

УДК 625.14:699.887

**РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО ЕЛЕКТРОКОРОЗІЮ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЇХНЬОГО ЗАХИСТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ КОМПОЗИЦІЙ**

Доктори техн. наук А. А. Плуґін, О. С. Борзяк, канд. техн. наук О. А. Плуґін, аспіранти О. П. Крикун, В. В. Зінченко

**DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT ELECTRICAL CORROSION OF RAILWAY TRACK STRUCTURES AND IMPROVEMENT OF THEIR PROTECTION METHODS USING ELECTRICALLY CONDUCTIVE COMPOSITIONS**

DSc (Tech.), Professor A. A. Plugin, DSc (Tech.) O. S. Borziak, PhD (Tech.) O. A. Pluhin, postgraduate students O. P. Krykun, V. V. Zincenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>



***Анотація.** У дослідженні розглянуто розвиток уявлень про механізм протікання корозійних струмів через конструкції залізничної колії і споруд та обґрунтовано способи їхнього захисту від електрокорозії. У результаті теоретичних досліджень і натурних обстежень уточнено електричні кола струмів витоку від пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу ПООП, що виникає під час проходження електричного рухомого складу електрифікованими постійним струмом залізничними коліями. Встановлено носії струму в елементах і конструкціях колії і споруд. З'ясовано, що в залізобетонних шпалах, опорах пасажирських платформ через вплив ПООП утворюються зони нейтралізації і вилугування бетону, катодна та анодна зони сталеві арматури. У цих зонах протікають відповідні хімічні та електрохімічні реакції вилугування і карбонізації вапна, окиснення заліза тощо. Запропоновано запобігати корозійним процесам у цих зонах шляхом відведення струмів заземленими екранами-покриттями з електропровідних композицій на основі мінеральних в'язучих. Запропонований показник ефективності цих екранів-покриттів, що є ступенем зниження сили струму через конструкцію. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що він залежить від частки площі контакту сталевого заземлювача з екраном від площі самого екрана, отримано відповідні залежності.*

*Обґрунтовано нові способи захисту конструкцій колії і споруд від електрокорозії, розроблено відповідні конструктивно-технологічні рішення.*

***Ключові слова:** електрифікована залізниця, постійний струм, залізнична колія, споруда, електрокорозія, мінеральні в'язучі, електропровідність, захист.*

***Abstract.** Research is devoted to the development of ideas about the mechanism of the flow of corrosion currents through the structures of railway tracks and buildings and the justification of methods of their protection against electrical corrosion. As a result of theoretical studies and field tests, the electric circuits of the leakage currents from the pulsating unidirectional electric potential of the POEP, which arise during the passage of the electric rolling stock along the electrified direct current railway tracks, have been clarified. Current carriers are installed in the elements and structures of the track and buildings. In concrete, soil, which are conductors of the second kind, these carriers are mainly cations  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ , anions  $OH^-$ . It was found that in reinforced concrete sleepers, supports of passenger platforms due to the influence of POEP, zones of neutralization and leaching of concrete, cathode and anode zones of steel reinforcement are formed. Corresponding chemical*

and electrochemical reactions of leaching and carbonization of lime, oxidation of iron, etc. occur in these zones. It is proposed to prevent corrosion processes in these zones by diverting currents with grounded screens-coatings made of electrically conductive compositions based on mineral binders - Portland cement with a complex chemical additive or sodium silicate and a filler - dispersed graphite. The proposed indicator of the effectiveness of these screens-coatings, which is the degree of reduction of the current strength through the structure. As a result of experimental studies, it was established that it depends on the share of the contact area of the steel grounding device with the screen from the area of the screen itself, and the corresponding dependencies were obtained. New methods of protecting track structures and structures from electrical corrosion are substantiated, and appropriate structural and technological solutions are developed.

**Keywords:** electrified railway, direct current, railway track, construction, electrocorrosion, mineral binders, electrical conductivity, protection.

**Вступ.** На сьогодні значна кількість вантажних і пасажирських перевезень у світі здійснюється залізницями. Найбільш економічно ефективними та екологічно чистими є електрифіковані залізниці. Але вони є джерелом струмів витоку, що надходять з рейок у конструкції, споруди, земляне полотно і далі вже як блукаючі струми розтікаються по землі, «шукаючи» напрямок до відсмоктувальних ліній контактної мережі. Значна кількість залізниць електрифікована постійним струмом, що спричиняє електрокорозійні пошкодження конструкцій, з яких стікає, і конструкцій, на які натікає вже як блукаючий струм. Проблеми запобігання електрокорозійним пошкодженням остаточно не вирішені навіть у розвинутих країнах, тому дослідження про розкриття механізмів електрокорозії конкретних конструкцій і способів захисту від неї залишаються актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і розробок.** Відомо, що металеві конструкції та арматура залізобетонних конструкцій під дією постійних струмів, зокрема струмів витоку з рейкових колій електрифікованих постійним струмом залізниць, зазнають електрокорозії [1–5]. Електрокорозійні пошкодження, хоча і меншою мірою, спостерігаються навіть на сталевібробетоні [6]. Так, однією з конструкцій, що зазнає електрокорозійних пошкоджень, є залізобетонні опори високих пасажирських платформ (рис. 1). Можливо, через це в

1980-х роках на українських залізницях замість залізобетонних опор (рис. 1, а) як захід первинного захисту почали встановлювати більш масивні бетонні опори (рис. 1, б). Проте в роботі [5] встановлено, що в приарматурній зоні під впливом постійного струму бетон зазнає деструкції. У роботі [7] теоретично та експериментально доведено, що у випадку впливу пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП та відповідного струму, обумовлених режимом руху секціями електрифікованої колії, бетон у залізобетонних і навіть неармованих бетонних конструкціях також зазнає електрокорозії. Електрокорозія в цьому випадку полягає в інтенсивному електроміграційному вилугуванні вапна з цементного каменю.

У роботі [8] запропоновано схему стікання струму з електрифікованої постійним струмом залізничної колії на ділянках з позитивним ПОЕП на рейках та її натікання на навколишні конструкції, зокрема пасажирські платформи (рис. 1).

Із рис. 1 видно, що струм стікає переважно у вологу погоду, коли поверхні конструкцій і деталей вкриті плівкою води, через рейкові скріплення, шпали та баласт у земляне полотно, звідки натікає на вологу конструкцію, проходить через зону її електрокорозійного ураження 3, витікає в землю і поширюється нею 4. Оскільки металеві огорожі платформ обов'язково заземлені, частина струму 3 протікає через них. Запропоновані схеми рис. 1 не

деталізують протікання струму залізобетонними шпалами, не дають змогу з'ясувати механізм протікання струму через різні елементи утворених електричних кіл,

зокрема електрохімічні чи хімічні реакції, пов'язані зі струмом. Аналіз цих реакцій дасть змогу встановити механізми електрокорозії з метою її запобігання.

