УДК 624.21.012.45:620.193.27 https://doi.org/10.31713/vt2202623

Онищенко А.М., ([1:ORCID: 0000-0002-1040-4530])
професор, д.т.н.
Мельниченко О. В., ([1:ORCID: 0009-0004-2073-5343])
аспірант
[1] Національний транспортний університет

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВРАХУВАННЯ ХЛОРИДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІД ЧАС ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

Залізобетонні елементи автодорожніх мостів у процесі тривалої експлуатації зазнають впливу хлоридів, основним експлуатаційним джерелом яких є протиожеледні матеріали. Хлоридне забруднення бетону має просторово неоднорідний характер, тому одиничний результат визначення вмісту хлоридів без урахування місця та глибини відбору не забезпечує достатньої інформації для оцінювання корозійної небезпеки. Метою роботи є систематизація теоретичних передумов формування хлоридного забруднення та визначення факторів, які необхідно враховувати під час використання результатів визначення хлоридів для оцінювання технічного стану залізобетонних елементів автодорожніх мостів. На основі аналізу наукових джерел і нормативних документів систематизовано послідовність процесів від проникнення хлоридів у бетон до депасивації та розвитку корозії арматури. Показано, що під час інтерпретації результатів необхідно враховувати конструктивну та експлуатаційну зону, умови зволоження, глибину відбору проб, фактичну товщину захисного шару, положення і тип арматури. Обґрунтовано необхідність розмежування вимог до початкового вмісту хлоридів у новому бетоні та критеріїв оцінювання конструкцій після тривалої експлуатації, а пороговий вміст хлоридів запропоновано розглядати як один із критеріїв корозійної небезпеки, а не як самостійну характеристику технічного стану. Встановлено, що для більш обґрунтованого оцінювання існуючих мостових конструкцій визначення вмісту хлоридів доцільно виконувати на різних глибинах та розглядати спільно з фактичним положенням арматури і результатами обстеження.

ISSN 2306-5478

Ключові слова: хлориди; корозія арматури; залізобетонні конструкції; довговічність; автомобільна дорога; неруйнівна діагностика; нормативні документи.

Постановка проблеми

Залізобетонні конструкції автодорожніх мостів є відповідальними елементами автомобільних доріг, технічний стан і довговічність яких значною мірою залежать від одночасної дії транспортних навантажень та агресивних факторів навколишнього середовища. Одним із найбільш характерних експлуатаційних впливів є дія хлоридів, що надходять до конструкцій разом із розчинами протиожеледних матеріалів. Їх проникнення відбувається через дефекти дорожнього одягу, деформаційні шви, елементи водовідведення, тріщини та локальні пошкодження захисного шару бетону [1].

Для мостових конструкцій характерне поєднання хлоридного впливу з періодичним зволоженням і висиханням, заморожуванням та відтаванням, температурними змінами і механічними навантаженнями. За таких умов хлориди накопичуються в бетоні нерівномірно, а швидкість і глибина їх проникнення залежать від структури бетону, його вологості, тріщинуватості, стану захисного шару та тривалості експлуатаційного впливу [1; 4]. Досягнення хлоридами зони розташування арматури створює передумови для порушення її пасивного стану та розвитку корозійних процесів.

Під час обстеження існуючих мостових конструкцій кількісною характеристикою хлоридного забруднення є вміст хлоридів у відібраних пробах бетону. Однак результат лабораторного визначення характеризує лише локальну ділянку конструкції та відповідну глибину відбору. Він не може автоматично поширюватися на весь елемент.

Це принципово відрізняє діагностування існуючої конструкції від контролювання складу нового бетону. У процесі тривалої експлуатації хлориди надходять із зовнішнього середовища, перерозподіляються в бетоні та формують просторово неоднорідний профіль концентрації. Для розвитку корозії визначальним є не лише загальний вміст хлоридів, а їх концентрація безпосередньо в зоні розташування арматури.

Під час оцінювання технічного стану необхідно враховувати не тільки визначений вміст хлоридів, а й конструктивну зону відбору, глибину проби, фактичне положення арматури, товщину захисного

шару, умови зволоження та характер наявних пошкоджень конструкції.

