

УДК 624.21.012.45:620.193

Каськів В. І., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

Сташук П. М., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

Зеленський Б. М., д-р філос. з будівництва та цивільної інженерії, <https://orcid.org/0000-0002-9949-3209>

Завгородній С. С., <https://orcid.org/0000-0003-1928-4544>

Борисенко М. А., <https://orcid.org/0000-0001-9772-3536>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

---

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВПЛИВУ ХЛОРИДІВ НА ЗАЛІЗОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

### *Анотація*

**Вступ.** У статті розглянуто фундаментальну проблему забезпечення довговічності автодорожніх мостів в умовах агресивної дії хлоридів. Надійність експлуатації транспортних споруд значним чином залежить від стану залізобетонних конструкцій, які піддаються дії протижелезних матеріалів і циклічному зволоженню.

**Проблематика.** Хлоридна корозія арматури є одним із найнебезпечніших чинників деградації, що призводить до втрати несної здатності та передчасного виходу мостів з ладу. Наявна нормативна база України лише частково враховує ці процеси, що вимагає гармонізації з міжнародними стандартами.

**Мета.** Метою роботи є систематизація теоретичних знань про механізми масопереносу хлоридів, аналіз впливу мінеральних домішок та карбонізації на корозійну стійкість, а також огляд сучасних нормативних методів визначення вмісту хлоридів для вдосконалення національної системи моніторингу мостів.

**Матеріали й методи.** Використано методи аналітичного огляду наукової літератури та нормативних документів щодо дифузійних процесів, термодинамічного моделювання зв'язування хлоридів та імовірнісних методів оцінки ризиків.

**Результати.** Проаналізовано відмінності між вільною та зв'язаною формами хлоридів, розглянуто вплив карбонізації на вивільнення зв'язаних солей. Детально описано нормативні методики визначення водо- та кислоторозчинних хлоридів, їх переваги та обмеження. Обґрунтовано необхідність переходу від детермінованих порогових значень до імовірнісних моделей оцінки корозійного ризику.

**Висновки.** Доведено, що ефективне прогнозування довговічності транспортних споруд потребує диференційованого обліку вільних та зв'язаних хлоридів, особливо для бетонів із мінеральними добавками та в умовах карбонізації. Обґрунтовано доцільність імплементації методик ASTM C876 та AASHTO T 260 у вітчизняну практику моніторингу мостів. Запропонований підхід дозволяє ідентифікувати корозійні процеси на стадії ініціації, що є передумовою для впровадження систем управління активами на основі фактичного технічного стану.

**Ключові слова:** арматура, дифузія, залізобетон, карбонізація, корозія, міст, прогнозування довговічності, технічний стан, транспортна споруда, хлориди.

### Вступ

Забезпечення надійності та довговічності транспортної інфраструктури є критичним завданням для економічної стабільності держави. Автодорожні мости та шляхопроводи, як ключові вузли транспортної мережі, працюють у надзвичайно складних умовах, де динамічні навантаження поєднуються з агресивним впливом навколишнього середовища. Серед усіх фізико-хімічних

факторів, що спричиняють деградацію залізобетону, вплив хлоридів посідає особливе місце через свою здатність викликати латентну, але стрімку корозію арматури [1].

Актуальність дослідження зумовлена широким використанням протижеледних матеріалів на основі хлоридів натрію та кальцію під час зимового утримання доріг. Розчини солей, що утворюються при таненні снігу, проникають крізь пошкодження дорожнього одягу, деформаційні шви та систему водовідведення, накопичуючись у бетоні несних конструкцій. Це створює електролітне середовище, яке є причиною розвитку електрохімічної корозії, що призводить до зменшення перерізу арматури, втрати зчеплення з бетоном та зниження несної здатності споруди в цілому.

У сучасних умовах переходу від системи ліквідації аварій до превентивного управління активами виникає гостра потреба у глибокому розумінні теоретичних засад хлоридної агресії. Чинна нормативна база України (зокрема, ДБН В.2.3-6:2009 [2], ДСТУ 9181:2022 [3]) встановлює загальні вимоги до обстежень, проте методики кількісної оцінки вмісту хлоридів та інтерпретації отриманих даних потребують деталізації та гармонізації з провідними світовими практиками.

Метою цієї роботи є систематизація теоретичних знань про механізми проникнення та впливу хлоридів на залізобетон, аналіз ролі складу бетону та умов середовища у процесах деградації, а також огляд міжнародних нормативних підходів до випробувань (ASTM, AASHTO, EN). Ці дані створюють основу для вдосконалення національних стандартів та розроблення ефективних стратегій діагностики мостів.

### Основна частина

#### **Теоретичні засади масопереносу та взаємодії хлоридів у цементних системах**

##### **Механізми проникнення хлоридів у бетон**

Процес проникнення іонів хлору в структуру бетону не є однорідним і залежить від вологості матеріалу, структури пор та умов навколишнього середовища. У науковій літературі виділяють декілька основних механізмів проникнення, які часто діють одночасно або послідовно залежно від експлуатаційних умов конструкції.