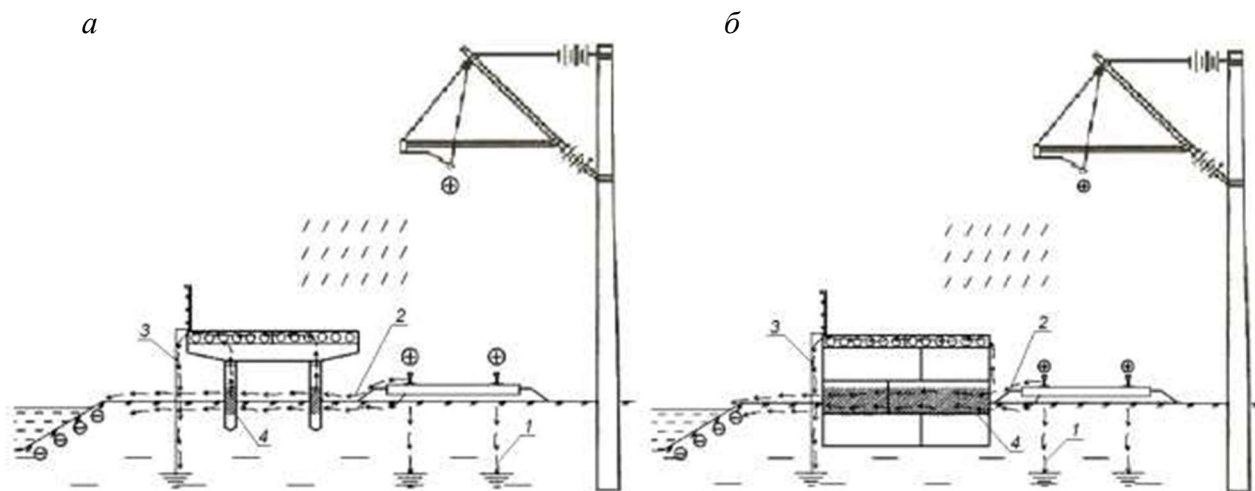


Рис. 1. Схема стікання струму з електрифікованої постійним струмом залізничної колії через залізобетонні шпали та конструкції високих пасажирських платформ на залізобетонних (а) і бетонних (б) опорах:

- 1 – струм витоку за сухої погоди; 2 – струм витоку за дощової погоди;  
3 – струм витоку, відведений заземленням перил; 4 – зона конструкції опор, арматура та/або бетон якої зазнає електрокорозії

Способи ремонту і захисту від електрокорозії пасажирських платформ удосконалювались авторами робіт [8, 9]. Ремонт пошкоджених опор пасажирських платформ здійснюється, як правило, оштукатурюванням, заміною пошкоджених елементів новими збірними або монолітними елементами, у тому числі бетонуванням у незнімній опалубці (рис. 2). Конструкція, наведена на рис. 2, а, є сталобетонною обіймою, що підвищує несучу здатність конструкцій і забезпечує їхню повну водонепроникність. Металева оболонка повністю захищає бетон від корозії нейтралізації та вилуговування, а цементний камінь бетону пасивує, отже захищає внутрішню поверхню оболонки від електрохімічної корозії. Але в умовах впливу блукаючого струму металеве покриття зазнаватиме електрокорозії в його анодних зонах. Для захисту від

електрокорозії в роботі [8] запропоновано діодне заземлення (рис. 2, б, в), що захищає покриття шляхом перенесення анодних зон з оболонки на заземлення. Така конструкція фактично стає заземленим екраном, шунтом, який поглинає струм і відводить його в землю. Але сталобетонна конструкція металомістка та дорога, тому її доцільно застосовувати у випадку потреби відновлення несучої здатності суттєво пошкоджених опор.

У роботі [9] для зниження ресурсоємності ремонту і захисту подібних конструкцій запропоновано замість сталобетонних обійм використовувати екрани-покриття зі шпаклювальних електропровідних силікатних композицій (на основі силікату натрію, портландцементу) з графітовим порошком як наповнювачем (рис. 3). У результаті експериментальних досліджень встанов-

лено, що вони забезпечують зниження густини струму через конструкцію: покриття на основі силікату натрію, отвердженого кремнійфторидом натрію [10], – на 34–60 %, покриття на основі портландцементу з комплексною хімічною добавкою [11] – 49–66 %. У роботі [12] показано, що захисні властивості

заземленого екрана також залежать від частки площі контакту сталевого заземлювача з екраном-покриттям електропровідної композиції (рис. 3) і зростають зі збільшенням цієї частки площі контакту. Тому встановлення та використання цієї залежності для проектування захисту є актуальним завданням.

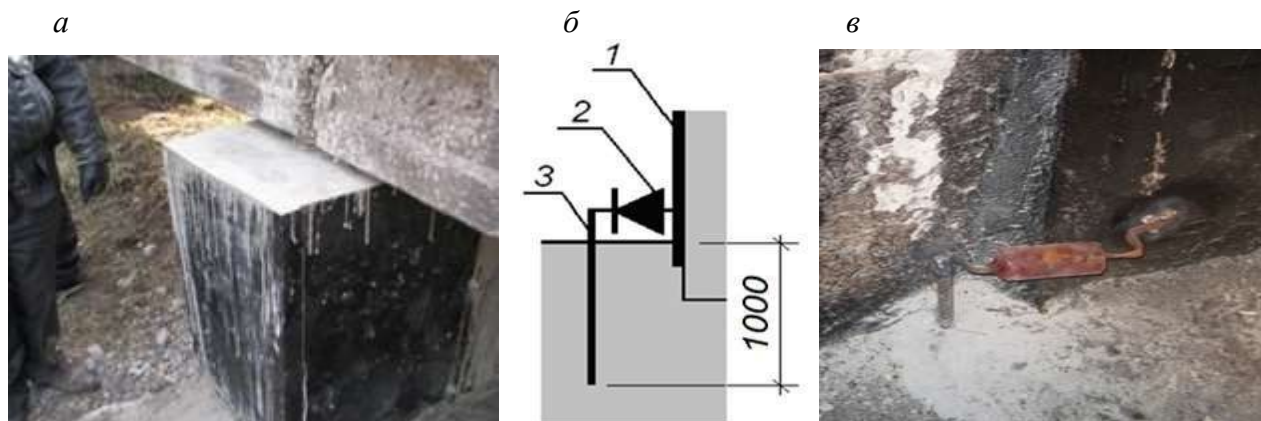


Рис. 2. Конструктивно-технологічне рішення ремонту бетонної опори високої пасажирської платформи шляхом заміни пошкоджені частини бетоном в незнімній опалубці:  
*a* – загальний вигляд сталобетонної обойми; *б, в* – схема (*б*) і зовнішній вигляд (*в*) діодного заземлення для захисту від електрокорозії:  
*1* – сталеві оболонка; *2* – діод; *3* – сталевий заземлювач

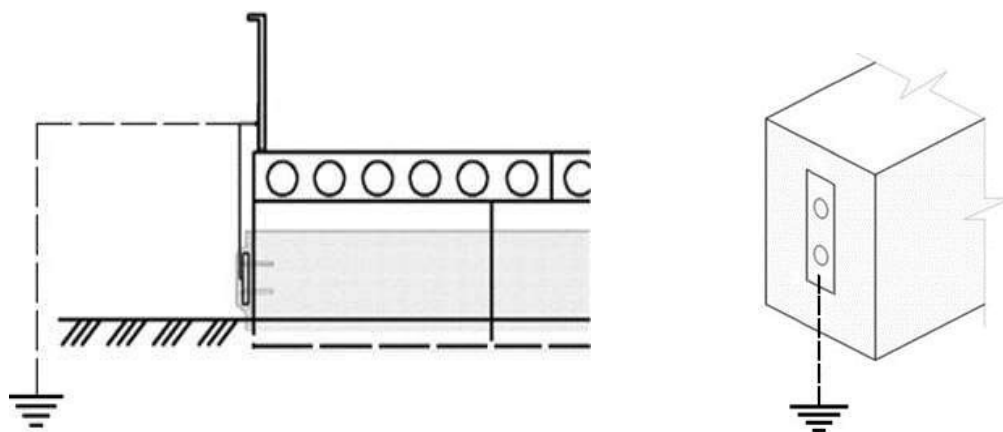


Рис. 3. Схема захисного екрана з електропровідної композиції, заземленого через металеву пластину

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є уточнений механізм протікання корозійних

струмів через конструкції залізничної колії і споруд і нові способи їхнього захисту від електрокорозії.