Мета дослідження

Метою дослідження є систематизація теоретичних передумов формування хлоридного забруднення бетону та визначення основних факторів, які необхідно враховувати під час використання результатів визначення хлоридів для оцінювання технічного стану залізобетонних елементів автодорожніх мостів.

Виклад основного матеріалу

Хлоридна деградація залізобетонних елементів

Вплив хлоридів на залізобетонні конструкції доцільно розглядати як послідовний процес, що охоплює надходження хлоридів до поверхні бетону, їх проникнення та накопичення у захисному шарі, досягнення зони розташування арматури, порушення пасивного стану сталі та подальший розвиток корозійних пошкоджень [1; 5].

На початковій стадії визначальними є умови надходження та перенесення хлоридів у бетоні. Для автодорожніх мостів основним експлуатаційним джерелом хлоридів є розчини протиожеледних матеріалів. Їх локальне надходження до конструкцій значною мірою залежить від стану мостового полотна, деформаційних швів, системи водовідведення, наявності тріщин та пошкоджень захисного шару.

В умовах періодичного зволоження і висихання значну роль відіграють капілярне всмоктування та перенесення розчинів у приповерхневих шарах бетону. За тривалого впливу відбувається подальше поширення хлоридів у глибину конструкції. Інтенсивність цих процесів залежить від структури бетону, його вологості, водоцементного відношення, типу в'яжучого, температурних умов та здатності цементного каменю зв'язувати хлориди [4; 8].

Для реальних мостових конструкцій характер проникнення хлоридів додатково ускладнюється просторовою неоднорідністю експлуатаційних впливів. Тріщини створюють локальні шляхи прискореного перенесення, а дефекти водовідведення та деформаційних швів призводять до тривалого зволоження окремих ділянок. Тому навіть у межах одного конструктивного елемента можуть формуватися зони з різним рівнем хлоридного забруднення.

Після досягнення хлоридами зони розташування арматури визначальним стає стан пасивної плівки на поверхні сталі. Висока лужність порового розчину бетону за нормальних умов забезпечує пасивний стан арматури. Накопичення активних хлоридів біля

 ISSN 2306-5478

поверхні сталі може спричинити локальне руйнування пасивної плівки навіть без істотного зниження pH бетону.

Іншим механізмом втрати пасивного стану є карбонізація бетону, за якої відбувається зниження його лужності. Таким чином, карбонізація та проникнення хлоридів є різними за механізмом процесами, але обидва можуть призвести до депасивації арматури та створення умов для розвитку її корозії. Послідовність цих процесів схематично наведено на рис. 1.

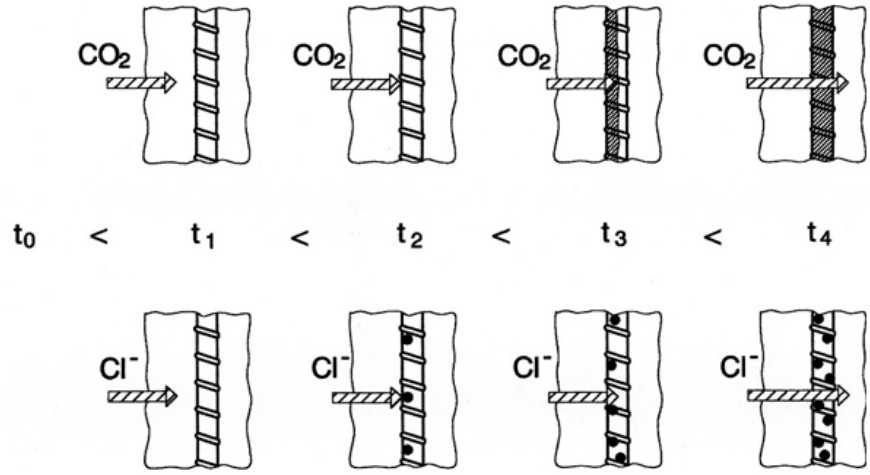


Рис. 1. Послідовність депасивації арматури під час карбонізації бетону та проникнення хлоридів [15]

Наведена схема показує, що момент депасивації арматури є лише однією зі стадій деградаційного процесу. Втрата пасивного стану сама по собі ще не характеризує ступінь пошкодження залізобетонного елемента, однак створює умови для розвитку активної корозії.

