих

умов (промислові, морські, сільські тощо) в атмосфері можуть міститися гази, при розчиненні яких у водяній плівці та в об'ємі капілярів і пор бетону формується агресивне середовище. Тому всі гази, присутні в тій чи іншій атмосфері, ділять на 3 групи в залежності від їх здатності впливати на процеси взаємодії з $Ca(OH)_2$. Згідно роботи [3] до першої групи відносяться гази, які здатні утворювати з $Ca(OH)_2$ малорозчинні чи нерозчинні солі з невеликим об'ємом продуктів реакції. Це пари плавикової, оцтової, щавлевої кислот, CO_2 та деякі інші. Так, при наявності в атмосфері малих концентрацій CO_2 в поровій волозі бетону чи поверхневій плівці може протікати реакція:

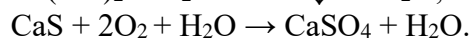
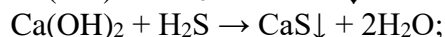
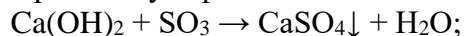


Утворений карбонат кальцію за об'ємом практично не перевищує об'єм $Ca(OH)_2$ і не становить великої небезпеки для міцнісних властивостей бетону. Більш того, при оптимальній концентрації CO_2 в повітрі бетон може навіть ущільнюватися. Однак підвищений вміст вуглекислоти може призводити до розчинення осаду з утворенням гідрокарбонату кальцію, який вимивається з бетону, збільшує об'єм пор і знижує його міцність:



Інша небезпека контакту з такими газами полягає в тому, що їх дія на порову рідину супроводжується зниженням величини pH . При досягненні $pH < 11,0\div 11,5$ може початися корозія сталевих арматур, і бетон почне розтріскуватися.

До другої групи корозійноактивних атмосферних газів відносяться гази, продуктами взаємодії яких з $Ca(OH)_2$ є нерозчинні об'ємні речовини. Це SO_2 , SO_3 , H_2S . Такі гази при взаємодії з вапняком утворюють сульфат кальцію:

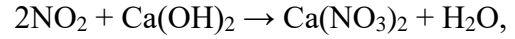


Отриманий гіпс $CaSO_4$ за об'ємом більш ніж в 2 рази перевищує $Ca(OH)_2$, і бетон спочатку ущільнюється, а потім

його поверхневі шари під дією внутрішніх напружень починають відшаровуватися від тіла бетону, і конструкція поступово руйнується. Атмосфери, які містять такі гази, виявляються вельми агресивними по відношенню до бетону і залізобетону [1,3,4,14-16].

Третя група атмосферних газів – гази, які утворюють при взаємодії з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ розчинені солі. До таких газів відносять галогени (Cl_2 , Br_2) і галогенводневі кислоти (HCl , HBr , HJ), деякі органічні леткі кислоти (HCOOH , CH_3COOH). При взаємодії з цими газообразними речовинами утворюються розчинні солі, які вимиваються з бетону, при цьому збільшується пористість бетону, знижуються міцнісні властивості. Хлор і галогенводневі кислоти можуть спричинити інтенсивну корозію сталеві арматури, внаслідок чого відбувається розтріскування бетону уздовж арматури. До третьої групи відносяться і азотовмісні оксиди NO , NO_2 , пари кислот HNO_2 , HNO_3 та аміак NH_3 . В результаті їх попадання в поровий простір бетону проходять реакції утворення

розчинних нітратів, які, поступово вимиваючись, роблять структуру бетону рихлою, поровий простір насичується солями, які виявляються гігроскопічними [1,3]:



Гігроскопічні продукти, такі, наприклад, як нітрат амонію, хлорид амонію, збільшують швидкість поглинання вологи з атмосфери (приблизно в 2 рази), сприяють насиченню бетону водою і подальшому його руйнуванню. Всі азотовмісні гази є агресивними по відношенню до бетону і безпечними по відношенню до сталеві арматури. Процес корозійного руйнування залізобетону під дією хлорид-іонів наведений на рис.1 і 2.

Бетонні і залізобетонні конструкції, які експлуатуються в різних атмосферних умовах, сприймають вплив різних факторів. Із великого числа факторів, що визначають стан атмосфери, найбільш небезпечними для бетону та залізобетону є підвищена вологість і коливання температури.