Отже, для досягнення мети передбачено виконання таких завдань досліджень: натурні обстеження пошкоджених конструкцій і споруд; теоретичне дослідження механізму протікання струму витоку крізь бетон, арматуру, ґрунт, аналіз корозійних реакцій на границях між ними; експериментальне дослідження ефективності заземлених екранів залежно від площі контакту екрана та заземлювача; обґрунтування конструктивно-технологічних рішень та організаційних заходів із захисту конструкцій і споруд від електрокорозії з застосуванням електропровідних композицій.

#### **Основна частина дослідження.**

Натурні обстеження пошкоджених конструкцій і споруд виконувалися дослідниками Українського державного університету залізничного транспорту на Львівській, Південній, Придніпровській залізницях, саме на яких найбільша кількість ліній електрифікована постійним струмом. На рис. 4, а-в, зображено рейки та проміжні рейкові скріплення в залізничних тунелях, де в багатьох випадках електрифіковані постійним струмом колії експлуатуються в умовах підвищеної вологості. Значні електрокорозійні пошкодження спостерігаються на підшвах рейок (рис. 4, а, б), підкладках (аж до повного руйнування кромки до отворів) (рис. 4, в), саме через які стікає струм. У залізобетонних шпалах часто спостерігаються пошкодження у вигляді подовжніх тріщин аж до розколювання шпал (рис. 4, г), однією з причин яких є електрокорозійне пошкодження арматури зі збільшенням її об'єму за рахунок продуктів корозії.

У шпалах виділяються також пошкодження у вигляді сітки мікротріщин на верхніх гранях шпал, через які спостерігається винос продуктів корозії, що в деяких випадках мають склоподібний вигляд, а потім темніють (рис. 4, д, е).

Більшість дослідників такі пошкодження пов'язують з внутрішньою корозією бетону, спричиненою реакцією між лугами цементу та реакційно здатними заповнювачами (Alkali-Silica Reaction ASR) [13–20]. Проте натурні обстеження показали, що такі пошкодження частіше зустрічаються на ділянках, електрифікованих постійним струмом, що може свідчити про прискорення та/або підсилення внутрішньої корозії під впливом електричних потенціалів і струмів.

На рис. 5 наведено конструкції високих пасажирських платформ на ділянці, електрифікованій постійним струмом. Як бачимо, електрокорозійні пошкодження зазнають як залізобетонні стояки (подовжні тріщини на рис. 5, а), так і масивні бетонні (вилуговування бетону на рис. 5, б, руйнування ребер на рис. 5, в).

Такий характер усіх пошкоджень у цілому відповідає схемам рис. 1, отже корозійні процеси відбуваються саме в зазначених конструкціях, і на них доцільно зосередити увагу під час аналізу корозійних процесів.

*Теоретичне дослідження механізму протікання струму витоку крізь бетон, арматуру, ґрунт, аналіз корозійних реакцій на границях між ними.* Основними елементами ізоляції рейок від залізобетонних шпал є ізолюючі прокладки і втулки рейкових скріплень як клемно-болтових типу КБ, так і пружних анкерних типу СБЗ. Вони мають високий електричний опір і в суху погоду запобігають стіканню струму (рис. 6, а). Проте під час атмосферних опадів на поверхні рейок, скріплень, деталей ізоляції, шпал утворюються суцільні плівки води. У ці плівки з бетону дифундують дисоційовані аніони  $OH^-$  і катіони  $Ca^{2+}$ , надаючи їй властивості провідника другого роду і забезпечуючи на ділянках з позитивним потенціалом на рейках стікання з них струму (рис. 6, б).



Рис. 4. Електрокорозійні пошкодження елементів верхньої будови колії в тунелях без зворотного склепіння (з природною основною площадкою): Бескидському (старому) Львівській залізниці (а), Сухарному Придніпровської залізниці (б, в) і на ділянці Основа – Букине Південної залізниці (г-е):  
а – шийки та підшви рейки, костильного скріплення Д0; б – шийки та підшви рейки, клемно-шурупного скріплення Д2; в – підкладок скріплення Д2; г – арматури залізобетонних шпал типу СБ3; г-е – бетону шпал типу СБ3

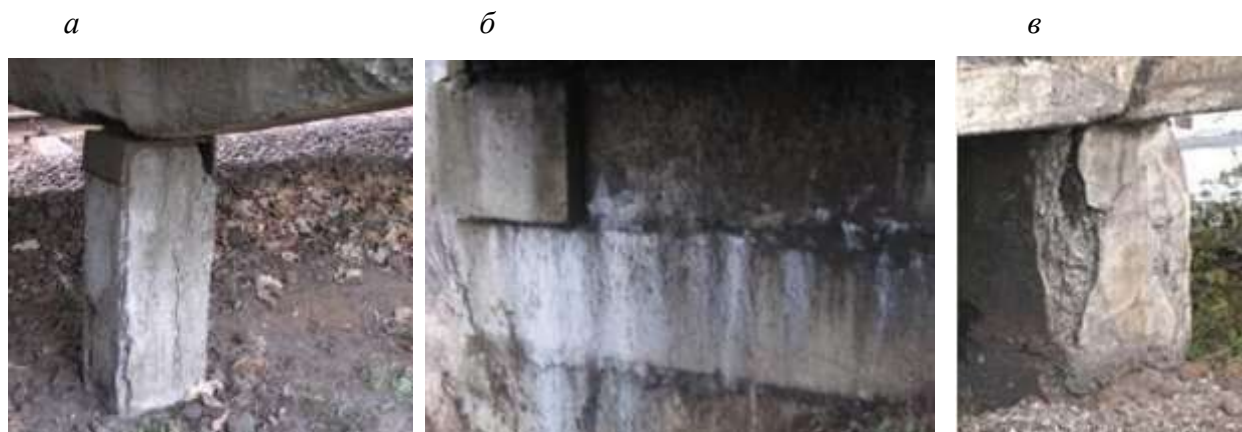


Рис. 5. Електрокорозійні пошкодження опор високих пасажирських платформ на ділянці Харків-Пас. – Мерефа Південної залізниці: *а* – подовжні тріщини в залізобетонних стояках; *б, в* – патьоки вилугування (*б*) і руйнування ребер (*в*) бетонних опор