У процесі корозії на поверхні арматури утворюються продукти, об'єм яких перевищує об'єм вихідного металу. У захисному шарі бетону виникають внутрішні розтягувальні напруження, наслідком яких є формування тріщин уздовж арматури, відшарування та сколи бетону, а за подальшого розвитку процесу — оголення і корозійне пошкодження арматури [1; 5].

Для оцінювання технічного стану мостової конструкції це означає, що результат визначення вмісту хлоридів необхідно розглядати спільно з фактичним положенням арматури та наявними ознаками деградації елемента. Однакове значення концентрації хлоридів може мати різне діагностичне значення залежно від

глибини відбору проби, товщини захисного шару, умов зволоження та фактичного стану арматури.

Вміст хлоридів є важливим діагностичним показником, але не може розглядатися як самостійний еквівалент технічного стану залізобетонного елемента.

Розподіл хлоридів за глибиною бетону

Для існуючих мостових конструкцій принципове значення має не тільки встановлений вміст хлоридів, а й положення досліджуваної зони відносно поверхні бетону та арматури.

За надходження хлоридів із зовнішнього середовища найбільший їх вміст переважно формується у приповерхневих шарах із подальшим поширенням у глибину конструкції. Водночас реальний профіль концентрації може істотно відрізнятися від спрощеної дифузійної залежності. На його формування впливають повторні цикли зволоження і висихання, вимивання солей, тріщини, температурно-вологісний режим, карбонізація та неоднорідність структури бетону [4].

Тому результат, отриманий для приповерхневого шару бетону, не може автоматично характеризувати вміст хлоридів у зоні арматури. Під час дослідження існуючої конструкції необхідно встановлювати фактичну товщину захисного шару та положення арматури, а глибини відбору проб призначати з урахуванням цих параметрів.

Для інженерної інтерпретації доцільно розрізняти вміст хлоридів у приповерхневій зоні, характер його зміни за глибиною та вміст хлоридів поблизу фактичного рівня розташування арматури. Саме останній показник безпосередньо характеризує середовище, у якому перебуває сталь.

Підхід до відбору матеріалу на різних глибинах передбачено AASHTO T 260 [12]. Отримання декількох значень у межах одного місця відбору дозволяє сформувати профіль хлоридного забруднення і встановити характер проникнення хлоридів від поверхні до внутрішніх шарів бетону.

Таким чином, одиничний результат характеризує локальний вміст хлоридів у конкретній пробі, тоді як результати, отримані на декількох глибинах, дають інформацію про поширення хлоридного забруднення в напрямку арматури. Для оцінювання існуючих мостових конструкцій саме така інформація є більш інформативною.

 ISSN 2306-5478

Пороговий вміст хлоридів та його інженерна інтерпретація

У практиці оцінювання хлоридного впливу одним із основних показників є критичний або пороговий вміст хлоридів, за досягнення якого в зоні арматури створюються умови для порушення її пасивного стану. Водночас такий показник не є універсальною сталою величиною, однаковою для всіх залізобетонних конструкцій.

На момент депасивації арматури впливають склад і структура бетону, водоцементне відношення, вологість, карбонізація, тип в'яжучого, стан поверхні арматури та контактної зони «сталь — бетон», а також умови експлуатації конструкції [6–8]. Унаслідок цього однаковий визначений вміст хлоридів у різних конструкціях може відповідати різному рівню корозійної небезпеки.

Окреме значення має стан контактної зони між арматурою і бетоном. За даними Kenny та Katz [6], збільшення її пористості та наявність локальних дефектів можуть знижувати кількість хлоридів, необхідну для порушення пасивного стану сталі. Результати інших досліджень також свідчать, що на значення порогу впливають тип цементу, водоцементне відношення, ступінь карбонізації та співвідношення вільних і зв'язаних хлоридів [7; 8].

Таким чином, пороговий вміст хлоридів доцільно розглядати не як одне фіксоване граничне число, а як характеристику, що має певну варіабельність залежно від властивостей матеріалу та умов експлуатації.

Статистичний характер порогового вмісту хлоридів підтверджується як лабораторними дослідженнями, так і результатами обстеження експлуатованих мостів. У дослідженні Andrade та ін. [15] виконано зіставлення лабораторних результатів із даними, отриманими під час обстеження мостових конструкцій в атмосферних умовах.