**Дифузія** є основним механізмом проникнення у водонасиченому бетоні, наприклад, у підводних частинах опор або в конструкціях, що перебувають в умовах постійної високої вологості. Рухильною силою цього процесу є градієнт концентрації: іони рухаються від зони з вищою концентрацією (поверхня бетону) до зони з нижчою концентрацією (глибинні шари). Цей процес традиційно описується другим законом Фіка для нестационарного потоку (**рис. 1**). Ефективний коефіцієнт дифузії, який використовують у розрахунках, є інтегральною характеристикою, що відображає опір матеріалу переміщенню іонів. Важливо зазначити, що цей коефіцієнт не є постійною величиною: у міру гідратації цементу структура пор ущільнюється, що призводить до сповільнення дифузії з часом. Цей ефект описується так званим «фактором старіння», який варіюється залежно від типу в'язучого [4].

**Капілярна сорбція (всмоктування)** відіграє критичну роль для залізобетонних елементів, які піддаються циклам зволоження та висихання. Коли сухий бетон контактує із сольовим розчином (наприклад, талою водою з протижеледними реагентами), рідина втягується в пори під дією сил поверхневого натягу. Цей процес відбувається на порядки швидше за дифузію і призводить до формування у поверхневому шарі (глибиною 10–20 мм) так званої «конвективної зони» [1]. У цій зоні концентрація хлоридів може різко зростати за короткий проміжок часу, створюючи зону високого насичення для подальшої дифузії вглиб конструкції.

**Проникність під тиском** є менш поширеним механізмом для мостових конструкцій, але може мати місце в глибоководних опорах, де гідростатичний тиск води є причиною примусового проникнення розчину в пори бетону.

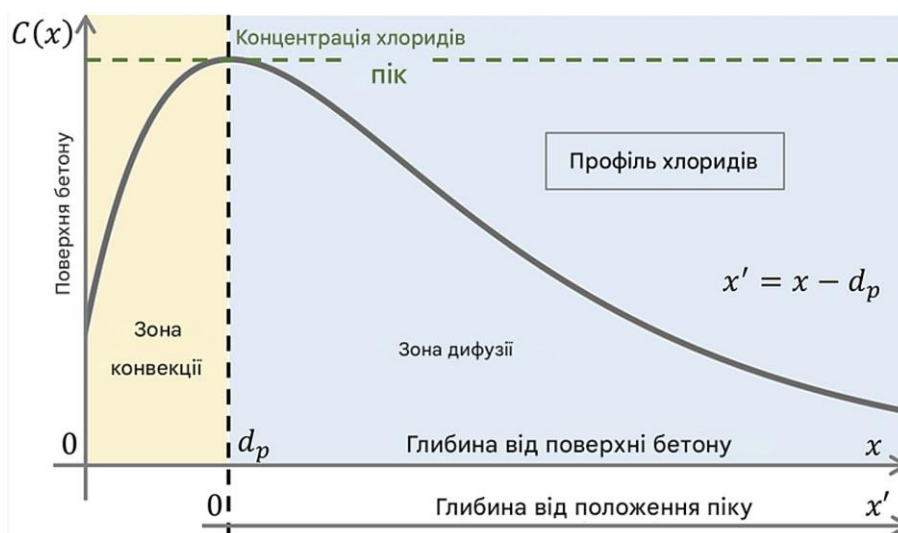


Рисунок 1 — Типовий профіль розподілу іонів хлориду за глибиною бетону [5]

#### Фізико-хімічна взаємодія та зв'язування хлоридів

Хлориди, що потрапили в бетон, існують у двох основних станах, розрізнення яких є принциповим для оцінки корозійних ризиків [6].

**Вільні хлориди** — це іони, розчинені у поровій рідині бетону. Саме вони є активними учасниками електрохімічного процесу корозії, оскільки можуть вільно пересуватися до поверхні арматури, руйнувати її пасивну плівку та знижувати електричний опір бетону. Більшість моделей прогнозування довговічності базується на оцінці концентрації саме вільних хлоридів.

**Зв'язані хлориди** — це частина хлоридів, яка іммобілізується цементною матрицею. Зв'язування відбувається двома шляхами:

1. **Хімічне зв'язування:** Реакція хлоридів з трикальцієвим алюмінатом ( $C_3A$ ) та його гідратними фазами призводить до утворення комплексної сполуки – хлоралюмінату кальцію, відомого як сіль Фріделя [6]. Ця реакція виводить частину агресивних іонів з розчину, тимчасово знижуючи ризик корозії. Цементи з високим вмістом алюмінатів (наприклад, ASTM Type I) мають вищу здатність до хімічного зв'язування порівняно з сульфатостійкими цементами.

2. **Фізична адсорбція:** Іони хлору можуть фізично утримуватися на поверхні гелю гідросилікатів кальцію (C-S-H) завдяки електростатичним силам. Цей механізм є менш міцним, але також знижує концентрацію вільних хлоридів у поровому розчині.