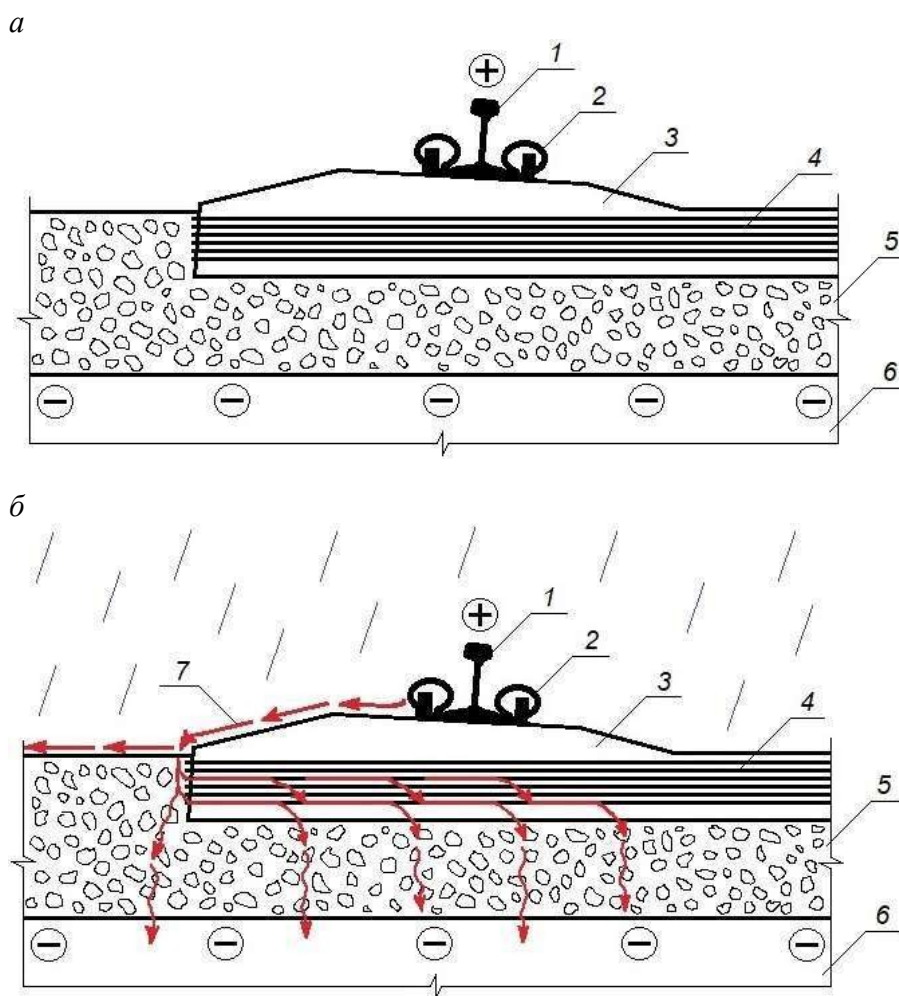
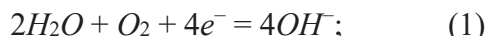


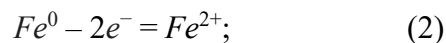
Рис. 6. Схема протікання струму витоку через шпалу та баласт:  
*а* – у суху погоду (струмом можна знехтувати); *б* – під час атмосферних опадів:  
 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт;  
 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм витоку

Технологія виробництва залізобетонних шпал, армованих попередньо напруженим високоміцним дротом, обумовлює виступ кінців дротин за торцеві поверхні шпал. ДСТУ Б В.2.6-209 [13] припускає такі випуски, обмежуючи їхню величину 20 мм. На нашу думку, ці випуски відіграють значну роль у стіканні струму. Через ці випуски струм потрапляє в арматуру і далі через бетон нижньої розтягнутої зони шпали під підрейковими площадками, у яких звичайно наявні заповнені електролітом мікротріщини, у баласт і землю основної площадки (рис. 6, б). Оскільки сталь арматури є провідником 1 роду, у місцях переходу струму між нею та електролітом поверхневої плівки, поровим електролітом бетону утворюються катодні та анодні ділянки, на яких відбуваються реакції:

- катодна (відновлення молекул води з утворенням гідроксил-іонів):



- анодна (окиснення і розчинення заліза):



- утворення продуктів корозії (іржі):

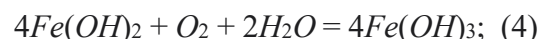
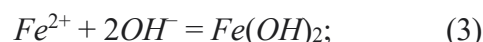


Схема протікання струму через бетон і арматуру шпали з урахуванням наведених реакцій подана на рис. 7, а. Ця схема узгоджується з характером корозійного руйнування шпал (рис. 4, г) – їхнім розколюванням по подовжнім тріщинам, утвореним за рахунок тиску на бетон продуктів корозії арматури.

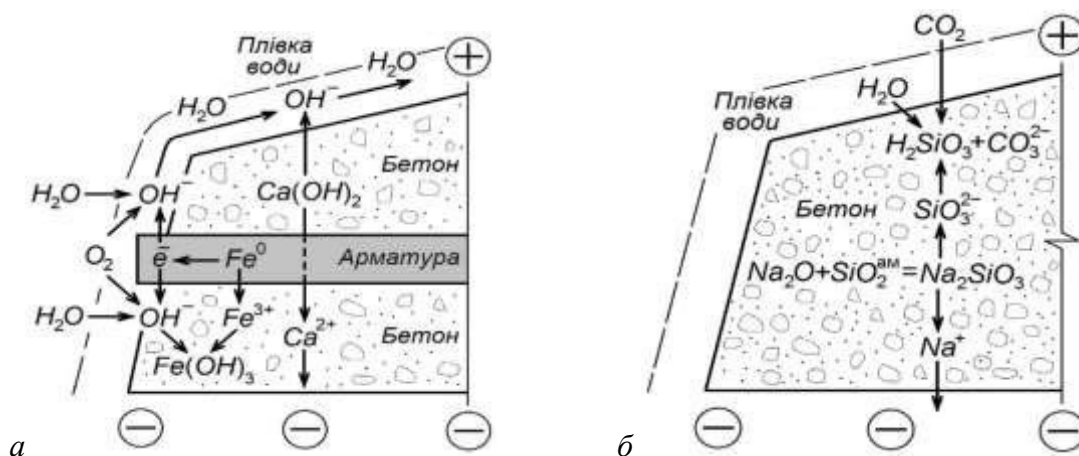


Рис. 7. Схема протікання струму через бетон і арматуру шпали та корозійних процесів:  
 а – протікання струму через бетон і арматуру та електророзкорозія арматури;  
 б – інтенсифікація корозії бетону від ASR

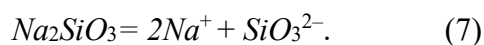
Проте схема, наведена на рис. 7, а, не дає змогу пояснити причини утворення пошкоджень, наведених на рис. 4, д, е. Вважаємо, що наявність електричних потенціалів і струмів прискорюється внутрішньою корозією бетону, спричиненою

реакцією між лугами цементу і реакційно здатними заповнювачами або знижує порогові умови її протікання. Ця корозія обумовлена лужно-силікатною реакцією ASR:





Утворений метасилікат натрію дисоціює на катіони натрію та силікатні аніони:



В електричному полі утворювані іони переносяться, забезпечуючи струм витоку.



Схема, що враховує наведені реакції та перенесення іонів, наведена на рис. 7, б. Метакремнієва кислота є основним продуктом корозії ASR (6), що відкладається у вигляді високодисперсного гелю, здатного до набухання за рахунок осмотичного тиску, який є однією з причин утворення сітки мікротріщин. Саме заповнені гелем кремнієвих кислот мікротріщини і спостерігаються на рис. 4, д, е.

