

УДК 691.32:620.193.7

ЕЛЕКТРОКОРОЗІЯ БЕТОНУ І ЗАЛІЗОБЕТОНУ: АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТА МЕТОДІВ ЗАХИСТУ

Д-р техн. наук С. В. Панченко, канд. техн. наук О. А. Дудін,
аспіранти І. С. Коваленко, О. А. Фоменко, О. О. Філімонов

ELECTROCORROSION OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE: ANALYSIS OF IMPACT AND PROTECTION METHODS

Dr. Sc. (Tech.) S. V. Panchenko (Tech.), PhD (Tech.) O. A. Dudin,
postgraduate students I. S. Kovalenko, O. A. Fomenko, O. O. Filimonov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336453>



Анотація. Стаття присвячена комплексному аналізу проблеми електрокорозії експлуатованих бетонних і залізобетонних конструкцій, зокрема, в умовах електрифікованих залізниць. Розглянуто основні джерела та механізми виникнення блукаючих струмів, їхній вплив на фізико-хімічні властивості бетону і корозію арматури. Особливу увагу приділено порівнянню впливу постійних і змінних блукаючих струмів, а також ролі хлорид-іонів у прискоренні руйнівних процесів. На основі аналізу останніх наукових публікацій і фундаментальних досліджень висвітлено основні аспекти руйнування конструкцій і запропоновано методи їх захисту. Автори статті також розглядають актуальні виклики залізничної інфраструктури України, підкреслюючи необхідність розроблення і впровадження ефективних стратегій для забезпечення її довговічності та безпеки.

Ключові слова: електрокорозія, бетон, залізобетон, блукаючі струми, змінний струм, постійний струм, залізнична інфраструктура, довговічність, захист.

Abstract. The Ukrainian railway infrastructure, as a key economic link, is strategically important but constantly faces significant loads and aggressive environments. This makes it vulnerable to structural damage. One of the most serious threats to the durability of its concrete and reinforced concrete structures is electrocorrosion. This phenomenon is caused by "stray currents" and high voltage, which arise from incomplete insulation between the rails and the ground. These currents intensify the migration of chloride ions and Ca^{2+} cations, accelerating rebar corrosion and concrete degradation.

The article systematically analyzes and summarizes current understandings of electrocorrosion, identifying key destruction mechanisms, influencing factors, and protection methods. It also outlines critical research gaps and practical implications for enhancing railway infrastructure durability. Studying the durability of concrete and reinforced concrete is critically important because, while processes like carbonation and chloride penetration are well-researched, electrocorrosion is a distinct and complex problem. The alkaline environment of concrete usually provides a passive layer on steel rebar, but the penetration of carbon dioxide and chloride ions destroys this protective layer.

Stray currents are divided into direct current (DC) and alternating current (AC). DC stray currents, typical for subways, cause significant corrosion of buried metal pipelines and accelerate pitting corrosion of steel, even surpassing the effects of fatigue. AC stray currents, common in AC-electrified railways, lead to a reduction in the service life of structures, although they cause less overall corrosion. The mechanisms of corrosion due to AC stray currents are more complex, including the rectification model, the alkalization mechanism, and the autocatalytic mechanism.

Stray currents significantly alter the physicochemical properties of concrete: they accelerate the diffusion of calcium ions, increase porosity, and weaken the concrete's ability to bind chloride ions, creating an accelerated corrosion cycle. Experimental studies have shown that an AC voltage of 40 V, in combination with water flow, causes the maximum loss of concrete strength and intensive dissolution of cement paste minerals.

The practical significance of these studies lies in improving the classification of concretes by permeability and developing protective solutions. These solutions include steel and liquid glass screens with deep grounding, as well as replacing traditional rail fastenings on sleepers and ballastless bridge deck slabs with resilient fastenings that have increased electrical resistance.

The Ukrainian railway infrastructure faces additional challenges: aging structures, consequences of military actions (damage to railway tracks and electrical infrastructure, which disrupts grounding and insulation), insufficient quality control of materials, and the lack of comprehensive monitoring systems.