Важливо розуміти, що процес зв'язування є оборотним. Зміна умов середовища, зокрема зниження рН (карбонізація) або підвищення температури, може призвести до розкладання солі Фріделя та десорбції іонів, повертаючи їх у вільний, агресивний стан [1, 6].

#### Синергія карбонізації та хлоридної агресії

Карбонізація бетону — реакція гідроксиду кальцію з атмосферним вуглекислим газом — традиційно розглядається як окремий вид корозії, що призводить до зниження лужності бетону. Однак при одночасній дії з хлоридами виникає небезпечний синергетичний ефект [1].

Фронт карбонізації, просуваючись від поверхні вглиб бетону, знижує рН середовища до значень, при яких хлоридні сполуки (сіль Фріделя) стають нестабільними. Це викликає масове вивільнення раніше зв'язаних хлоридів. Утворені вільні хлориди додаються до тих, що надходять із зовнішнього середовища, і просуваються фронтом карбонізації вглиб конструкції.

У результаті перед фронтом карбонізації формується зона з аномально високою концентрацією вільних хлоридів. Це явище може призвести до того, що критична концентрація солей біля поверхні арматури буде досягнута значно раніше, ніж передбачають розрахунки для «чистої» дифузії. Крім

того, карбонізація змінює порову структуру бетону: для звичайних портландцементів вона може зменшувати пористість, але для бетонів з мінеральними добавками (шлак, зола) може спостерігатися зворотний ефект — огрубіння пор та підвищення проникності [4].

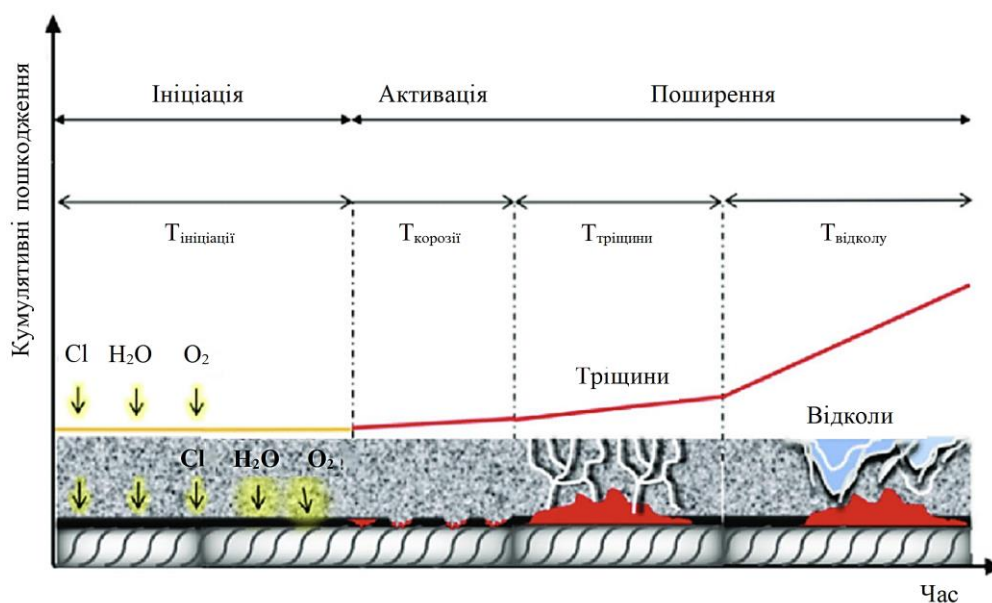
### Модель корозії арматури (Tuutti) та поняття порогової концентрації

Процес деградації залізобетону внаслідок корозії арматури класично описується моделлю Tuutti [7], яка розділяє життєвий цикл конструкції на дві стадії:

1. **Стадія ініціації:** Період, протягом якого агресивні агенти (хлориди,  $\text{CO}_2$ ) проникають через захисний шар бетону до поверхні арматури. На цьому етапі фізичні пошкодження конструкції відсутні, а сталь залишається захищеною пасивною оксидною плівкою. Стадія завершується моментом депасивації сталі [8].

2. **Стадія поширення (пропагації):** Починається після руйнування пасивної плівки, коли швидкість корозії стає значущою. Накопичення продуктів корозії (іржі), які мають більший об'єм, ніж вихідний метал, створює внутрішній тиск, що призводить до утворення тріщин, відшарування захисного шару та втрати несної здатності.

Графічне представлення моделі Tuutti (рис. 2) демонструє критичність переходу від стадії накопичення хлоридів до активного руйнування перерізу арматури. Момент депасивації сталі є точкою невороття, після якої експлуатаційні витрати на утримання споруди зростають експоненціально.



**Рисунок 2** — Модель життєвого циклу залізобетонної конструкції за Туутті (Tuutti) [9]

Ключовим параметром переходу від першої до другої стадії є порогова концентрація хлоридів (Chloride Threshold Value — CTV). Раніше це значення вважалось константою (наприклад, 0,4 % від маси цементу). Сучасні дослідження (Angst, Elsener) доводять, що CTV є стохастичною величиною, яка залежить від багатьох чинників: типу цементу, вологості, потенціалу сталі та якості контактної зони «сталь-бетон» [8]. Зокрема, наявність раковин та пустот на контакті з арматурою значно знижує поріг ініціації корозії.