Виконано аналіз протікання струму далі через баласт і ґрунт і конструкції пасажирських платформ, зокрема деталізовано схеми рис. 1. Виходячи з мінерального складу гранітів, ґрунтів, можна припустити, що в обводнених баласті та ґрунті як провіднику другого роду носіями струму є катіони  $Na^+$  ( $K^+$ ) та аніони  $OH^-$ . У поровому електроліті бетону носіями струму є продукти дисоціації гідроксиду кальцію – катіони  $Ca^{2+}$  та аніони  $OH^-$ , а у сталевій арматурі – електрони  $e^-$ . З урахуванням цього деталізовано схеми протікання струму через конструкції високих пасажирських платформ (рис. 8).

За умов проникності ґрунту і бетону для води і газів у кількості, достатній для хімічних реакцій, наявності у ґрунті та бетоні вільної води  $H_2O$ , а в повітрі кисню  $O_2$  та діоксиду вуглецю  $CO_2$  у залізобетонній конструкції утворюються

Перенесення іонів обумовлює локальне зниження концентрації іонів  $Na^+$  і  $SiO_3^{2-}$  і відповідно реакції ASR.

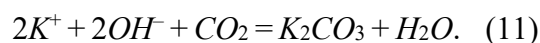
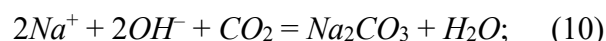
Метасилікат натрію та силікат-іон здатні взаємодіяти також з кислотами, зокрема вуглекислою (розчиненим у воді діоксидом вуглецю) з утворенням метакремнієвої кислоти:

чотири зони, де протікають різні обмінні та електрохімічні реакції (рис. 8, а). Залежно від них ці зони в роботі [10] названо так: 1) зона нейтралізації бетону; 2) катодна зона арматури; 3) анодна зона арматури; 4) зона вилуговування бетону. Оскільки в цій роботі враховано обмежену кількість реакцій, притаманних визначеним зонам, деталізуємо процеси в них.

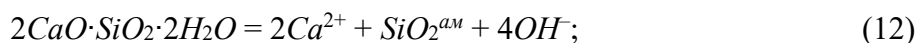
У бетонній конструкції утворюються лише дві зони (рис. 8, б) – нейтралізації та вилуговування бетону.

У них протікатимуть наведені далі реакції:

1. У зоні нейтралізації бетону відбуваються обмінні реакції



Отже, у цій зоні відбувається нейтралізація  $OH^-$ , зниження  $pH$  порового електроліту бетону і подальше розкладання гідросилікатів кальцію  $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$  і портландиту  $Ca(OH)_2$  цементного каменю з утворенням в умовах дефіциту води нових порцій іонів  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  та аморфного кремнезему  $SiO_2^{am}$ , а при її достатній кількості – кремнієвих кислот  $H_2SiO_3$ ,  $H_4SiO_4$  ( $Si(OH)_4$ ):



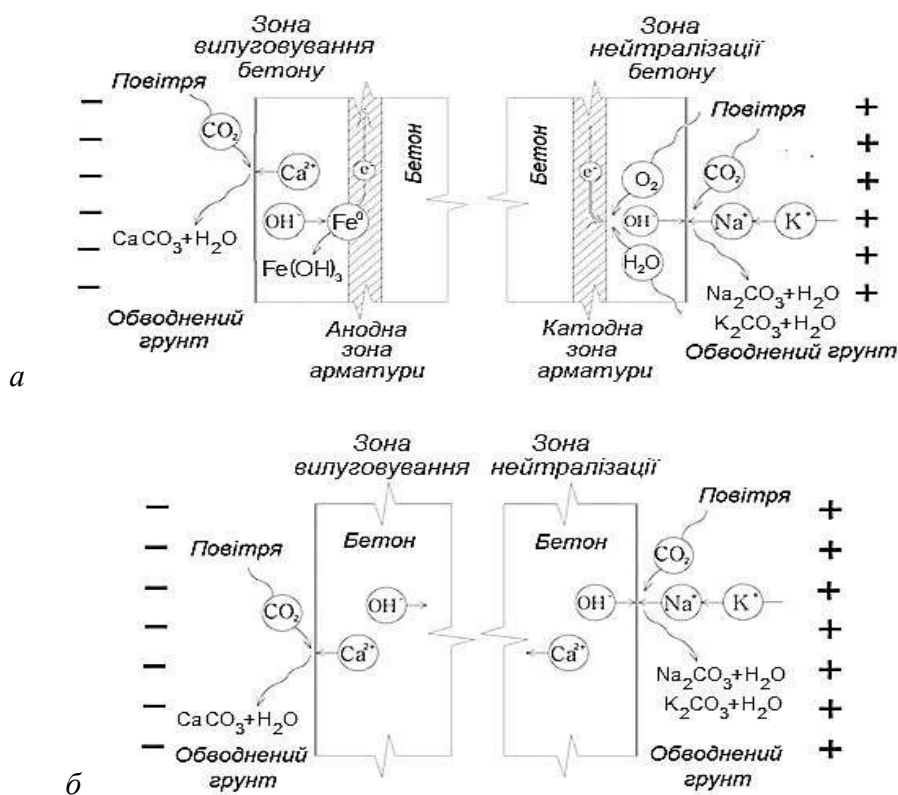
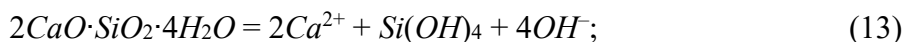


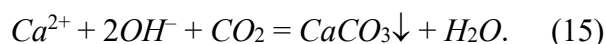
Рис. 8. Схема протікання струму через конструкції високих пасажирських платформ:  
 а – залізобетонні стояки (рис. 1, а); б – бетонні опори (рис. 1, б)

Утворені нові порції іонів  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  продовжують переносити електричний струм. Утворені замість  $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$  і  $Ca(OH)_2$  кремнієві кислоти і/або аморфний кремнезем не мають в'язучих властивостей, що обумовлює деструкцію бетону, зниження його міцності та морозостійкості, утворення та подальший розвиток пошкоджень, наведених на рис. 4.

2. У катодній зоні арматури, у яку перетікають електрони від анодних зон, відбувається електрохімічна реакція (1). Утворені нові порції аніонів  $OH^-$  продовжують переносити електричний струм поровим електролітом бетону. Корозія арматури в катодній зоні не відбувається, навпаки, у ній забезпечується її захист катодною поляризацією.

3. В анодній зоні арматури, з якої електрони перетікають до катодних зон, послідовно відбуваються електрохімічна та обмінні реакції (2)–(5). Саме в анодній зоні відбувається інтенсивна електрокорозія сталеві арматури, продуктом якої є іржа (переважно  $FeO(OH)$ ). Об'єм іржі набагато більший, ніж вихідного металевого заліза, тому в приарматурній зоні бетону виникають значні внутрішні напруження, що обумовлюють утворення тріщин і відшарування захисного шару (рис. 5, а).

4. У зоні вилугування бетону відбувається винесення на його поверхню катіонів  $Ca^{2+}$  та обмінна реакція карбонізації



У цій зоні на поверхні бетону спостерігаються інтенсивні висоли, що свідчать про інтенсивне вилуговування (рис. 5, б). Вилуговування, як і в зоні нейтралізації бетону, обумовлює зниження  $pH$  з втратою захисних властивостей відносно арматури. Утворені нові порції іонів  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  продовжують переносити електричний струм. Утворені замість  $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$  і  $Ca(OH)_2$  кремнієві кислоти і/або аморфний кремнезем не мають в'язучих властивостей, що обумовлює деструкцію бетону, зниження його міцності та морозостійкості, утворення та подальший розвиток пошкоджень, наведених на рис. 5, в.