Conclusions emphasize that electrocorrosion is a complex problem requiring a comprehensive approach to monitoring, diagnostics, and the implementation of modern protection methods. Prospects for further work include developing integrated real-time monitoring systems, in-depth study of the long-term effects of low AC voltages, creating new corrosion-resistant materials, optimizing existing protection systems, and adapting advanced computational methods for predicting degradation processes.

Keywords: electrocorrosion, concrete, reinforced concrete, stray currents, alternating current, direct current, railway infrastructure, durability, protection.

Вступ. Залізнична інфраструктура є стратегічно важливою ланкою економіки, яка забезпечує безперебійний рух вантажів і пасажирів. Її споруди, такі як мости, тунелі, водопропускні труби та інші, які здебільшого виконані з бетону і залізобетону, зазнають постійних і змінних навантажень, а також впливу агресивних середовищ [1]. Це робить їх вразливими до структурних пошкоджень, що можуть призвести до значних економічних втрат і ризиків для безпеки [1].

Однією з найбільш серйозних і складних проблем, що впливають на довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій в умовах електрифікованих залізниць, є електрокорозія [1, 4]. Це явище спричинене виникненням так званих «блукуючих струмів» і впливом високовольтної напруги [1, 4]. На залізничних коліях, де контактна мережа або контактна рейка подає живлення, а ходові рейки слугують зворотним шляхом, неповна ізоляція між ходовими рейками та

грунтом спричиняє витік струму і формування блукаючих струмів [1, 4]. Ці струми суттєво змінюють процеси дисоціації хлорид-іонів і катіонів Ca^{2+} , посилюючи їхню міграцію і тим самим прискорюючи корозійні процеси [1, 4]. Корозія арматури в залізобетонних спорудах є основною причиною погіршення стану плит безбаластного мостового полотна, опор мостів, водопропускних труб, тунелів та інших армованих споруд [3].

Автори статті мають на меті систематично проаналізувати і синтезувати сучасні уявлення про електрокорозію бетонних і залізобетонних конструкцій в умовах електрифікованих ділянок залізниць, виявити основні механізми руйнування, фактори впливу і методи захисту, а також окреслити критичні дослідницькі прогалини та практичні наслідки для підвищення довговічності залізничної інфраструктури [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження довговічності бетону і залізобетону є критично важливим для гарантування безпечної і тривалої експлуатації інженерних споруд [3]. Процеси корозії бетону, такі як карбонізація та проникнення хлоридів, є добре вивченими [4]. Сталь, занурена в бетон без хлоридів, має високу корозійну стійкість завдяки лужному середовищу бетону (рН 12,5-13,8), яке формує пасивний шар на її

поверхні [4]. Однак проникнення діоксиду вуглецю (карбонізація) і хлорид-іонів є основними причинами руйнування цього пасивного шару [4]. Хлорид-іони можуть мігрувати через бетон переважно трьома механізмами: природною дифузією, електричною міграцією і транспортом через порову рідину за рахунок капілярних сил або зовнішнього градієнта тиску [5]. Наявність хлоридів, навіть у невеликих кількостях (наприклад $\geq 0,6$ моль/л), значно підвищує схильність до пітингової корозії [1]. Окрім того, лужно-кремнеземна реакція (ЛКР), що виникає внаслідок взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, також може призводити до деградації бетону. В Україні ця проблема була зафіксована та пов'язана з безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу [7].

Електрокорозія: механізми та вплив блукаючих струмів. Блукаючі струми є постійним явищем електрифікованих залізниць, де їх виникнення пов'язано з поганою ізоляцією між рейками та землею, створюючи небажаний шлях повернення тягового струму [1, 4]. Ці струми поділяють на постійні (ПС) і змінні (ЗС), кожен із яких має свої специфічні механізми впливу на корозію металів і бетону [2, 12]. Порівняльний аналіз механізмів і впливу корозії, спричиненої ними, подано в таблиці.