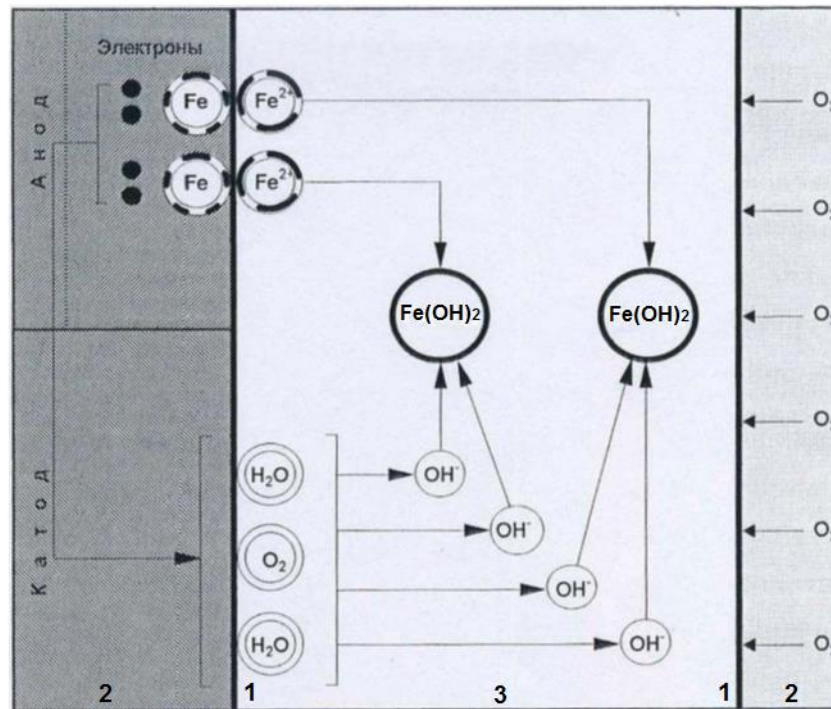


Рис. 1. Схема корозії сталі в бетоні: 1 – арматура; 2 – електроліт (плівка вологи); 3 – бетон
Fig. 1. Scheme of corrosion of steel in concrete: 1 – reinforcement; 2 - electrolyte (moisture film); 3 – concrete

Підвищена вологість і контакт бетону з водою призводять до насичення цього пористого матеріалу вологою; максимальне поглинання води (водонасиченість) складає для важких бетонів від 4 до 8% від маси бетону, для легких бетонів 25%. Водонасиченість бетону суттєво знижує його деформаційні і міцнісні характеристики [1,3,15]. При періодичному зволоженні та висиханні матеріалу відбувається розрив внутрішніх зв'язків між компонентами цементного каменю і, як наслідок, зниження міцності бетону. Наряду з водонасиченням на його міцність і деформативність значно впливає зміна температурного режиму, почергове заморожування та відтаювання. В цьому випадку слід говорити про морозостійкість бетону. Під морозостійкістю бетону розуміють його здатність в насиченому водою стані витримувати багатократне змінне заморожування і відтаювання. Критерій морозостійкості – це кількість циклів заморожування – розморожування, при якій його міцність знижується не більше, ніж на 15% при втраті маси менше 5%. Ця характеристика визначає марку бетону за морозостійкістю (F), наприклад, для важкого бетону F1000 кількість циклів становить 1000. Марка бетону за морозостійкістю для гідротехнічних конструкцій, каналізаційних споруд в різних кліматичних зонах вибирають по ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [1,6,14]. Швидкість и характер руйнування бетону при багатократному замерзанні і відтаюванні залежить від кількості пор (в основному капілярних), ступеню насичення водою, міцності бетону. Що більшою є водонасиченість, то нижчою буде морозостійкість, і тим швидше руйнується бетон (залізобетон).

При мінусових температурах водонасичений бетон руйнується внаслідок розширення води в капілярах (~ на 10%) в результаті перетворення її в лід. При цьому в порах виникає аномально високий тиск, що значно перевищує міцність бетону. Тиск замерзлої води передається на стінки пор, мікротріщин, створюючи в них високі розтягувальні напруження. Під

впливом цих внутрішніх напружень виникають мікротріщини в кристалічних структурах цементного каменю, розриви в гелевих структурах порового простору. Відбувається поступове накопичення локальних мікротріщин, які, зливаючись, переростають в магістральні тріщини. Встановлено, що розтягувальні напруження при змінному замороженні та відтаюванні бетону спричиняють постійне зниження його міцності та руйнування.