### Вплив складу бетону на корозійну стійкість: роль SCM

Використання додаткових цементуючих матеріалів (Supplementary Cementitious Materials — SCM), таких як зола виносу, гранульований доменний шлак та мікрокремнезем, є сучасною тенденцією в технології бетону. Ці матеріали суттєво впливають на механізми хлоридної корозії.

**Покращення дифузійних властивостей.** У більшості досліджень показано тенденцію до зниження коефіцієнта дифузії хлоридів порівняно зі звичайним портландцементом [4, 10]. Це досягається завдяки пуцолановій реакції, яка ущільнює структуру пор, та фізичному перекриттю шляхів міграції іонів.

Зниження порогової концентрації. Водночас, дослідження Trejo та Tibbits [11], а також Jafari Azad та Isgor [6], виявили зворотний бік використання SCM. Заміщення частини клінкеру добавками призводить до зниження буферної ємності бетону (запасу гідроксиду кальцію). Це означає, що для зниження рН до критичного рівня потрібно менше агресивних агентів. Крім того, знижується здатність системи зв'язувати хлориди хімічним шляхом. У результаті, порогова концентрація хлоридів, необхідна для початку корозії, у бетонах із SCM може бути нижчою, ніж у чистих портландцементних системах.

Отже, використання SCM створює парадокс довговічності: зменшення проникності уповільнює надходження хлоридів, проте зниження буферної ємності бетону зменшує поріг депасивації. Реальний строк служби визначається балансом цих процесів, що обмежує застосування універсальних нормативних порогів.

Таким чином, оцінка довговічності бетонів з добавками вимагає балансування між уповільненим проникненням хлоридів (позитивний чинник) та зниженим порогом ініціації (негативний чинник). Це підкреслює необхідність використання розрахункових моделей, які враховують обидва параметри.

### **Аналіз нормативних методів визначення вмісту хлоридів та оцінювання стану**

Для практичної діагностики мостів критично важливим є використання стандартизованих методів випробувань, які дозволяють отримувати відтворювані результати та порівнювати їх з нормативними критеріями.

### **Метод визначення водорозчинних хлоридів у бетоні згідно з ASTM C1218/C1218M**

Стандарт ASTM C1218/C1218M-20 [12] встановлює методику визначення вмісту водорозчинних хлоридів у бетоні та цементному розчині, тобто тієї частини солей, яка може безпосередньо брати участь у процесі корозії арматури. Цей метод має прикладне значення як для контролю якості бетонів під час виготовлення, так і для оцінювання технічного стану експлуатованих конструкцій, зокрема мостів, плит та елементів проїзної частини. На відміну від кислоторозчинного аналізу, який визначає сумарну кількість зв'язаних і вільних хлоридів, даний стандарт фіксує лише активну частину, що безпосередньо впливає на електрохімічні процеси корозії. Отримані значення застосовують для порівняння з граничними концентраціями, наведеними у таких документах як ACI 318 [13], EN 206 [14] чи AASHTO LRFD [15], що регламентують допустимий вміст хлоридів у бетоні для різних умов експлуатації.

Для проведення випробування зразки бетону або цементного розчину відбирають у вигляді кернів або порошкових проб на різній глибині від поверхні конструкції. Найчастіше застосовують коронки з алмазним напиленням або роторні дрилі з пилозбірниками, які дозволяють отримати профіль розподілу хлоридів за товщею бетону. Після висушування та подрібнення матеріал просіюють через сито з розміром комірки 850 мкм і ретельно перемішують до однорідності. З підготовленої навіски масою близько 10 г відбирають пробу, яку поміщають у скляний стакан, додають 50 мл дистильованої води та доводять до кипіння. Після охолодження суспензію настоюють протягом 24 годин, що забезпечує повне розчинення вільних іонів хлориду. Далі розчин фільтрують, підкислюють азотною кислотою і додають декілька крапель перекису водню для нейтралізації сірководню, який може спотворити результати.

Визначення концентрації хлоридів здійснюють титруванням розчином нітрату срібла за методом Мора з використанням хроматного індикатора або потенціометричним способом, що дозволяє точно зафіксувати момент досягнення точки еквівалентності. Результат виражають у відсотках за масою бетону або у відсотках від маси цементу, а за потреби перераховують у

кілограми хлоридів на кубічний метр бетону. Метод забезпечує високу точність і відтворюваність: відхилення результатів у межах однієї лабораторії не перевищує 0,001 – 0,002 % Cl, а між лабораторіями — близько 0,004 %. У практиці інженерних обстежень значення, отримані за ASTM C1218, зазвичай у 1,5 – 2,0 рази нижчі за результати кислоторозчинних аналізів, що пояснюється визначенням лише водорозчинної, тобто агресивної, фракції солей.