Таблиця

Порівняльний аналіз механізмів і впливу корозії, спричиненої ЗС і ПС блукаючими струмами, на бетон

Характеристика	Постійний струм (ПС)	Змінний струм (ЗС)
1	2	3
Типові джерела	Метрополітени та залізничний транспорт, що працюють на ПС [12]	Електрифіковані залізниці, що працюють на ЗС [12]
Основний механізм корозії	Сильний поляризаційний ефект, пряма втрата електронів, прискорення пітингу	Ректифікаційна модель, механізм луговання, автокаталітичний механізм

Продовження таблиці

1	2	3
Вплив на метал (загальний)	Значна корозія, висока інтенсивність, прискорення пітингової корозії можуть перевершувати втомне руйнування та хлоридну корозію	Менша корозія металевих труб, скорочення терміну служби бетонних і залізобетонних споруд; стохастичний характер корозії в СФБ
Вплив на порову структуру бетону	Прискорює дифузію іонів кальцію, збільшує пористість	Прискорює дифузію іонів кальцію, збільшує пористість
Вплив на здатність зв'язувати хлориди	Значне ослаблення	Значне ослаблення

Корозія, спричинена постійними блукаючими струмами (ПС): цей тип корозії часто асоціюють із метрополітенами та залізничним транспортом, що працюють на постійному струмі [2, 11]. Постійні блукаючі струми можуть викликати значну корозію заглиблених металевих трубопроводів через сильний поляризаційний ефект, який вони чинять на прилеглі метали [1, 11]. Вплив цієї корозії значно вищий, ніж природної корозії. Прямі блукаючі струми прискорюють початкову пітингову корозію на сталевих поверхнях і збільшують швидкість корозії, при цьому хлорид-іони діють як каталізatori. Дослідження показують, що корозійні ефекти прямих блукаючих струмів на залізничних коліях можуть навіть перевершувати ті, що спричинені втомою та хлоридними солями [1].

Корозія, спричинена змінними блукаючими струмами (ЗС): корозія ЗС переважно відбувається поблизу електрифікованих залізниць. На відміну від ПС, ЗС викликає меншу корозію труб, але призводить до скорочення терміну їхньої служби, тому потребує більшої уваги [2]. Основна реакція корозії ЗС подібна до корозії ПС [2]. Однак механізми корозії ЗС є більш складними, що підтверджено кількома моделями:

- ректифікаційна модель: ця модель показує, що корозія ЗС виникає через те, що струм, який виділяє метал під час анодної поляризації, є більшим, ніж струм під час

катодного відновлення. Під час позитивного напівперіоду змінного струму іони металу вивільняються з металевої поверхні. У негативному напівперіоді частина цих іонів металу має бути відновленою і відкладеною назад на металеву поверхню, але цей процес не повністю реалізований, що призводить до накопичення втрат іонів металу і, зрештою, корозії [2];

- механізм лугування: запропонована Нільсеном теорія припускає, що коли ЗС протікає по металевих поверхнях, електролітична реакція генерує гідроксид-іони, що підвищує значення рН навколишнього середовища та формує лужне середовище. Одночасно високочастотний і високоамплітудний циклічний потенціал ЗС і коливання потенціалу прискорюють реакцію, сприяючи подальшому збільшенню швидкості вилугування [2, 4];

- автокаталітичний механізм: також запропонований Нільсеном, цей механізм визначає три необхідні умови для виникнення корозії ЗС блукаючими струмами в трубопроводах під катодним захистом: напруга, індукована ЗС, невелике пошкодження антикорозійного шару та надмірно негативна катодна поляризація [2].

Вплив на сталефірбетон (СФБ): дослідження показують, що СФБ, який часто використовують у будівництві залізничних тунелів, демонструє відмінну стійкість до ПС напругою до 1,0 В за відсутності хлоридів [6]. Однак, коли

електроліт містить 0,6 моль/л хлоридів, зменшеного ПС напругою 0,4 В було достатньо для активізації пітингової корозії, що вказує на зниження корозійної стійкості [6]. Застосування тесту впливу змінного струму витоку на вбудовані сталеві стрижні показав стохастичний характер корозії зі значним зниженням корозійного потенціалу (E_{corr}) і відповідним збільшенням густини корозійного струму (i_{corr}) на деяких волокнах [6]. Цей стохастичний характер корозії ЗС свідчить про складність її прогнозування та необхідність подальших досліджень у цій галузі.