На сьогодні відсутня єдина теорія, яка б пояснювала механізм руйнування бетону при заморожуванні-відтаюванні. Однак численні експериментальні дані свідчать, що морозне руйнування бетону пов'язано з дією багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів: впливом льоду при кристалізації, температурними коливаннями, різними коефіцієнтами термічного розширення компонентів цементного каменю, термічною несумісністю компонентів бетону (заповнювачів і в'язучого), гідравлічним тиском замерзлої в порах і капілярах води [3,4,6-8,15,16]. Так при 0°C розширення льоду значно перевищує розширення бетону; тому перехід від мінусових температур до позитивних (тобто відтаювання бетону) може бути більш небезпечним, чим замерзання. Суттєво прискорює руйнування бетону при циклічному заморожуванні-відтаюванні наявність розтягувальних напружень в бетоні, солей протиобледенітелів у воді (зокрема хлоридів), утворення кристалогідратів при охолодженні сполук, які мають великий об'ємом і інші фактори.

Для збільшення морозостійкості бетону необхідно зменшити капілярну пористість, водопроникність, що досягається звичайно правильним добром співвідношення "вода/цемент" (В/Ц), яке не повинно перевищувати 0,30...0,35. Встановлено, що для зниження капілярної пористості на 1% необхідно зменшити кількість води в розчині на 10 л/м³ бетону; такий же ефект досягається збільшенням витрати цементу на 20...25 кг/м³.

Підвищення морозостійкості забезпечується також пропарюванням бетону згідно певного теплового режиму.

Значного підвищення морозостійкості можна отримати оптимальним підбором мінералогічного складу цементу. Встановлено, що підвищений вміст трьохкальцієвого алюмінату, введення молотих мінеральних домішок, пористих заповнювачів знижують морозостійкість бетонів. Тому для підвищення морозостійкості використовують цементи з мінімальним вмістом трьохкальцієвого алюмінату (< 8%), щільні (важкі) заповнювачі з вулканічних порід.

Суттєво підвищують морозостійкість спеціальні домішки, які мають поверхневу активність, суперпластифікатори, гідрофобізуючі рідини. Пластифікувальні домішки підвищують морозостійкість бетону як за рахунок зниження водоспоживності бетонних сумішей на 9-12%, так і за рахунок повітрозалучення і утворення в цементному камені замкнених пор. Суперпластифікатори знижують водоспоживність бетонних сумішей на 20-30%, суттєво зменшуючи капілярну пористість [3,14].

Останнім часом використовують комплексні домішки, які збільшують морозостійкість, забезпечують високі міцнісні

властивості, збільшують стійкість до соляної корозії, покращують технологію приготування бетонів (знижують В/Ц), ущільнюють бетон.

Корозія арматури в залізобетоні

Одна з найбільш небезпечних і поширених причин руйнування залізобетонних конструкцій каналізаційних споруд – корозія сталевих арматур [14].

В бетоні сталеві арматури знаходяться в контакті з поровою рідиною, яка має $pH > 11,8$. Лужне середовище переводить сталь в пасивний стан, обумовлений формуванням на поверхні металу гідроксидів заліза. Крім того, шар бетону, який контактує з арматурою виконує роль ізолятора і захищає її від корозії. Корозійний процес на сталі може розвинути в тому випадку, коли будуть створені умови для перебігу електрохімічних парціальних реакцій: катодного процесу деполяризації і анодного процесу розчинення. Це можливо в тому випадку, коли порушується пасивна плівка, тоді до поверхні сталі проникає кисень (деполяризатор катодного процесу), створюються локальні катодні і анодні ділянки і виникає різниця потенціалів, тобто формуються мікрогальванопари (рис.2).