Отже, внаслідок теоретичних досліджень, узгоджених з результатами натурних обстежень, встановлено, що в електричних колах струмів витоку від ПОЕП, що виникає під час проходження електричного рухомого складу електрифікованими постійним струмом залізничними коліями, носієм струму є: у рейках, сталевих деталях рейкових скріплень, сталевій арматурі – електрони  $e^-$ ; поровому електроліту бетону та плівках вологи на поверхнях конструкцій – переважно катіони  $Ca^{2+}$  та аніони  $OH^-$ ; баласті та ґрунті – катіони  $Na^+$  та  $K^+$ .

У залізобетонних шпалах у вологу погоду струм натікає поверхнею деталей ізоляції рейкових скріплень через випуски арматури на торцях шпал на арматуру, на поверхні якої в зоні натікання струму утворюються катодні зони, а в глибині бетону – анодні зони. У катодних зонах утворюються гідроксил-іони, що поповнюють поровий електроліт бетону та електроліт поверхневих плівок вологи. В анодних зонах відбувається розчинення заліза, утворення катіонів  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  і гідроксидів заліза – іржі, яка, збільшуючись в об'ємі, спричиняє внутрішній тиск на бетон і утворення у шпалах подовжніх тріщин аж до розколювання шпал. ПОЕП також інтенсифікує внутрішню корозію бетону від лужно-силікатної реакції ASR

або знижує пороги умов її протікання. Утворений внаслідок ASR метасилікат натрію дисоціює на катіони  $Na^+$  та силікат-іони  $SiO_3^{2-}$ , що під впливом ПОЕП забезпечують струм витоку. Перенесення іонів обумовлює локальне зниження їхньої концентрації та відповідно інтенсифікацію реакції ASR. Під верхньою гранню шпал силікат-іони взаємодіють з розчиненим у плівках вологи діоксидом вуглецю повітря з утворенням кремнієвих кислот, що відкладаються у вигляді високодисперсного гелю, здатного до набухання за рахунок осмотичного тиску, що є однією з причин утворення сітки мікротріщин. Отже, у шпалах утворюються умовні зони, у яких протікають відповідні реакції: 1) під верхньою гранню шпали – зона лужносилікатної реакції ASR (у випадку підвищеного вмісту лугу у цементі та реакційно-здатних заповнювачів); 2) на арматурі біля торців шпал – катодна зона, у якій відбувається електрохімічне утворення гідроксил-іонів  $OH^-$ ; 3) на арматурі всередині шпали – анодна зона, у якій відбувається анодне розчинення заліза і утворення його гідроксидів; 4) нижній грані шпали – зона вилуговування, з якої в баласт і ґрунт стікають катіони  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ .

У залізобетонних і бетонних конструкціях високих пасажирських платформ внаслідок впливу ПОЕП і протікання струму витоку утворюються зони, у яких протікають відповідні реакції: 1) зона нейтралізації бетону – карбонізація з утворенням карбонатів; 2) катодна зона арматури – електрохімічне утворення гідроксил-іонів  $OH^-$ ; 3) анодна зона арматури – анодне розчинення заліза і утворення його гідроксидів; 4) зона вилуговування бетону – винесення з бетону катіонів  $Ca^{2+}$  і їхня карбонізація на поверхні.

Експериментальне дослідження ефективності заземлених екранів залежно від площі контакту екрана та заземлювача здійснено на композиціях із електропровідних композицій з графітовим наповнювачем на основі портландцементу і силікату

натрію, отвердженого кремнефторидом натрію. Склади композицій прийняті за роботами [10, 11]. Дослідження проводили на моделях, які піддавали електричному впливу, і вимірювали характеристики цього впливу за допомогою методів і схем, запропонованих у роботі [9]. Моделі та електричну схему дослідження (рис. 9) розроблено на підставі схеми протікання блукаючого струму через опори високої пасажирської платформи на ділянці колії з позитивним ПООП на рейці (рис. 6). Модель є призмою 1 з бетону міцністю 20 МПа зі встановленим у ній сталевим стрижнем 2. Бетон між стрижнем і зовнішньою гранню призми відповідає бетону конструкції між її сторонами (рис. 1, 5). Модель-призму встановлювали в модель ґрунту – водонасичений дуже дрібний пісок 4, засипаний у металеву ємність 3. Струм, що

протікає через бетон і арматуру від рейок, імітували струмом, створюваним різницею потенціалів 40 В між ємністю 3 і арматурним стрижнем 2. Силу струму вимірювали за допомогою увімкнутих у кола мікроамперметрів (цифрових мультиметрів Sanwa PC510) 8 і 9. Частку площі контакту сталевого заземлюючого електрода з екранним покриттям  $X$ , яку варіювали в процесі дослідження, визначали як відношення площі контакту сталевого електрода з екранним покриттям  $S_e$  до площі всього екранного покриття  $S_p$ , %

$$X = 100S_e/S_p. \quad (16)$$

Вимірювання проводили одночасно на моделях без захисту і з захистом впродовж 240 годин з інтервалом 24 години.

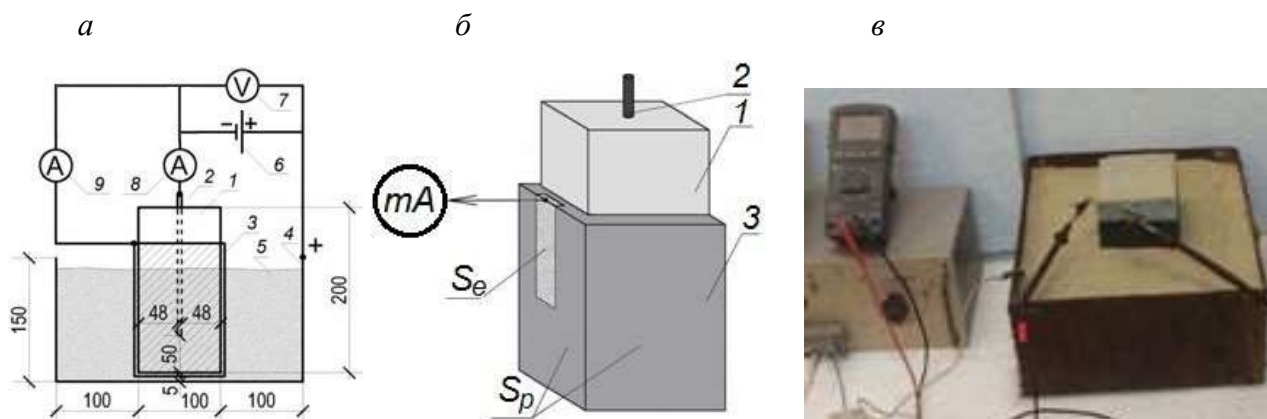


Рис. 9. Експериментальне дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій для захисту конструкцій від електрокорозії:

*a* – загальна схема; *б* – модель з покриттям; *в* – загальний вигляд;

1 – бетон; 2 – арматурний стрижень; 3 – захисний екран (покриття); 4 – сталева ємність; 5 – водонасичений пісок; 6 – джерело струму; 7 – вольтметр; 8 – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає через бетон,  $I_b$ ; 9 – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає через захисний екран і землю,  $I_e$  (у моделі без захисного екрана відсутній)

Показник ефективності захисту  $E_z$  оцінювали за формулою

$$E_z = (I_{60} - I_6) / I_{60} = 1 - I_6 / I_{60}, \quad (17)$$

де  $I_{60}$  – сила струму через бетон моделі опори без захисного екрана, мА;

$I_6$  – сила струму через бетон моделі опори із захисним екраном, мА. Значення  $I_{60}$  та  $I_6$

брали максимальні за період спостереження 240 годин.