Вплив блукаючих струмів на фізико-хімічні властивості бетону

Блукаючі струми мають суттєвий вплив на фізико-хімічні властивості бетону. Вони прискорюють дифузію іонів кальцію, зменшуючи вміст гідроксиду кальцію порівняно зі зразками, які не зазнали впливу струму [1, 4]. Цей вплив змінює порову структуру бетону, значно збільшуючи пористість (наприклад на 26,3 %, 31,2 % і 36,1 % для зразків, електрифікованих струмом 50 мА, 100 мА і 150 мА відповідно після 28 днів) [1]. Досліджувані зразки мають вищий вміст хлоридів порівняно з неелектрифікованими, при цьому вільних хлоридів більше, ніж зв'язаних, зі збільшенням струму та часу. Здатність бетону зв'язувати хлорид-іони, що є критичним для запобігання корозії арматури, значно слабшає під дією блукаючих струмів; наприклад, за струму 150 мА вона може становити лише 60 % порівняно зі зразками, які не зазнали впливу струму [1].

Застосування зовнішніх електричних полів до бетонних конструкцій широко використовують для захисту від хлоридного впливу або оцінювання їхньої стійкості до проникнення хлоридів за короткий період, оскільки це прискорює рух іонних у бетоні [9]. Однак важливо враховувати, що різниця потенціалів між двома бетонними поверхнями завжди нижча, ніж та, що подана на електроди, через вплив поляризації, що додатково впливає на

часовий і просторовий розподіл концентрації іонів у поровій рідині бетону. Зовнішні електричні поля зазвичай прискорюють міграцію іонів (і води) у цементних матеріалах [9].

Сучасний стан досліджень довговічності залізничних бетонних конструкцій

Дослідження методів оцінювання довговічності наявних бетонних конструкцій все ще перебувають на ранніх стадіях, і систематизація отриманих результатів потребує подальшого розвитку [10]. Фактори, що впливають на довговічність і надійність залізничних споруд, поділяють на три основні категорії [3]:

1. Матеріальні фактори. До них належать властивості сировини (цементу, заповнювачів, води та домішок), співвідношення компонентів суміші, вміст лугів і хлоридів у заповнювачах і домішках. Наприклад, високий вміст лужних металів у цементі та заповнювачах може призвести до лужно-агрегатної реакції, що спричиняє об'ємне розширення та розтріскування. Деякі хімічні домішки також можуть вносити шкідливі іони або викликати небажану довгострокову усадку, впливаючи на довговічність [3].

2. Кліматичні фактори. Середовище експлуатації конструкцій і споруд суттєво впливає на довговічність [3]. Вологі ґрунти є критичними, оскільки вода діє як електроліт, сприяючи електрохімічній корозії глибинних трубопроводів [2]. Обводнені умови експлуатації особливо відзначено як вирішальний фактор впливу ЗС витоку та високої напруги на корозію бетону [4].

3. Фактори навантаження. Залізнична інфраструктура зазнає як статичних, так і динамічних навантажень від поїздів [3, 10]. Залізничні мости, наприклад, витримують постійні та тимчасові навантаження, що сприяє їхній вразливості до структурних руйнувань [1, 10].

Взаємодія між різними механізмами корозії є основним фактором інтенсифікації корозії. Проникнення хлоридів і

карбонізація послаблюють пасивуючий шар сталі, роблячи її більш сприйнятливою до електрокорозії [4]. Більш того, блукаючі струми, як було показано, посилюють транспорт хлоридів і зменшують здатність бетону зв'язувати хлориди [1]. Це створює цикл зворотного зв'язку, що призводить до прискореної корозії. Розуміння цієї синергічної дії є вирішальним для розроблення ефективних засобів захисту.