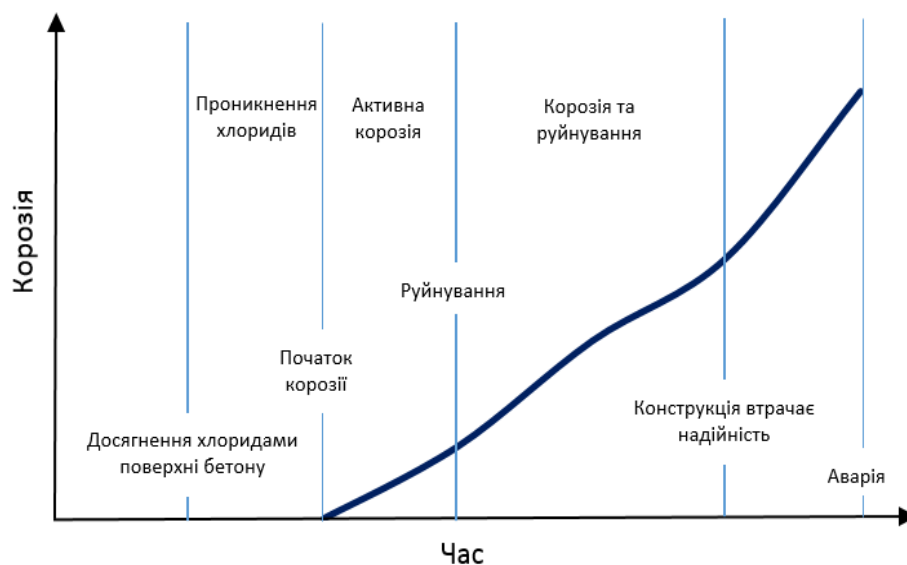


Рис. 2. Процес корозійного руйнування залізобетону при дії хлоридів

Fig. 2. The process of corrosion destruction of reinforced concrete under the action of chlorides

Руйнування пасивної захисної плівки можливо за наступних умов:

- зниження рН порової рідини до величини нижче 11,8;
- проникнення до поверхні сталі агресивних хлорид-іонів;
- прискорення анодних процесів розчинення сталі.

Зниження рН порової рідини можливо при утворенні розчинених речовин і вимиванні їх з цементного каменя. Це може відбуватися під впливом водних розчинів кислот, солей, агресивних газів. Крім того, в бетоні завжди достатньо вологи, необхідної для зниження рН. Враховуючи, що бетон має достатньо високу пористість, є вельми висока імовірність проникнення до поверхні арматурної сталі кисню – деполяризатора катодного процесу. Структурна неоднорідність арматурної сталі, наявність різного роду включень, внутрішні напруження і т.п. створюють умови появи мікрогальванопар, їх активного функціонування, локалізації корозійних процесів, які можуть проявлятися у вигляді пітингів, виразок.

Таким чином, для сталевих арматур створюються умови для виникнення і інтенсивного перебігу корозійних процесів. Вони можуть прискорюватися завдяки іншим факторам: наявністю тріщин в бетоні, які полегшують проникнення агресивних середовищ до сталевих арматур, власною корозією цементного каменя, наявністю блукаючих струмів, недостатньою товщиною шару бетону. В результаті корозійних процесів на сталі проходить зниження механічних властивостей металу, появлення корозійного розтріскування, особливо для напруженої арматури; утворення продуктів корозії великого об'єму, відшарування бетону від арматури. В кінцевому підсумку, це приводить до руйнування залізобетону [3,12].

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень служили фрагменти арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій, вирізані в процесі вимушеного чи планового ремонту із аварійних залізобетонних конструкцій каналізаційних споруд з різними термінами експлуатації: від 0 (аварійний запас) до 50 років. В дослідженнях використовували зразки арматури, виготовлених із сталі марки 20ГС і Ст5. Діаметр арматури – 32 мм. Зразки пошкодженого металу арматури досліджували з використанням растрового електронного мікроскопа JSM-35CF (фірма “JEOL”, Японія). Вміст водню і характер розподілу його в металі арматури вивчали методом локального мас-спектрального аналізу з лазерним мікросондом.

Концентраційний розподіл елементів на окремих ділянках корозійних уражень поперечного перерізу арматурних стрижнів вивчали за допомогою вторинної іонної мас-спектрометрії (установка “LAS-2000” з приладом MS-156) [17].

Мікротвердість визначали відповідно ДСТУ ISO 6507-1:2007 з використанням алмазної піраміди разом з металографічним мікроскопом. Зразки для вимірювань твердості готували подібним чином, як макрошліфи [17]. Результати вимірювань мікротвердості та вмісту водню з характером їх розподілу по поперечному перерізу арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій з різним терміном експлуатації представлені на рис.3.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Із даних, наведених на рис.3 і 4, видно, що в процесі довготривалої експлуатації залізобетонних конструкцій в складі гідротехнічних споруд відбувається сильне наводнення металу, яке безпосередньо приводить до його окрихчення (підвищення твердості), що підтверджується результатами, показаними на рис. 5. Зокрема, із рис.3 і 4 видно, що наводненню поверхневих шарів (до ≈ 10 мм) особливо піддаються арматурні стержні з великим