Застосування цього методу особливо важливе для транспортних споруд, де відбувається накопичення протижелезних солей у поверхневих шарах бетону. Він дозволяє кількісно оцінити ступінь засолення, побудувати профіль проникнення хлоридів та спрогнозувати термін до досягнення критичного рівня в зоні арматури.

### **Метод електричної індикації здатності бетону протидіяти проникненню іонів хлориду згідно з ASTM C1202**

Стандарт ASTM C1202-22 [16] регламентує методику швидкого оцінювання здатності бетону протидіяти проникненню іонів хлориду шляхом вимірювання його електропровідності (Rapid Chloride Permeability Test — RCPT). Суть методу полягає у визначенні кількості електричного заряду (у кулонах), що проходить крізь циліндричний зразок бетону протягом шести годин при прикладеній напрузі 60 В постійного струму.

Один торець зразка занурюють у розчин натрій хлориду (NaCl, 3 %), а протилежний — у розчин натрій гідроксиду (NaOH, 0,3 N). Вимірюють електричний струм, що проходить крізь зразок, і за величиною переданого заряду роблять висновок про рівень проникності бетону для іонів хлориду.

Метод забезпечує швидку та надійну характеристику опору бетону до дії хлоридів і має добру кореляцію з тривалими методами випробувань на проникність, зокрема з методом AASHTO T 259 [17]. У стандарті визначено класифікацію бетонів за проникністю:

- понад 4 000 Кл — висока;
- 2 000–4 000 Кл — помірна;
- 1 000–2 000 Кл — низька;
- 100–1 000 Кл — дуже низька;
- менше 100 Кл — незначна.

Точність результатів залежить від багатьох чинників, зокрема віку зразків, складу суміші, типу та кількості мінеральних домішок (SCM), способу тверднення й температури під час випробування. Для бетонів із мінеральними домішками рекомендовано збільшувати строк тверднення до 56 діб. Метод не придатний для зразків, що містять армування або для бетону, модифікованого електропровідними полімерними складниками чи сталевією фіброю.

### **Метод визначення потенціалів корозії арматури в бетоні згідно з ASTM C876**

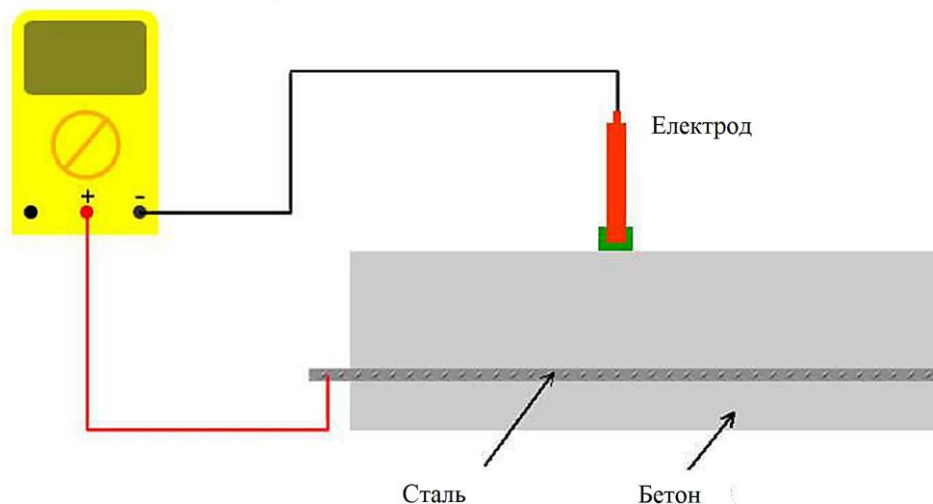
Стандарт ASTM C876-22b [18] регламентує методику оцінювання електричного потенціалу корозії нефарбованої арматури, закладеної у бетон, з метою визначення її корозійної активності (Half-Cell Potential). Метод заснований на вимірюванні різниці потенціалів між арматурою, що знаходиться у бетоні, та зовнішнім референтним електродом (найчастіше мідно-сульфатним, CSE), який розміщують на поверхні конструкції (рис. 3).

Процедуру можна виконувати як у лабораторних, так і в натурних умовах. Перед вимірюванням поверхню бетону звожують розчином із низьким електричним опором. Потенціали записують з точністю до 0,01 В та наносять на план конструкції для побудови карти ізоліній рівного потенціалу.

Інтерпретація результатів базується на числових критеріях потенціалу відносно мідно-сульфатного електрода (CSE):

- більше – 200 мВ: ймовірність корозії становить менше 10 %;
- діапазон від – 200 мВ до – 350 мВ: активність корозії є невизначеною;
- менше – 350 мВ: існує понад 90 % ймовірність активної корозії арматури.

Вольтметр високого імпедансу



**Рисунок 3** — Оцінювання різниці потенціалів між опорним електро́дом та арматурою [18, 19]

Метод дає змогу якісно оцінити просторовий розподіл активності корозії та локалізувати небезпечні ділянки в бетонних елементах мостів ще до появи видимих дефектів.