Отримані розподіли показують значну варіабельність концентрації хлоридів, за якої відбувається депасивація арматури, водночас середні значення лабораторних і натурних даних є близькими. Характер такого розподілу наведено на рис. 2.

Для розглянутих атмосферних умов середнє значення порогового вмісту хлоридів за лабораторними даними становило близько 0,70 ± 0,20% від маси цементу, тоді як за результатами обстеження мостів — близько 0,77 ± 0,24% [15]. Близькість отриманих значень підтверджує можливість використання статистичного підходу до інтерпретації порогового вмісту хлоридів.

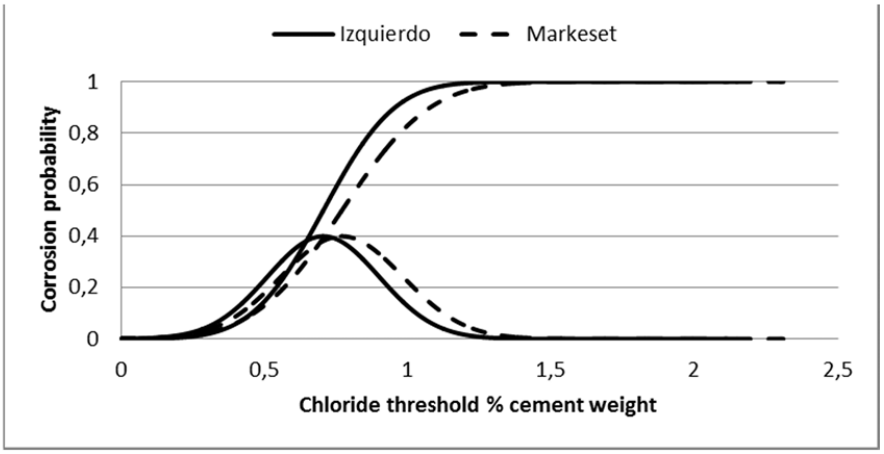


Рис. 2. Статистичний розподіл порогового вмісту хлоридів за результатами лабораторних досліджень та обстеження мостів [15]

Водночас наведені результати не дають підстав розглядати середнє значення такого розподілу як універсальну нормативну межу. Пороговий вміст характеризує момент переходу арматури з пасивного в активний корозійний стан, тоді як фактичний технічний стан залізобетонного елемента залежить також від подальшої швидкості розвитку корозії, ступеня пошкодження арматури та бетону і впливу цих пошкоджень на роботу конструкції.

Отже, під час обстеження існуючих мостів пороговий вміст хлоридів слід використовувати як один із критеріїв оцінювання корозійної небезпеки, а не як самодостатню характеристику технічного стану елемента.

Новий бетон та існуюча конструкція

Під час інтерпретації результатів визначення хлоридів принципово важливо розмежовувати вимоги до нового бетону та оцінювання конструкції, що тривалий час перебуває в експлуатації.

Для нового бетону нормативне обмеження вмісту хлоридів передусім характеризує кількість хлоридів, що вводиться до конструкції разом із вихідними матеріалами під час її виготовлення [14]. У цьому випадку контролюється відповідність складу матеріалу встановленим вимогам.

Для існуючої мостової конструкції ситуація є іншою. Фактичний вміст хлоридів формується протягом експлуатації внаслідок їх надходження із зовнішнього середовища, перенесення в бетоні, зв'язування, перерозподілу та часткового вимивання. Тому для оцінювання такої конструкції необхідно визначати не тільки

 ISSN 2306-5478

концентрацію хлоридів, а й місце її визначення, глибину проникнення та положення досліджуваної зони відносно арматури.

Таким чином, нормативне значення, встановлене для контролювання складу нового бетону, не повинно автоматично використовуватися як повний критерій технічного стану конструкції, що тривалий час перебуває в експлуатації.

Для існуючого залізобетонного елемента необхідно враховувати конструктивну зону, умови зволоження, місце і глибину відбору проб, фактичне положення арматури, товщину захисного шару, тип армування та наявні ознаки корозійного пошкодження.