терміном експлуатації (20-50 років). Так, арматурна сталь 20ГС з терміном експлуатації 10 років в середині перерізу має вміст водню приблизно 3,2-3,3 ppm, а в поверхневих шарах відповідно: у внутрішньому (переріз А) – 5,5 ppm і у зовнішньому (переріз Б) – 8,6 ppm. В той же час арматура з терміном експлуатації, наприклад 40 і 50 років, мають вміст водню відповідно: у внутрішньому шарі – 8,8 ppm і 10 ppm, а у зовнішньому відповідно: 11,5 ppm і 14,3 ppm, тобто збільшення терміну експлуатації з 10 до 30 і 50 років спричиняє ріст вмісту водню у приповерхневих шарах з арматурного стрижня в 1,3 рази (30 років) і 1,62 рази (50 років), а із зовнішньої сторони арматури відповідно – в 1,6 рази (30 років) і в 1,85 рази (50 років).

Аналіз результатів вимірювання твердості сталей з різним терміном експлуатації показав наступне (рис.3, 4 і 5). Так, сталь 20ГС з терміном експлуатації 10 років має наступні значення мікротвердості по перерізу стінки труби ($H_{\mu} \cdot 107, \text{Па}$): середина – 68-73; серединна частина – 108; зовнішня сторона – 125. Сталь з термінами експлуатації 30 і 50 років має наступні значення мікротвердості ($H_{\mu} \cdot 107, \text{Па}$): серединна частина – 138 (30 років); 157 (50 років), а із зовнішньої сторони – 145 (30 років) і 175 (50 років). Таким чином, збільшення терміну експлуатації арматури 20ГС з 10 до 30 і 50 років приводить до росту мікротвердості для зовнішніх шарів – 1,43 раз (30 років) і 1,5 раз (50 років), а для внутрішніх шарів – 1,3 рази (30 років) і 1,45 раз (50 років).

На рис.5 наведені результати дослідження карбонізації бетону на спеціально приготовлених модельних зразках бетону розміром 250x250x250мм з терміном експозиції в розчині NaCl на протязі 500 діб без зовнішнього навантаження. Крім того, були виконані відповідні заміри корозійних ушкоджень арматурних стрижнів, які були розміщені всередині бетонних кубів.

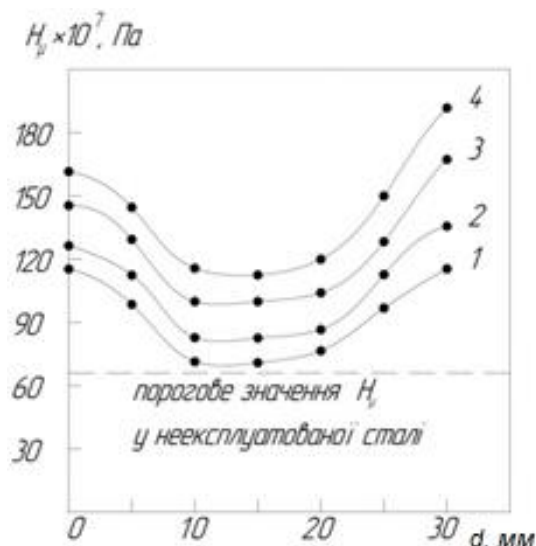


Рис. 3. Характер розподілу мікротвердості по поперечному перерізу арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій каналізаційної галереї. Сталь 20ГС. Позначення терміну експлуатації (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 50

Fig. 3. The nature of the distribution of microhardness along the cross section of the reinforcing bars of reinforced concrete structures of the sewer gallery. Steel 20GS. Designation of service life (in years): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 50

Методика оцінки величини карбонізації бетону і корозії арматури детально викладена в наукових роботах [2,3,11].

Дані, викладені на графіках рис.5, свідчать про активну карбонізацію бетону впродовж всього терміну експозиції зразків в розчині NaCl, однак особливо значній за інтенсивністю карбонізації піддається бетон, приготовлений на співвідношенні В/Ц = 0,5 і 0,6. Меншою мірою піддається карбонізації бетон із співвідношенням В/Ц = 0,7. Причому, аналогічна тенденція спостерігається й для корозії арматури. Це пояснюється тим, що збільшення водного середовища в бетонній масі полегшує дифузійні процеси доставки до реактивної зони хімічно-агресивних інгредієнтів, таких як CO_2 , хлорид-іонів, водню, сірки, іонів сірчаної кислоти (SO_4^{2-}), бактерій різних видів тощо.