Мета дослідження. Цей огляд має на меті систематично проаналізувати і синтезувати сучасні уявлення та поточний стан знань про електрокорозію бетону та залізобетонних конструкцій в умовах електрифікованих залізниць, виявити основні механізми корозії, фактори впливу і методи захисту, а також окреслити критичні дослідницькі прогалини та практичні наслідки для підвищення довговічності інфраструктури, особливо в Україні.

Основна частина дослідження

Механізм впливу змінного струму на бетон і залізобетон

Фундаментальні дослідження значно поглибили розуміння механізмів електрокорозії, спричиненої змінним струмом, що є особливо актуальним для електрифікованих залізниць України, де 51 % ділянок електрифіковано змінним струмом [8].

Електрокорозійне руйнування бетону та розчину

Дослідження показали, що електрокорозійне руйнування цементного

каменю та бетону змінним потенціалом і струмом витoku обумовлене однобічною провідністю в електричному полі гідросилікатного гелю, який має величезну питому поверхню [4]. Процес вилуговування відбувається шляхом електроміграційного та дифузійного перенесення іонів:

- електроміграційне перенесення: під впливом позитивного потенціалу, що з'являється в кожному напівперіод коливань напруги, протиіони (ПРІ) Ca^{2+} у подвійному електричному шарі (ПЕШ) частинок гелю переміщуються вглиб цементного каменю електроміграційним шляхом. Переміщення потенціалвизначальних іонів (ПВІ) OH^- , міцно зв'язаних із поверхнею частинок, при цьому виключено. За один напівперіод коливань ПРІ Ca^{2+} виходять за межі ПЕШ і переміщуються дифузійним шляхом вглиб розчину цегляної кладки або бетону. Це призводить до виникнення позитивного заряду та потенціалу на внутрішній поверхні кладки, а на поверхні з боку ґрунту – негативних. У водопропускних трубах із постійним або частим водотоком ці процеси супроводжує вилуговування розчину кладки всередині труби, що призводить до ослаблення адгезії розчину до цегли [4];

- кількісний опис: швидкість електроміграційного потоку ПРІ Ca^{2+} у бетоні може бути визначена за формулою, виведеною в рамках фундаментальних досліджень [4]:

$$V = (U * \varepsilon * \varepsilon_0 * \zeta * \alpha * \gamma_{\Gamma}) / (d_{\text{СК}} * l_{\text{КП}} * \eta), \quad (1)$$

де U – величина змінної напруги, В;

ε і ε_0 – відносна діелектрична проникність води та електрична стала ($8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м);

ζ – електрокінетичний потенціал частинок гелю, В;

α – ступінь гідратації цементу;

γ_{Γ} – частка гідросилікатного гелю в продуктах гідратації (близько 0,75);

$d_{\text{СК}}$ – відстань від лінії ковзання до стінки капілярів, м;

$l_{\text{КП}}$ – відстань від контактного проводу до конструкції, м;

η – в'язкість води, Па·с.

Підставляючи відповідні значення, отримали швидкість потоку катіонів – $V = 25 \times 10^{-6}$ м/с і довжину шляху, що вони проходять за один напівперіод коливань

змінного струму, $-I_{EM} = 0,25$ мкм. Це значно перевищує товщину ПЕШ на частинках і відповідає розмірам капілярів у гідросилікатному гелі.

Електрокорозія арматури

Корозія арматури під дією високовольтної змінної напруги відбувається через безповоротне винесення за межі захисного шару бетону катіонів заліза Fe^{2+} . Це винесення супроводжено переходом з арматури вивільнюваних електронів у гідроксильні комплекси типу $OH^-H^+-OH^-$, які переходять до поверхні арматури за естафетним механізмом [4]. При цьому з кожним періодом напруги відбувається безповоротне винесення катіонів Fe^{2+} і їх закріплення в ПЕШ частинок гелю, а на поверхні арматурного стрижня накопичується надлишок електронів. Нейтралізація електронів відбувається шляхом окиснювання протонами, що знову створює можливість відриву катіонів Fe^{2+} від арматури [4].