Такий підхід переводить визначення вмісту хлоридів із задачі контролювання властивостей матеріалу в задачу інженерного діагностування конкретного конструктивного елемента.

Методи визначення та оцінювання хлоридного впливу

Для оцінювання хлоридного впливу на залізобетонні конструкції застосовують декілька груп стандартизованих методів, які характеризують різні складові процесу деградації. Ці методи не є взаємозамінними, оскільки одні з них визначають фактичний вміст хлоридів у бетоні, інші характеризують здатність бетону протидіяти їх проникненню або електрохімічний стан арматури.

ASTM C1218/C1218M [9] застосовується для визначення водорозчинних хлоридів у бетоні та цементному розчині. Для дослідження існуючих конструкцій цей показник має особливе значення, оскільки характеризує частину хлоридів, що переходить у водний розчин і може брати участь у процесах депасивації та корозії арматури.

ASTM C1152/C1152M [13] передбачає визначення кислоторозчинних хлоридів і характеризує їх загальний вміст у пробі. Тому результати визначення водорозчинної та кислоторозчинної фракцій не повинні безпосередньо порівнюватися без урахування застосованого методу випробування.

AASHTO T 260 [12] регламентує відбирання та визначення хлоридів у бетоні, зокрема у пробах, відібраних із діючих конструкцій. Для обстеження мостів важливою особливістю цього методу є можливість відбору матеріалу на різних глибинах, що дозволяє визначати характер зміни концентрації хлоридів від поверхні до внутрішніх шарів бетону.

ASTM C1202 [10] характеризує електричну індикацію здатності бетону протидіяти проникненню іонів хлориду. Цей метод застосовується для оцінювання транспортних властивостей бетону,

але не визначає фактичну концентрацію хлоридів у конкретній зоні існуючої конструкції.

ASTM C876 [11] передбачає визначення потенціалів арматури та використовується для оцінювання ймовірності розвитку корозійного процесу. Отже, його результат характеризує електрохімічний стан арматури, а не вміст хлоридів у бетоні. Визначення потенціалів корозії може застосовуватися як складова неруйнівної діагностики залізобетонних конструкцій та доповнювати результати визначення фактичного вмісту хлоридів.

З інженерної точки зору результати цих методів формують чотири взаємопов'язані групи інформації: фактичний вміст хлоридів у бетоні; здатність бетону протидіяти їх подальшому проникненню; електрохімічний стан арматури; фактичні прояви пошкодження конструкції.

Жодна з цих характеристик окремо не описує повний процес деградації. Тому під час оцінювання технічного стану їх доцільно розглядати як взаємодоповнювальні показники.

Врахування хлоридного забруднення під час оцінювання технічного стану

Основним завданням обстеження моста є отримання інформації, достатньої для встановлення фактичного технічного стану його конструкцій та прийняття подальших інженерних рішень [2; 3]. Визначення вмісту хлоридів у цьому процесі є одним із видів інструментальних досліджень, що характеризує хімічні передумови розвитку корозії арматури.

Для існуючої конструкції недостатньо встановити лише факт перевищення певного порогового значення. Оцінювання повинно враховувати просторове положення отриманого результату, глибину відбору, фактичне положення арматури, умови експлуатації та наявність корозійних пошкоджень.

У разі коли високий вміст хлоридів визначено лише у приповерхневій зоні, такий результат характеризує інтенсивність локального забруднення, але не дає повної інформації про умови біля арматури. Якщо одночасно досліджено декілька глибин, з'являється можливість оцінити характер проникнення хлоридів у напрямку арматури та пов'язати результат із фактичним захисним шаром.

Особливого значення набуває зіставлення результатів хімічного аналізу з фактичними проявами корозійного процесу. Тріщини вздовж арматури, відшарування і сколи захисного шару,

ISSN 2306-5478

оголення та корозійне пошкодження сталі свідчать про розвиток деградації, однак причини таких пошкоджень повинні встановлюватися за сукупністю результатів обстеження.

Натурні обстеження мостових конструкцій підтверджують, що корозійний процес може супроводжуватися значними пошкодженнями захисного шару та оголенням арматури (рис. 3). У таких зонах визначення вмісту хлоридів дозволяє отримати додаткову кількісну інформацію щодо агресивності середовища, у якому відбувається деградація.