Найвищому ступеню захисту відповідає  $E_3 = 1$ , відсутності захисту –  $E_3 = 0$ .

За результатами дослідження побудовано графіки залежності ефективності захисту  $E_3$  від частини площі контакту заземлювача з екранним покриттям  $X$  (рис. 10). Із рис. 10 видно, що

ефективність захисту зі збільшенням  $X$  до 5 % зростає швидко, після 5 % – повільно. Ліву частину отриманих графіків до значення  $X = 5\%$  апроксимували поліномами другого ступеня і шляхом їхнього диференціювання знайшли оптимальні значення  $X$ , після подальшого збільшення яких зростанням  $E_3$  можна знехтувати.

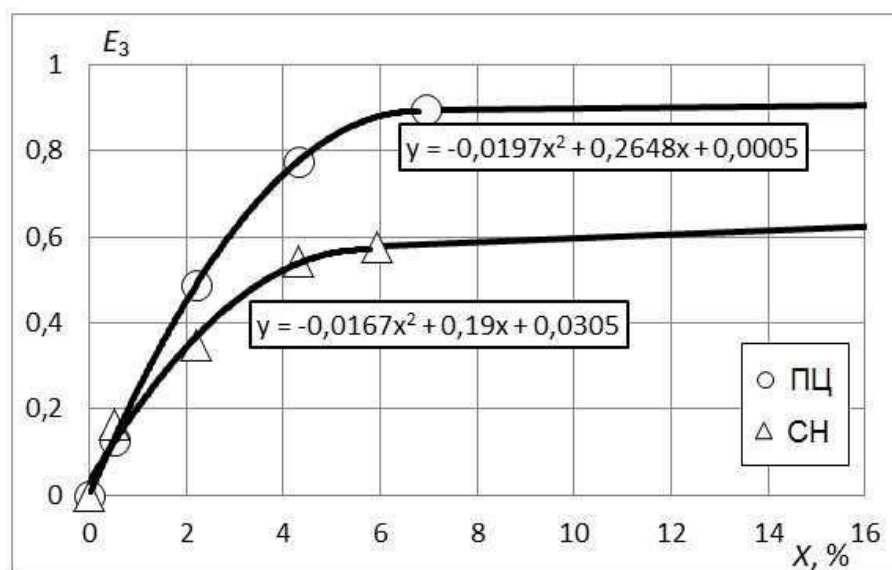


Рис. 10. Залежність показників ефективності захисту  $E_p$  із заземленими екранами з електропровідних композицій на основі портландцементу ПЦ і силікату натрію СН від площі контакту сталевого заземлювача з екраном  $X$

Для захисного покриття складом на основі портландцементу

$$Y = -0,0197X^2 + 0,2648X; \quad (18)$$

$$Y' = 2 \cdot 0,0197X - 0,2648; \quad 0,0394X - 0,2648 = 0;$$

$$X = 6,72; \quad Y = E_3 = 0,89.$$

Для захисного покриття на основі силікату натрію

$$Y = -0,0167X^2 + 0,19X + 0,0305; \quad (19)$$

$$Y' = 2 \cdot 0,0167X - 0,19; \quad 0,0334X - 0,19 = 0;$$

$$X = 5,69; \quad Y = E_3 = 0,57.$$

Отже, для ґрунтованого екрана з композицією на основі портландцементу оптимальний захисний ефект  $E_3 = 0,89$  досягається при частці площі контакту сталевого ґрунту від площі екрану  $X = 6,7\%$ . Для заземленого екранного покриття композицією на основі силікату натрію оптимальний захисний ефект  $E_3 = 0,57$  досягається при частці площі контакту сталевого заземлювача від площі екрану  $X = 5,7\%$ .

*Обґрунтування конструктивно-технологічних рішень та організаційних заходів із захисту конструкцій і споруд від електрокорозії з застосуванням електропровідних композицій.* Виходячи з визначеного механізму протікання струму

витоку через бетон і арматуру шпал, узгодженого з результатами обстеження шпал, як захід первинного захисту шпал запропоновано усунути виступ арматури з торців шпал і забезпечити захисний шар бетону не менше 10 мм. У цьому випадку у вологу погоду струм буде стікати переважно в баласт і земляне полотно, майже не проходячи через шпали (рис. 11, а), що мінімізує описані вище корозійні процеси та спричинені ними під час експлуатації пошкодження, наведені на рис. 4, г-е.

Оскільки особливості технології виробництва шпал не дають змогу забезпечувати такий захисний шар безпосередньо під час їхнього формування, на торцях шпал, передбачених для укладання на електрифікованих постійним струмом ділянках, після їхнього розпалублення рекомендується зрізати виступи

арматури і наносити на торці двошаровий захисний шар із композиції на основі портландцементу. Перший шар – із композиції проникної дії, що забезпечить ущільнення бетону, кольматацію в ньому мікротріщин від попереднього натягу арматури та власне створення захисного шару. Другий шар – із електропровідної композиції, що у вологу погоду забезпечить відведення струму витоку від шпали (рис. 11, б).

У випадках, коли на ділянках, електрифікованих постійним струмом, під час капітального ремонту передбачене укладання старопритатних шпал, ці шпали рекомендується на базах КМС попередньо готувати до збирання рейкошпальної решітки. Ця підготовка має полягати у зрізанні з торців шпал випусків арматури і нанесенні на них двошарового захисного шару, як запропоновано вище для нових шпал.

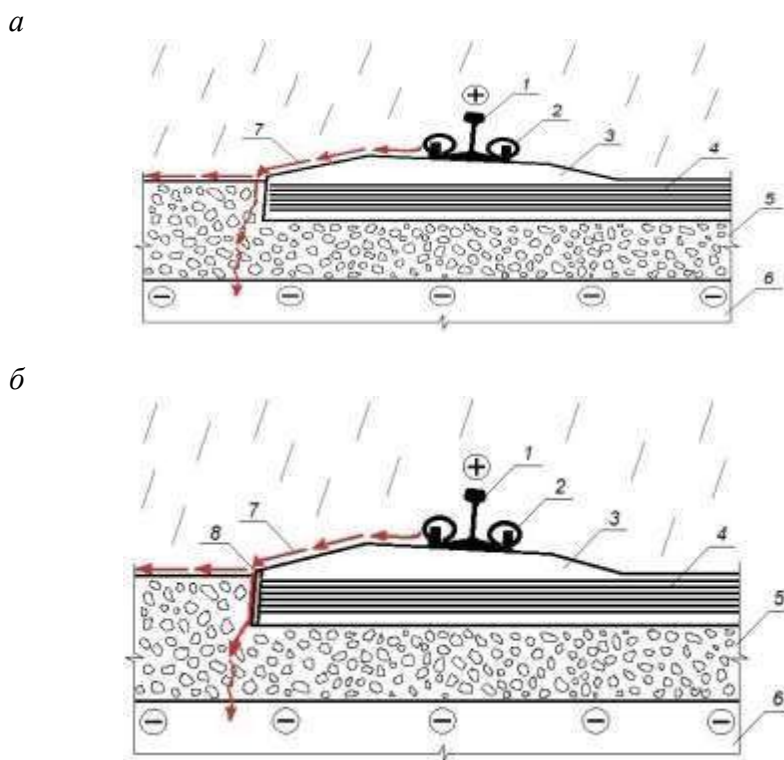


Рис. 11. Схема протікання струму витоку через шпалу та баласт під час атмосферних опадів: а – за наявності на торцях захисного шару бетону; б – за наявності на торцях двошарового захисного покриття з електропровідним зовнішнім шаром; 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт; 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм витоку; 8 – двошарове захисне покриття