#### **Метод відбирання та визначення вмісту іонів хлориду у бетоні та сировинних матеріалах згідно з AASHTO T 260**

Стандарт AASHTO T 260-21 [20] встановлює комплексну методику відбору проб та хімічного аналізу для визначення вмісту іонів хлориду. Метою цього методу є кількісна оцінка концентрації хлоридів, які можуть сприяти корозії арматури. Цей документ є основним для дорожніх адміністрацій США.

Методика передбачає відбирання проб з певних глибин за допомогою покрокового висвердлювання порошку бетону, що дозволяє побудувати детальний профіль концентрації та розрахувати коефіцієнт дифузії. Відібраний матеріал піддають хімічному аналізу для визначення або кислоторозчинних, або водорозчинних хлоридів. Розрахунок базується на потенціометричному титруванні або методі Мора.

Результати аналізу за AASHTO T 260 мають пряму практичну цінність під час оцінювання технічного стану мостів, оскільки дозволяють точно визначити, чи досягла концентрація хлоридів на рівні арматури критичного порогу.

#### **Метод визначення кислоторозчинних хлоридів у розчинах та бетоні згідно з ASTM C1152/C1152M**

Стандарт ASTM C1152/C1152M-20 [21] регламентує методику визначення кислоторозчинних хлоридів, що дає можливість оцінити їхній загальний вміст у матеріалі (вільні + зв'язані). На відміну від методу ASTM C1218, цей стандарт передбачає розкладання матеріалу в азотній кислоті.

Метод передбачає подрібнення проби бетону до стану порошку (прохід крізь сито 850 мкм). Відібрана проба масою близько 10 г розчиняється у суміші води та розбавленої азотної кислоти. Після нагрівання та охолодження фільтрат титрують розчином нітрату срібла ( $\text{AgNO}_3$ ).

Цей метод дає «найгірший сценарій». Якщо загальний вміст хлоридів нижчий за поріг безпеки, корозія неможлива. Проте високий загальний вміст не завжди означає активну корозію, якщо значна частина хлоридів хімічно зв'язана продуктами гідратації цементу. Тому результати ASTM C1152 часто використовують як первинний скринінг або для оцінювання якості вихідних матеріалів (заповнювачів).

### Порівняльний аналіз методів

Вибір конкретної методики випробувань залежить від етапу життєвого циклу споруди та поставлених діагностичних завдань. Порівняльний аналіз стандартизованих методів ASTM та AASHTO дозволяє виділити їхні ключові особливості та межі застосування.

Основним критерієм під час оцінювання хімічного складу бетону є розмежування між загальним та активним вмістом хлоридів. Метод ASTM C1152 забезпечує оцінку «найгіршого сценарію», визначаючи сумарну кількість іонів, що потенційно можуть бути вивільнені при повній деградації структури бетону або внаслідок карбонізації. Це критично важливо для вхідного контролю матеріалів. Натомість ASTM C1218 фокусується виключно на водорозчинній фракції, яка безпосередньо бере участь в електрохімічних реакціях у поровому розчині. Практика показує, що значення водорозчинних хлоридів зазвичай у 1,5–2,0 рази нижчі за показники загального вмісту, що необхідно враховувати порівнюючи з нормативними порогами корозії.

Для швидкого ранжування бетонів за їхньою захисною здатністю доцільно застосовувати метод ASTM C1202 (RCPT). Хоча він не вимірює концентрацію хлоридів безпосередньо, показник пройденого заряду дає інтегральну оцінку проникності капілярно-пористої структури. Це робить його незамінним інструментом під час проектування нових конструкцій та підборі оптимального вмісту мінеральних добавок (SCM).

У процесі натурних обстежень мостів найбільшу цінність мають методи, що дозволяють оцінити динаміку процесу. Методика AASHTO T 260 через покрокове висвердлювання дає змогу побудувати графік розподілу концентрації хлоридів за глибиною, що є базою для розрахунку фактичного коефіцієнта дифузії та прогнозування часу до початку корозії. У поєднанні з картуванням потенціалів за ASTM C876, яке локалізує ділянки з високою ймовірністю активного розчинення сталі (менше — 350 мВ), інженер отримує повну картину технічного стану споруди без необхідності масового розкриття арматури.

Таким чином, для об'єктивного моніторингу транспортних споруд в Україні рекомендується перехід від одноразових вимірювань до комплексного підходу, який поєднує визначення профілю хлоридів (для прогнозування) та електрохімічну діагностику (для поточної оцінки стану).

Порівняння наведених методів наведено в **табл. 1**.