Вплив на коефіцієнт дифузії

Перенесення катіонів у гідросилікатному гелі впливає на коефіцієнт дифузії іонів у бетоні. Природу такої зміни коефіцієнта дифузії іонів у бетоні розглянуто на основі рівняння Ейнштейна для коефіцієнта дифузії D колоїдних частинок, а також першого закону Фіка для дифузійного перенесення речовини. Виявлено, що коефіцієнт дифузії катіонів Ca^{2+} у граничному шарі води перебуває у обернено пропорційній залежності від діелектричної проникності води в цьому шарі та обернено квадратичній залежності від водоцементного відношення (В/Ц) [4, 8].

Експериментальні дослідження та їхні результати

Експериментальні дослідження зміни струмів, що проходять через бетон під тривалим впливом циклічної змінної напруги (80 В, 40 В, 10 В і 5 В) у проточній воді, показали важливі закономірності:

1. Вплив змінного струму на властивості бетону. Встановлено, що напруга 40 В у поєднанні з потоком води

викликає максимальну втрату частинок C_3A і C_3S і найбільшу втрату міцності бетону. Тривалий вплив пульсуючої змінної напруги величиною 40 В у сполученні з протоком води значно зменшує міцність бетонних зразків — на 63 % і 105 % порівняно з проточною і стоячою водою без впливу струму відповідно [4].

2. Розчинення мінералів цементного каменю. Фізико-хімічні дослідження, зокрема рентгенофазовий аналіз, показали, що циклічна змінна напруга 40 В інтенсивно розчиняє портландит $Ca(OH)_2$ і аліт C_3S . Напруга 80 В інтенсивно розчиняє гідросульфогідроалюмінати кальцію (ГСАК), а 10 В — C_3A . Напруга 5 В розчиняє ГСАК, але не виносить продукти розчинення, оскільки її величина є недостатньою для цього [4]. Максимальний розчинювальний вплив пульсуючої змінної напруги визначено величиною напруги, а також рівністю швидкості розчинення та швидкості виносу продуктів розчинення, чого найбільше можна досягти за напруги 40 В [4].

Практичне значення та методи захисту

Результати досліджень мають значне практичне значення для підвищення довговічності об'єктів залізничної інфраструктури.

1. Удосконалення класифікації бетонів. На основі залежностей коефіцієнтів дифузії бетону від його марки за водопроникністю (W) і В/Ц удосконалено класифікацію бетонів за проникністю, прийняту в ДСТУ Б В.2.6-145-2010. До трьох груп (нормальної, зниженої та особливо низької проникності) додано ще дві: бетон високої проникності (W1; В/Ц = 1; $D \approx 0,0001$ см²/с) і бетон найнижчої проникності (W10; В/Ц = 0,35 і $D \approx 0,000000001$ см²/с) [4].

2. Розроблення захисних рішень. За результатами досліджень розроблено схеми та конструктивні рішення захисту від електрокорозії, спричиненої змінною напругою та струмами витоку. До них належать:

- суцільні сталеві екрани з глибинним заземлювачем;
- сітчасті екрани понизу опор із глибинним заземлювачем;
- рідкоскляні екрани з глибинним заземлювачем;
- заміна на шпалах або плитах безбаластного мостового полотна скріплення типу КБ або КПП-5 на пружні скріплення УС-1 або PRS-4 з анкерами на сірчаній мастиці, які мають набагато більший електричний опір [4].

Актуальні виклики для залізничної інфраструктури України

Українська залізнична інфраструктура, що є однією з найбільших у Європі, стикається з численними викликами, які посилюють проблему довговічності, зокрема електрокорозії. Однак значна частина цієї інфраструктури була побудована десятиліття тому і потребує модернізації та посилення захисту від корозійних процесів.

Вплив воєнних дій. Повномасштабна агресія Російської Федерації призвела до значних пошкоджень об'єктів залізничної інфраструктури. За попередніми оцінками, було пошкоджено або втрачено контроль над 6 тис. км залізничних колій, а також багатьма об'єктами електричної інфраструктури, зокрема електричних підстанцій [13]. Ці пошкодження не лише створюють прямі руйнування, але й можуть посилити проблеми електрокорозії через порушення цілісності заземлення, ізоляції та систем відведення блукаючих струмів.