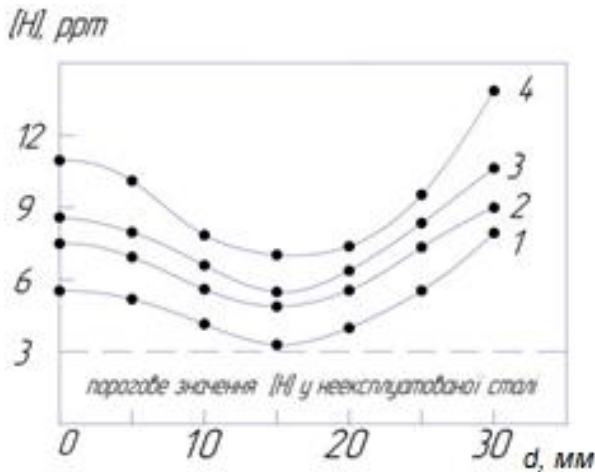


Рис. 4. Характер розподілу мікротвердості по поперечному перерізу арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій каналізаційної галереї. Сталь 20ГС. Позначення терміну експлуатації (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 50

Fig. 4. The nature of the distribution of microhardness along the cross section of the reinforcing bars of reinforced concrete structures of the sewer gallery. Steel 20GS. Designation of service life (in years): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 50

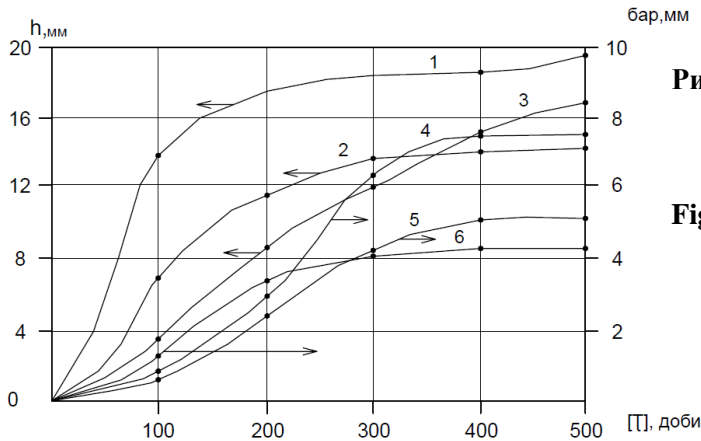


Рис. 5. Кінетика карбонізації бетону і корозії арматурних сталей: 3-1 – В/Ц = 0,5; 2-2 – В/Ц = 0,6; 1-3 – В/Ц = 0,7; модельний розчин NaCl, сталь 20ГС.

Fig. 5. Kinetics of carbonization of concrete and corrosion of reinforcing steels: 3-1 – $W / C = 0,5$; 2-2 – $W / C = 0,6$; 1-3 – $W / C = 0,7$; model solution NaCl, steel 20GS

ВИСНОВКИ

1. Експериментально досліджена кінетика карбонізації бетону і корозії арматурних стрижнів в хімічно-агресивному середовищі NACE в залежності від терміну експозиції зразків в модельному розчині. Встановлено, що зі збільшенням водноцементного відношення В/Ц від 0,5 до 0,7 різко зростає глибина карбонізації і товщина шару корозійних продуктів.
2. Встановлено експериментальним шляхом наводнення поверхневих шарів арматури та їх сильне окрихчення в процесі тривалої експлуатації арматури в структурі залізобетону, що спричиняє зниження тріщиностійкості в цілому залізобетонних конструкцій.
3. Експериментально із залученням високоточного металографічного обладнання досліджена деградація арматурної сталі в процесі тривалої експлуатації в агресивних середовищах, що приводить до

передчасних корозійних ушкоджень арматури з подальшим руйнуванням конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Корозійно-механічні** руйнування гідротехнічних споруд України: монографія / В. Д. Макаренко [та ін.]; під ред. проф. В. Д. Макаренко. К. : НУБіП України, 2021. 304 с.
2. **Старосельський А. А.** Коррозия и защита железобетонных конструкций и сооружений электрифицированных железных дорог: учеб. пособие / А. А. Старосельский. Харьков: ХИИТ, 1988. 82 с.
3. **Макаренко В. Д.,** Максимов С. Ю., Білик С. І. і ін. Корозійні руйнування каналізаційних систем України // Київ: Науково-видавничий відділ НУБіП України, 2021. 272 с.
4. **Коррозия:** справочник / под ред. Л. Л. Шрайера; пер. с англ. М.: Металлургия, 1981. 632 с.
5. **TM0177-2016-SG,** Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments. URL: <https://store.ampp.org/tm0177-2016>