*Таблиця 1*

*Порівняльна характеристика методів аналізу хлоридної агресії*

Метод	Стандарт	Що вимірює	Основне застосування
Водорозчинні хлориди	ASTM C1218	Вільні іони (агресивна фракція)	Оцінювання поточної корозійної небезпеки
Кислоторозчинні хлориди	ASTM C1152	Загальний вміст (вільні + зв'язані)	Скринінг та контролювання вихідних матеріалів
Електропровідність (RCPT)	ASTM C1202	Прохідний електричний заряд (Кл)	Швидке оцінювання проникності бетону
Потенціали корозії	ASTM C876	Різниця потенціалів (мВ)	Локалізація зон активної корозії на об'єкті

### Висновки

**1. Комплексність деградації.** Хлорид-індукована корозія арматури має багатофакторний характер і визначається не лише зовнішнім надходженням солей, а й внутрішніми параметрами бетону (вологістю, поровою структурою, рН). Показано, що ігнорування синергії хлоридної агресії та карбонізації може призводити до систематичного заниження корозійного ризику, оскільки фронт карбонізації здатний вивільняти зв'язані хлориди та формувати локальні зони підвищеної концентрації біля арматури.

2. **Вплив SCM як конкурентна взаємодія чинників.** Використання золи-винесення, доменного шлаку та мікрокремнезему зазвичай знижує проникність бетону та уповільнює надходження хлоридів. Водночас зменшення лужного резерву й потенційне зниження порогу депасивації арматури вимагають диференційованого підходу до проектування бетонів із SCM і коректного вибору критеріїв довговічності.

3. **Точність діагностики та інтерпретації.** Для об'єктивної оцінки технічного стану мостів принциповим є розмежування водорозчинної (активної) та кислоторозчинної (загальної) фракцій хлоридів. Застосування методик ASTM C1218 і ASTM C1152 дозволяє відокремлювати поточний корозійний ризик від потенційного ресурсу конструкції та підвищує відтворюваність інженерних висновків.

4. **Перехід до інструментального та ризик-орієнтованого моніторингу.** Доцільним є поєднання хімічного профілювання хлоридів (AASHTO T 260) з електрохімічним картуванням потенціалів (ASTM C876), що забезпечує виявлення корозійних процесів на стадії ініціації. Такий підхід створює передумови для впровадження імовірнісних моделей оцінювання ризику та систем управління активами на основі фактичного технічного стану.

### Список літератури

1. Ali M., Shams M. A., Bheel N., et al. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 37252–37271. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4RA05506C>.
2. ДБН В.2.3-6:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).
4. Presuel-Moreno F. J., Moreno E. I. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Time to Corrosion Initiation for Specimens Exposed Long Term to Seawater. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689184>.
5. Reichert T. A., Balestra C. E. T., Balestra D. A. O., et al. Laboratory procedure for obtaining chloride profiles from concrete structures cores: a mathematical approach. *Journal of Building Rehabilitation*. 2023. Vol. 8. Article 41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00286-2>.
6. Jafari Azad V., Isgor O. B. A Thermodynamic Perspective on Admixed Chloride Limits of Concrete Produced with SCMs. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689183>.
7. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Ph.D. Thesis. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
8. Angst U. M., Elsener B. Chloride Threshold Values in Concrete – A Look Back and Ahead. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689176>.
9. Kim C, Choe D-E, Castro-Borges P, Castaneda H. Probabilistic Corrosion Initiation Model for Coastal Concrete Structures. *Corrosion and Materials Degradation*. 2020; 1(3):328-344. DOI: <https://doi.org/10.3390/cmd1030016>.
10. Wang, T., Zheng, J. J., & Dai, J. G. (2023). Analysis of time-dependent chloride diffusion in surface-treated concrete based on a rapid numerical approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, 19(3), 332–344. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1945113>.
11. Trejo D., Tibbits C. The Influence of SCM Type and Quantity on the Critical Chloride Corrosion Threshold. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689182>.
12. ASTM C1218/C1218M-20. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. (Інформація та документація).
13. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019. (Інформація та документація).

14. ДСТУ EN 206:2022. Бетон. Специфікація, продуктивність, виробництво та відповідність. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. (Інформація та документація).
15. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 10th ed. Washington, DC: AASHTO, 2024. (Інформація та документація).
16. ASTM C1202-22. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. (Інформація та документація).
17. AASHTO T 259-02. Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration. Washington, DC: AASHTO, 2002. (Інформація та документація).
18. ASTM C876-22b. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. (Інформація та документація).
19. Half-Cell Corrosion Mapping for Concrete [Електронний ресурс] / FrimeC Solutions. – Режим доступу: URL: <https://frimec.com/half-cell-corrosion-mapping-for-concrete/>.
20. 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. (Інформація та документація).
21. ASTM C1152/C1152M-20. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. (Інформація та документація).