Разом із тим результат хімічного аналізу повинен інтерпретуватися з урахуванням фактичного стану елемента. Для конструкції без видимих корозійних пошкоджень підвищений вміст хлоридів може характеризувати передумови розвитку корозії, тоді як за наявності тріщин, відшарувань та оголення арматури він є додатковою характеристикою вже сформованого деградаційного процесу.

Тому врахування хлоридного забруднення під час оцінювання технічного стану повинно ґрунтуватися на поєднанні кількісного визначення вмісту хлоридів із результатами візуального та інструментального обстеження конструкції.

Інтерпретація результатів у зоні арматури

Під час оцінювання хлоридної небезпеки найбільше діагностичне значення має вміст хлоридів у бетоні поблизу фактичного рівня розташування арматури. Саме в цій зоні концентрація активних хлоридів безпосередньо впливає на стійкість пасивного стану сталі.

Тому перед відбором проб необхідно встановити фактичне положення арматури та товщину захисного шару бетону. Глибини відбору повинні призначатися не формально від поверхні конструкції, а з урахуванням розташування арматури в конкретному елементі.

Особливо важливим такий підхід є для існуючих мостів, де фактична товщина захисного шару може відрізнятися в межах одного елемента, а тріщини, локальні пошкодження бетону та тривале зволоження створюють додаткові шляхи проникнення агресивного середовища.

Відбір матеріалу на декількох глибинах дозволяє встановити характер зміни вмісту хлоридів від поверхні до внутрішніх шарів бетону. Водночас глибша проба не повинна автоматично

ототожнюватися із зоною арматури без попереднього визначення її фактичного положення.



а)



б)

Рис. 3. Характерні корозійні пошкодження залізобетонних балок: а – руйнування захисного шару бетону з оголенням арматури; б – оголення та корозійне пошкодження арматури

Необхідність такої прив'язки підтверджується результатами натурних досліджень існуючих мостових конструкцій. У процесі відбору кернів у пошкоджених залізобетонних елементах фіксували

ISSN 2306-5478

корозійне руйнування арматури безпосередньо в товщі бетону. Характерний приклад такого пошкодження наведено на рис. 4.



Рис. 4. Керн бетону з корозійно пошкодженою арматурою

Наведений приклад показує, що під час діагностування існуючої залізобетонної конструкції результат визначення хлоридів необхідно розглядати у безпосередньому зв'язку зі станом арматури та положенням досліджуваної проби відносно неї.

При цьому високий вміст хлоридів у приповерхневому шарі свідчить про інтенсивність локального забруднення, але не дає достатньої інформації щодо умов біля арматури. Аналогічно, невисоке значення в окремій пробі не виключає наявності зон локального накопичення хлоридів в іншій частині конструктивного елемента.

Натурні результати підтверджують значну просторову неоднорідність такого розподілу. В окремих досліджених балках значення, визначені на глибинах 2 і 5 см, суттєво відрізнялися: для однієї з ділянок отримано відповідно 1,24% та 0,04% від маси цементу, тоді як на інших ділянках концентрація зі збільшенням глибини могла, навпаки, зростати. Це підтверджує недоцільність оцінювання хлоридного забруднення існуючої конструкції лише за одним значенням, отриманим на одній глибині.

Таким чином, для інтерпретації результатів визначення хлоридів необхідно враховувати сукупність вихідних даних: конструктивний елемент і конкретну експлуатаційну зону, умови зволоження, місце та глибину відбору проб, фактичну товщину захисного шару, положення і тип арматури, визначений вміст хлоридів та наявні ознаки корозійного пошкодження.

Такий підхід дозволяє відокремити локальне поверхневе забруднення від проникнення хлоридів у глибші шари бетону та більш обґрунтовано оцінити небезпеку розвитку корозійного процесу.

Разом із тим визначення вмісту хлоридів не замінює загального оцінювання технічного стану конструкції. Воно доповнює результати обстеження кількісною характеристикою одного з механізмів деградації залізобетону.

Висновки

1. Хлоридне забруднення залізобетонних елементів автодорожніх мостів має просторово неоднорідний характер і залежить від конструктивної зони, умов зволоження, стану захисного шару, наявності тріщин та тривалості експлуатаційного впливу. Тому результат визначення вмісту хлоридів необхідно пов'язувати з конкретним місцем і глибиною відбору проби.