6. **Makarenko V. D., Muravjev K. A., Kalyanov A. I.** Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia.-Welding International, 2006. 20(5). P. 410-413.
7. **Макаренко В. Д., Грачев С. И., Прохоров Н. Н. и др.** Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири. К.: Наукова думка, 1996. 549 с.
8. **Макаренко В. Д., Ковенский И. М., Прохоров Н. Н. и др.** Коррозионная стойкость сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов // М.: ООО "Недра-Бизнес-центр", 2000. 500 с.
9. **Окада Т., Хаттори С.** Зависимость между концентрацией соли в воде и сопротивлением коррозионной усталости конструкционной стали, содержащей 0.37% углерода. Труды Американского общества инженеров-механиков. М.: Мир, 1985. 3. С.98-107.
10. **Сахаров В. Н.** Современные методы антикоррозионной защиты металлоконструкций в гидротехнике / В. Н. Сахаров, В. Г. Майоров // Гидротехническое строительство, 2005. 3. С. 46-11.
11. **Шлугер М. А.** Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. 216 с.
12. **ISO 12944-2:2017** Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. URL: <https://www.iso.org/standard/64834.html>
13. **Mezenov V.** Tough call for coating / V.Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering. 2009, 55(15). 64 p.
14. **Бабік К. М., Гах Н. Д., Шалінський В. В.** Технічний стан конструкцій та елементів земляної вставки автодорожнього переїзду спорудами Дніпровської ГЕС // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2020. 4. С.7-15.
15. **Ликверман А. И.** Эффективная система защиты металлических мостов от коррозии / А. И. Ликверман, Ф. Б. Глазман, К. О. Распоров // Транспортное строительство, 2001. 8. С. 2-5.
16. **Маринин А. Н.** Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А. Н. Маринин, Р. Б. Гарибов, И. Г. Овчинников. Саратов: «ПАТА», 2008. 296 с.
17. **Москвин В. М.** Коррозия бетона и железобетона; методы их защиты // М.:Стройиздат, 1980. 538 с.

REFERENCES

1. **Makarenko V. D. (Ed.) (2021)** *Koroziynno-mekhanichni ruynuvannya hidrotekhnichnykh sporud Ukrayiny* [Corrosion and mechanical destruction of hydraulic structures of Ukraine]: monograph. Kyiv: NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian]
2. **Staroselsky, A. A. (Ed.) (1988)** *Korroziya u zashchyta zhelezobetonnykh konstruksiy u sooruzheny elektrifytyrovannykh zhelez-nykh doroh* [Corrosion and protection of reinforced concrete structures and structures of electrified railways]: textbook. Kharkiv: KhIT, 1988. [in Russian]
3. **Makarenko, V. D., Kuz'menko, O. H., Kuskov, Yu. M., Bilyk, S. I., Vynnykov, Yu. L., & Makarenko, Yu. V. (2021)** *Koroziynni ruynuvannya kanalizatsiynykh system Ukrayiny* [Corrosion destruction of sewage systems of Ukraine]: monograph. Kyiv: Scientific and Publishing Department of NULES of Ukraine. [in Ukrainian]
4. **Schreier, L. L. (Ed.) (1981)** *Corrosion: a handbook*. Moscow: Metallurgy. [in Russian]
5. **NACE TM0177-SG (2016)** *Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H2S Environments*. Retrieved from <https://store.amp.org/tm0177-2016>
6. **Makarenko, V. D., Muravjev, K. A., & Kalyanov, A. I. (2006)** *Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia*. Welding International, 20 (5). 410-413. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3640>
7. **Makarenko, V. D. (Ed.) (1996)** *Svarka i korroziya neftegazoprovodov Zapadnoy Sibiri* [Welding and corrosion of oil and gas pipelines in Western Siberia]. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
8. **Makarenko, V. D. (Ed.) (2000)** *Korroziionnaya stoykost' svarnykh metallokonstruktsiy neftegazovykh ob'yektov* [Corrosion resistance of welded metal structures of oil and gas facilities]. Moscow: LLC "Nedra-Business Center". [in Russian]
9. **Okada, T., & Hattori, S. (1985)** The relationship between the salt concentration in water and the resistance to corrosion fatigue of structural steel containing 0.37% carbon. - Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers. Moscow: Mir, 3. 98-107. [in Russian]