Старіння інфраструктури. Багато залізничних споруд в Україні досягли або перевищили свій проєктний термін служби. Це робить їх більш уразливими до впливу блукаючих струмів та інших агресивних факторів. Через це є нагальна необхідність оцінювання довговічності існуючих конструкцій і розроблення ефективних стратегій обслуговування та ремонту [3].

Недостатній контроль якості матеріалів. Проблеми, такі як лужно-кремнеземна реакція в бетонних шпалах,

пов'язані з безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу [8], підкреслюють важливість суворого контролю якості будівельних матеріалів для забезпечення довговічності конструкцій.

Відсутність комплексних систем моніторингу. Наразі відсутні формалізовані програми відстеження витрат на корозію та комплексні системи моніторингу для виявлення та кількісного оцінювання електрокорозії на залізниці України [12, 14]. Це ускладнює активне управління проблемою та призводить до реагування на вже наявні проблеми, а не їх запобігання [12, 14].

Висновки

1. Електрокорозійне руйнування бетону та залізобетону в умовах електрифікованих залізниць є складною проблемою, спричиненою як постійними, так і змінними блукаючими струмами. Механізми корозії включають електроміграційне та дифузійне перенесення іонів, розчинення цементного каменю та корозію арматури, що посилено наявністю хлорид-іонів та обводненими умовами експлуатації [1, 4].

2. Дослідження підтверджують, що змінний струм, хоча, як вважають, менш агресивний, ніж постійний, також викликає значну електрокорозію, особливо за певних величин напруги (наприклад 40 В), що призводить до інтенсивного розчинення мінералів цементного каменю і втрати міцності бетону [4, 8]. Це підкреслює необхідність урахування специфіки впливу змінного струму для проєктування та експлуатації залізничних споруд.

3. Вплив блукаючих струмів суттєво змінює фізико-хімічні властивості бетону, прискорюючи дифузії іонів кальцію, збільшуючи пористість і значно послаблюючи здатність бетону зв'язувати хлорид-іони [1]. Це створює синергійний ефект, що прискорює руйнування конструкцій і споруд.

4. Для захисту від електрокорозії розроблено та впроваджено різні

конструктивні рішення, такі як сталеві, сітчасті та рідкоскляні екрани з глибинними заземлювачами, а також скріплення із підвищеним електричним опором [4]. Ці заходи дають змогу підвищити довговічність споруд і забезпечити економічний і соціальний ефект.

5. Щодо залізничної інфраструктури України, то наявні такі проблеми як старіння конструкцій, наслідки воєнних дій, контроль якості матеріалів, що посилюють ризики електрокорозії. Це потребує комплексного підходу щодо моніторингу, діагностики та впровадження сучасних методів захисту.