2. Під час оцінювання корозійної небезпеки найбільше значення має вміст хлоридів у бетоні поблизу фактичного рівня розташування арматури. Глибини відбору проб доцільно призначати з урахуванням фактичної товщини захисного шару та положення арматури, а результати, отримані на різних глибинах, розглядати як характеристику профілю хлоридного забруднення.

3. Пороговий вміст хлоридів не є універсальною сталою величиною. На умови депасивації арматури впливають властивості бетону, карбонізація, вологість, стан контактної зони «сталь — бетон», характеристики арматури та умови експлуатації. Тому порогове значення слід використовувати як один із критеріїв оцінювання корозійної небезпеки, а не як самостійну характеристику технічного стану конструкції.

4. Для існуючих мостових конструкцій визначення вмісту хлоридів доцільно поєднувати з результатами візуального та інструментального обстеження і даними про фактичне положення арматури. Подальше вдосконалення такого підходу потребує систематизації натурних результатів визначення водорозчинних хлоридів на різних глибинах та встановлення закономірностей їх розподілу для обґрунтування кількісних критеріїв врахування хлоридного забруднення під час оцінювання технічного стану.

1. Ali M., Shams M. A., Bheel N., Almaliki A. H., Mahmoud A. S., Dodo Y. A., Benjeddou O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. RSC Advances. – 2024. – Vol. 14, No.

 ISSN 2306-5478

50. – P. 37252–37271. – DOI: 10.1039/D4RA05506C. **2.** ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. – Київ, 2009. **3.** ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – Київ, 2022. **4.** Reichert T. A., Balestra C. E. T., Balestra D. A. O., Medeiros-Junior R. A. Laboratory procedure for obtaining chloride profiles from concrete structures cores: a mathematical approach. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. – 2023. – Vol. 8. – Article 41. – DOI: 10.1007/s41024-023-00286-2. **5.** Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. – Stockholm : Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. – 468 p. **6.** Kenny A., Katz A. Steel–Concrete Interface Influence on Chloride Threshold for Corrosion – Empirical Reinforcement to Theory. Current Trends in Civil & Structural Engineering. – 2019. – Vol. 4, No. 3. – Article ID CTCSE.MS.ID.000586. – DOI: 10.33552/CTCSE.2019.04.000586. **7.** Obla K., Lobo C., Hong R., Berke N. Evaluation of Chloride Limits for Reinforced Concrete. Phase A: Final Report to the RMC Research & Education Foundation (Project 14-01) and Concrete Research Council, ACI Concrete Foundation. – Silver Spring, MD : National Ready Mixed Concrete Association, 2017. **8.** Angst U. M., Elsener B. Chloride Threshold Values in Concrete – A Look Back and Ahead. ACI Special Publication SP-308: Chloride Thresholds and Limits for New Construction. – Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2016. – P. 1–12. – DOI: 10.14359/51689176. **9.** ASTM C1218/C1218M-20. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2020. **10.** ASTM C1202-22. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. **11.** ASTM C876-22b. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. **12.** AASHTO T 260-21. Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials. – Washington, DC : AASHTO, 2021. **13.** ASTM C1152/C1152M-20. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2020. **14.** ДСТУ EN 206:2022. Бетон. Специфікація, характеристики, виробництво та відповідність. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. **15.** Andrade C., Tavares F., Rebolledo N., Izquierdo D. Probabilistic Treatment of Chloride Threshold. ACI Special Publication SP-308: Chloride Thresholds and Limits for New Construction. – Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2016. – P. 33–46.