10. **Sakharov, V. N. & Mayorov, V. G. (2005)** *Sovremennyye metody antikorroziionnoy zashchity metallokonstruktsiy v gidrotekhnike* [Modern methods of anticorrosion protection of metal structures in hydraulic engineering]. Hydraulic engineering, 3. 46-11. [in Russian]
11. **Schluger, M. A, Ajogin, F. F, & Efimov, E. A. (1981)** *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and protection of metals]. Moscow: Metallurgy. [in Russian]
12. **ISO 12944-2: 2017** *Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/64834.html>
13. **Mezenov, V. & Golovnenkova, M. (2009)** Tough call for coating. Bridge: design and engineering, 55(15). 64 p.
14. **Babik, K. M, Gakh, N. D, & Shalinsky, V. V. (2020)** *Tekhnichnyy stan konstruktsiy ta elementiv zemlyanoyi vstavky avtodorozhn'oho pereyizdu sporudamy Dniprovs'koyi HES* [Technical condition of structures and elements of the earthen insert of the road crossing structures of the Dnieper HPP]. *Industrial Construction and Engineering Structures*, 4. 7-15. [in Ukrainian]
15. **Likverman, A. I., Glazman, F. B., & Rasporov, K. O. (2001)** *Effektivnaya sistema zashchity metallicheskih mostov ot korrozii* [Effective system of protection of metal bridges against corrosion]. Transport construction, 8. 2-5. [in Russian]
16. **Marinin, A. N., Garibov, R. B., Ovchinnikov, I. G. (2008)** *Soprotivleniye zhelezobetonnykh konstruktsiy vozdeystviyu khloridnoy korrozii i karbonizatsii* [Resistance of reinforced concrete structures to the effects of chloride corrosion and carbonization]. Saratov: RATA. [in Russian]
17. **Moskvin, V. M. (1980)** *Korroziya betona i zhelezobetona; metody ikh zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete; methods of their protection]. Moscow: Stroyizdat.

Carbonization of concrete and corrosion of reinforcement of reinforced concrete structures of underground sewerage systems

Valeriy Makarenko, Volodymyr Gots, Tetiana Khomutetska, Yulia Makarenko, Tetiana Arhatenko, Iryna Prybytko, Olena Panchenko

Abstract. The process of carbonization of concrete with different ratio of water to cement (W/C) was studied, and the influence of the environment on corrosion damage of reinforced concrete reinforcement was studied. The results of the study of carbonization of concrete on specially prepared model samples of concrete with a size of 250x250x250 mm with an exposure period in NACE solution for 500 days without external load are presented. Measurements of corrosion damage of reinforcing rods, which were placed inside concrete cubes, were performed. The method of estimating the amount of carbonization of concrete and corrosion of reinforcement is described in detail in known scientific papers. The obtained data testify to the active carbonization of concrete during the whole exposure period of the samples in NACE solution, however, concrete prepared at the ratio W/C = 0.5 and 0.6 is particularly significant in terms of carbonization intensity. Concrete with a ratio of W/C = 0.7 is less susceptible to damage. Moreover, a similar trend is observed for corrosion of fittings. This is due to the fact that the increase of the aqueous medium in the concrete mass facilitates diffusion processes of delivery to the reactive zone of chemically aggressive ingredients such as carbon dioxide, chloride ions, hydrogen, sulfur, sulfate ions, various types of bacteria and the like. The kinetics of concrete carbonization and corrosion of reinforcing bars in chemically aggressive NACE medium depending on the exposure period of the samples in the model solution was experimentally studied. It is established that with the increase of the water-cement ratio W/C from 0.5 to 0.7, the depth of carbonization and the layer thickness of corrosion products increase sharply. The flooding of the surface layers of the reinforcement and their strong embrittlement in the process of long-term operation of the reinforcement in the structure of reinforced concrete, which causes a decrease in crack resistance in general of reinforced concrete structures. The degradation of reinforcing steel during long-term operation in aggressive environments, which leads to premature corrosion damage to the reinforcement with subsequent destruction of the structure, was investigated experimentally with the involvement of high-precision metallographic equipment.

Key words: corrosion, reinforcement, carbonization, concrete, exposition.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2021