Перспективи подальших робіт

Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробленні інтегрованих

систем моніторингу електрокорозійного стану конструкцій у реальному часі, що дасть змогу перейти від реактивного до проактивного обслуговування. Необхідно також поглибити вивчення довгострокового впливу низьких змінних напруг і їхньої комбінованої дії з іншими агресивними факторами. Розроблення нових матеріалів із підвищеною електрокорозійною стійкістю, а також оптимізація сучасних захисних покриттів і систем заземлення є основними напрямками. Особливу увагу слід приділити адаптації та впровадженню передових обчислювальних методів, таких як фізично-інформовані нейронні мережі, для більш точного прогнозування та моделювання процесів деградації в складних умовах експлуатації залізничної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Ni Y., Zhu E. & Chen L. The Impact of Stray Currents on Chloride Transport in the Concrete of Urban Rail Transit Structures. *Buildings*. 2025. 15(10). 1695. <https://doi.org/10.3390/buildings15101695>.
2. Liang H., Wu Y., Han B., Lin N., Wang J., Zhang Z. & Guo Y. Corrosion of Buried Pipelines by Stray Current in Electrified Railways: Mechanism, Influencing Factors, and Protection. *Applied Sciences*. 2024. 15(1). 264. <https://doi.org/10.3390/app15010264>.
3. Tang K. Assessing Stray DC and AC Current-Induced Corrosion in Steel Fibre-Reinforced Concrete (SFRC) in Railway Tunnelling Construction. *International Journal of Civil Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s40999-024-01018-4>.
4. Дудін О. А. Механізм впливу змінного струму витоку і високовольтної напруги на обводнені бетонні, залізобетонні та кам'яні споруди: дис. ... канд. техн. наук. Харків: УкрДАЗТ, 2012. 276 с.
5. Li J. & Zhang Y. Durability evaluation for existing railway engineering: a review. *Railway Science*. 2024. <https://doi.org/10.1108/rs-11-2023-0044>.
6. Hayes N. W. *Effect of Alkali-Silica Reaction on Confined Reinforced Concrete*. Doctoral Dissertations. University of Tennessee. 2020. 5805. https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/5805.
7. Lovasi T. & Kouril M. Electrochemical chloride extraction (ECE) from a reinforced concrete structure may be accompanied with an electrochemical injection of healing agents (EICI) if such agents are positively charged and are able to migrate towards the activated reinforcement. *Athens Journal of Sciences*. 2019. 6(1). 4-12.
8. Angst R. Corrosion-related damage of RC structures – a short review of possible limit states. *RILEM Technical Letters*. 2020. 5. 10-18.
9. Numerical modeling of multi-ionic transport with/without electrical field applied in sound and microcracked ordinary and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ResearchGate*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/373515064_Numerical_modeling_of_multi-

ionic_transport_withwithout_electrical_field_applied_in_sound_ and_microcracked_ordinary_and_ultra-high-performance_fiber-reinforced_concrete.

10. Physics-informed neural networks (PINNs) offer a mesh-free approach to solving partial differential equations (PDEs) with embedded physical constraints. *MDPI*. 2023. 13(10). 1571. <https://doi.org/10.3390/math13101571>.

11. Al-Shetwi A. Q. High-Voltage Direct-Current (HVDC) Systems: A Comprehensive Review of Technological Evolution, Fault Characteristics, and Advanced Signal Processing Techniques for Fault Detection. *Energies*. 2025. 18(12). 3106. <https://doi.org/10.3390/en18123106>.

12. Diakov A. A. Електрифікація залізниць України: поточний стан та перспективи розвитку. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2017. Вип. 171. 78-85.

13. Нові та старі виклики: як тримається українська інфраструктура під час війни. *ЕБА*. 2022. URL: <https://eba.com.ua/novi-ta-stari-vyklyky-yak-trymayetsya-ukrayinska-infrastruktura-pid-chas-vijny/>.

14. Stray current induced corrosion is a major technical challenge for modern electrified railway systems. *ROSAP*. 2007. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/13213/dot_13213_DS1.pdf.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Тел.: +380994886100.

E-mail: panchenko074@ukr.net.

Дудін Олексій Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент, декан будівельного факультету, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6838-1669. Тел.: +38 (095) 090-72- 83.

E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Коваленко Ігор Станіславович, аспірант, будівельний факультет, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 557-00-08. E-mail: kovalenko75@kart.edu.ua.

Філімонов Олександр Олександрович, аспірант, будівельний факультет, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 900-18-27. E-mail: filimonov7@kart.edu.ua.

Фоменко Олександр Анатолійович, аспірант, будівельний факультет, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 563-09-98. E-mail: fomenko9@kart.edu.ua.

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Tel.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.

Dudin Oleksii, PhD., Assoc. Prof., Dean of the Civil Engineering Faculty, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6838-1669. Tel.: +38 (095) 090-72-83. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Kovalenko Igor, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 557-00-08. E-mail: kovalenko75@kart.edu.ua.

Filimonov Oleksandr, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 900-18-27. E-mail: filimonov7@kart.edu.ua.

Fomenko Oleksandr, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 563-09-98. E-mail: fomenko9@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.