REFERENCES:

1. Ali M., Shams M. A., Bheel N., Almaliki A. H., Mahmoud A. S., Dodo Y. A., Benjeddou O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. RSC Advances. 2024. Vol. 14, No. 50. P. 37252–37271. DOI: 10.1039/D4RA05506C. **2.** DBN V.2.3-6:2009. Sporudy

transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia [Transport structures. Bridges and pipes. Inspection and testing]. Kyiv, 2009. [in Ukrainian]. **3.** DSTU 9181:2022. Nastanova z otsiniuvannia ta prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv [Guidelines for assessment and prediction of the technical condition of road bridges]. Kyiv, 2022. [in Ukrainian]. **4.** Reichert T. A., Balestra C. E. T., Balestra D. A. O., Medeiros-Junior R. A. Laboratory procedure for obtaining chloride profiles from concrete structures cores: a mathematical approach. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2023. Vol. 8. Article 41. DOI: 10.1007/s41024-023-00286-2. **5.** Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 468 p. **6.** Kenny A., Katz A. Steel–Concrete Interface Influence on Chloride Threshold for Corrosion – Empirical Reinforcement to Theory. Current Trends in Civil & Structural Engineering. 2019. Vol. 4, No. 3. Article ID CTCSE.MS.ID.000586. DOI: 10.33552/CTCSE.2019.04.000586. **7.** Obla K., Lobo C., Hong R., Berke N. Evaluation of Chloride Limits for Reinforced Concrete. Phase A: Final Report to the RMC Research & Education Foundation (Project 14-01) and Concrete Research Council, ACI Concrete Foundation. Silver Spring, MD: National Ready Mixed Concrete Association, 2017. **8.** Angst U. M., Elsener B. Chloride Threshold Values in Concrete – A Look Back and Ahead. ACI Special Publication SP-308: Chloride Thresholds and Limits for New Construction. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2016. P. 1–12. DOI: 10.14359/51689176. **9.** ASTM C1218/C1218M-20. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. **10.** ASTM C1202-22. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. **11.** ASTM C876-22b. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. **12.** AASHTO T 260-21. Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials. Washington, DC: AASHTO, 2021. **13.** ASTM C1152/C1152M-20. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. **14.** DSTU EN 206:2022. Beton. Spetsyfikatsiia, kharakterystyky, vyrobnytstvo ta vidpovidnist [Concrete. Specification, performance, production and conformity]. Kyiv: SE «UkrNDNC», 2022. [in Ukrainian]. **15.** Andrade C., Tavares F., Rebolledo N., Izquierdo D. Probabilistic Treatment of Chloride Threshold. ACI Special Publication SP-308: Chloride Thresholds and Limits for New Construction. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2016. P. 33–46.

ISSN 2306-5478

Onyshchenko A.M., ([1:ORCID: 0000-0002-1040-4530])
Professor, Doctor of Technical Sciences
Melnychenko O. V., ([1:ORCID: 0009-0004-2073-5343])
PhD Student
[1] National Transport University

THEORETICAL PRINCIPLES FOR ACCOUNTING FOR CHLORIDE CONTAMINATION WHEN ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN ROAD BRIDGES

During long-term service, reinforced concrete elements of road bridges are exposed to chlorides, primarily originating from de-icing agents. Chloride contamination in concrete is spatially non-uniform; therefore, a single measurement of chloride content—without considering the specific location and depth of sampling—fails to provide sufficient information for assessing corrosion risk. The objective of this study is to systematize the theoretical premises underlying the formation of chloride contamination and to identify the factors that must be considered when utilizing chloride measurement data to assess the technical condition of reinforced concrete elements in road bridges. Based on an analysis of scientific literature and regulatory documents, the sequence of processes—from the penetration of chlorides into the concrete to the depassivation and subsequent corrosion of the reinforcement—has been systematized. It is demonstrated that, when interpreting results, it is necessary to account for the structural and operational zone, moisture conditions, sampling depth, the actual thickness of the concrete cover, and the position and type of reinforcement. The study justifies the need to distinguish between requirements for the initial chloride content in new concrete and criteria for evaluating structures after long-term service; it is proposed that the threshold chloride content be considered one of the criteria for corrosion risk rather than an independent indicator of the technical condition. It is established that, for a more robust assessment of existing bridge structures, chloride content should be determined at various depths and analyzed in conjunction with the actual position of the reinforcement and the findings of the structural inspection.

Keywords: chlorides; reinforcement corrosion; reinforced concrete structures; durability; highway; non-destructive testing; regulatory documents.

Отримано: 25 березня 2026 року
Прорецензовано: 29 квітня 2026 року
Прийнято до друку: 29 травня 2026 року

© 2026 [Onyshchenko A.M., Melnychenko O. V.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).