### References

1. Ali M., Shams M. A., Bheel N., et al. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 37252–37271. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4RA05506C> [in English].
2. DBN V.2.3-6:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprovuvannia [State Building Norms (DBN V.2.3-6:2009) Transport facilities. Bridges and culverts. Inspection and testing]. Kyiv, 2009. 73 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. DSTU 9181:2022 Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnykh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 9181:2022) Guidelines for assessment and forecasting of the technical condition of highway bridges]. Kyiv, 2022. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
4. Presuel-Moreno F. J., Moreno E. I. Effect of fly ash and silica fume on time to corrosion initiation for specimens exposed long term to seawater. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689184> [in English].
5. Reichert T. A., Balestra C. E. T., Balestra D. A. O., et al. Laboratory procedure for obtaining chloride profiles from concrete structures cores: a mathematical approach. *Journal of Building Rehabilitation*. 2023. Vol. 8. Article 41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00286-2> [in English].
6. Jafari Azad V., Isgor O. B. A thermodynamic perspective on admixed chloride limits of concrete produced with SCMs. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689183> [in English].
7. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. PhD thesis. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982 [in English].
8. Angst U. M., Elsener B. Chloride threshold values in concrete — a look back and ahead. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689176> [in English].
9. Kim C., Choe D.-E., Castro-Borges P., Castaneda H. Probabilistic corrosion initiation model for coastal concrete structures. *Corrosion and Materials Degradation*. 2020. Vol. 1(3). P. 328–344. DOI: <https://doi.org/10.3390/cmd1030016> [in English].
10. Wang T., Zheng J. J., Dai J. G. Analysis of time-dependent chloride diffusion in surface-treated concrete based on a rapid numerical approach. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2023. Vol. 19(3). P. 332–344. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1945113> [in English].

11. Trejo D., Tibbits C. The influence of SCM type and quantity on the critical chloride corrosion threshold. *ACI Special Publication SP-308*. 2016. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.14359/51689182> [in English].
12. ASTM C1218/C1218M-20 Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. (Information and documentation) [in English].
13. ACI 318-19 Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019. (Information and documentation) [in English].
14. DSTU EN 206:2022 Beton. Spetsyfikatsiia, produktyvnist, vyrobnytstvo ta vidpovidnist [State Standard of Ukraine (DSTU EN 206:2022) Concrete. Specification, performance, production and conformity]. Kyiv, 2022. (Information and documentation) [in Ukrainian].
15. AASHTO LRFD Bridge design specifications. 10th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024. (Information and documentation) [in English].
16. ASTM C1202-22 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. (Information and documentation) [in English].
17. AASHTO T 259-02 Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington, DC: AASHTO, 2002. (Information and documentation) [in English].
18. ASTM C876-22b Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. (Information and documentation) [in English].
19. FprimeC Solutions. Half-cell corrosion mapping for concrete [Electronic resource]. Available at: URL: <https://fprimec.com/half-cell-corrosion-mapping-for-concrete/> [in English].
20. 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. (Information and documentation) [in English].
21. ASTM C1152/C1152M-20 Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. (Information and documentation) [in English].

---

**Volodymyr Kaskiv**, *Ph.D., Associate Professor*, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

**Pavlo Stashuk**, *Ph.D.*, <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

**Bohdan Zelenskyi**, *Ph.D.*, <https://orcid.org/0000-0002-9949-3209>

**Serhii Zavorodnii**, <https://orcid.org/0000-0003-1928-4544>

**Maksym Borysenko**, <https://orcid.org/0000-0001-9772-3536>

*State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine*

### THE ORETICAL ASPECTS OF CHLORIDE EFFECTS ON REINFORCED CONCRETE TRANSPORTATION STRUCTURES

#### **Abstract**

**Introduction.** The article considers the fundamental problem of ensuring the durability of highway bridges under aggressive chloride action. The operational reliability of transport structures is largely determined by the condition of reinforced concrete structures exposed to de-icing agents and cyclic wetting.

**Problem Statement.** Chloride-induced corrosion of reinforcement is one of the most dangerous degradation factors, leading to a loss of load-bearing capacity and premature failure of bridges. The existing regulatory framework of Ukraine only partially accounts for these processes, necessitating harmonization with international standards.

**Objective.** The objective of this work is to systematize theoretical knowledge regarding chloride mass transport mechanisms, analyze the influence of mineral admixtures and carbonation on corrosion resistance, and review modern regulatory methods for determining chloride content to improve the national bridge monitoring system.

**Materials and Methods.** Methods of analytical review of scientific literature and regulatory documents regarding diffusion processes, thermodynamic modeling of chloride binding, and probabilistic risk assessment methods were used.

**Results.** The differences between free and bound forms of chlorides are analyzed, and the effect of carbonation on the release of bound salts is examined. Regulatory methodologies for determining water- and acid-soluble chlorides, their advantages, and limitations are described in detail. The necessity of transitioning from deterministic threshold values to probabilistic models of corrosion risk assessment is substantiated.

**Conclusions.** The results demonstrate effective durability prediction of transport structures requires differentiated consideration of free and bound chlorides, especially for concretes with mineral admixtures and under carbonation conditions. The feasibility of implementing ASTM C876 and AASHTO T 260 methodologies into domestic bridge monitoring practice is substantiated. The proposed approach allows for the identification of corrosion processes at the initiation stage, which is a prerequisite for introducing asset management systems based on actual technical condition.

**Keywords:** reinforcement, reinforced concrete, corrosion, bridge, technical condition, transport structure, chlorides, diffusion, carbonation, durability prediction.