Проте ці заходи захисту мінімізують струми лише через шпали і не впливають на струми через конструкції високих пасажирських платформ. Розроблено конструктивно-технологічне рішення захисту бетонних опор пасажирських платформ заґрунтованих екранним покриттям з електропровідних композицій, у якому забезпечується оптимальна частка

площі контакту сталевого заземлювача з екранним покриттям  $X = 6,9\%$  (рис. 12).

Розроблено комплекс заходів із ремонту і захисту від електрокорозії бетонних і залізобетонних опор пасажирських платформ на ділянках залізниць, електрифікованих постійним струмом (у місцях позитивного потенціалу на рейках). Заходи обираються залежно від стану опори (таблиця).

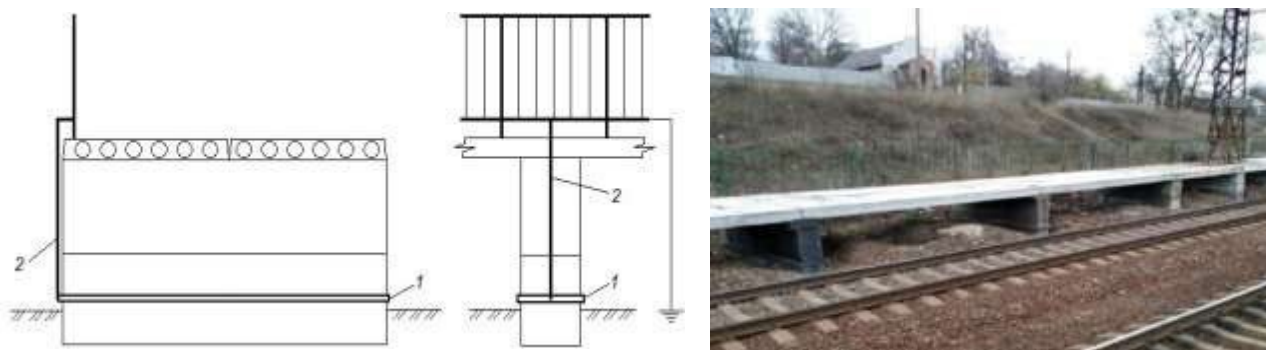


Рис. 12. Конструктивно-технологічне рішення захисту опори пасажирської платформи з заземленим екраном з електропровідної композиції:

1 – електрод – сталеві смуга шириною 40–50 мм, товщиною 3–5 мм, що кріпиться анкерами;  
2 – сталевий провідник  $\varnothing 10$  мм

Таблиця

Заходи з ремонту і захисту бетонних і залізобетонних опор пасажирських платформ залежно від їхнього стану в місцях позитивного потенціалу на рейках

Характер впливу та пошкоджень	Заходи ремонту і захисту
Струм витоку критичний, проте пошкоджень досі нема	Захисний екран товщиною 3–5 мм із електропровідної силікатної композиції з графітовим наповнювачем
Пошкодження не знижують несучу здатність, проте знижують довговічність	Ремонт поверхні та захист захисним екраном товщиною 7–10 мм з електропровідної композиції на основі портландцементу і комплексної хімічної добавки з графітовим наповнювачем
Пошкодження знижують несучу здатність	Сталобетонна або металоін'єкційна обойма з діодним заземленням
Пошкодження критичні та призводять до надзвичайної ситуації	Заміна опори на нову конструкцію з заземленим екранним покриттям товщиною 3–5 мм із електропровідних силікатних композицій з графітовим наповнювачем

### Висновки

1. У результаті теоретичних досліджень і натурних обстежень уточнені

електричні кола струмів витоку від постійного однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП, що виникає під час

проходження електричного рухомого складу електрифікованими постійним струмом залізничними коліями. У цих колах носіями струму є: у рейках, сталевих деталях скріплень, арматурі – електрони  $e$ ; поровому електроліті бетону та плівках вологи на поверхнях конструкцій та ізолюючих деталей – іони  $Ca^{2+}$  і  $OH^-$ ; баласті та ґрунті – іони  $Na^+$  і  $K^+$ .

2. Уточнено механізм протікання струмів через конструкції колії і споруд. У залізобетонних шпалах через вплив ПООП утворюються зони, у яких протікають відповідні реакції: під верхньою гранню шпали – зона лужносилікатної реакції ASR (у випадку підвищеного вмісту лугу у цементі та реакційно-здатних заповнювачах); на арматурі біля торців шпал – катодна зона, у якій відбувається електрохімічне утворення іонів  $OH^-$ ; арматурі всередині шпали – анодна зона, у якій відбувається анодне розчинення заліза і утворення його гідроксидів – іржі; нижній грані шпали – зона вилуговування, з якої у баласт і ґрунт стікають іони  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ . У залізобетонних конструкціях високих пасажирських платформ утворюються зони, у яких протікають такі реакції: нейтралізації бетону – карбонізація з утворенням карбонатів; катодна та анодна арматури; вилуговування бетону – винесення іонів  $Ca^{2+}$  і їхня карбонізація на поверхні. Корозійним процесам у цих зонах можна запобігти шляхом усунення електричного струму через конструкцію, у т. ч. шляхом

його відведення заземленими екранами-покриттями з електропровідних композицій.

3. Запропоновано показник ефективності заземлених екранів-покриттів з електропровідних композицій на основі мінеральних в'язучих, що є ступенем зниження сили струму через конструкцію. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що він залежить від частки площі контакту сталевого заземлювача з екраном від площі самого екрана. Для екранів із композицій на основі портландцементу і силікату натрію оптимальний показник ефективності 0,89 і 0,57 досягається при частці 6,7 і 5,7 % відповідно.

4. Обґрунтовано нові способи захисту конструкцій колії і споруд від електрокорозії, розроблено відповідні конструктивнотехнологічні рішення. Для залізобетонних шпал запропоновано усунути виступ арматури з торців і влаштувати на них двошаровий захисний шар із композицій на основі портландцементу: перший шар – із композиції проникної дії, що ущільнить бетон, другий – із електропровідної композиції, що забезпечить відведення струму витоку від шпали. Для залізобетонних і бетонних опор високих пасажирських платформ запропоновано захист зазначеними екранами-покриттями, а також порядок вибору заходів із їхнього ремонту і захисту залежно від ступеня пошкодження.

### Список використаних джерел

1. Thorsten Eichler, Bernd Isecke. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.
2. Liu Y.-C., Chang E.-C., Shyu J.-L. and Chen X.-G. Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems. *International Journal of Electrical Energy*. 3(4). 257-261 (2015).
3. Duranceau S. J., Johnson W. J., Pfeiffer-Wilder R. J. A study examining the effect of stray current on the integrity of continuous and discontinuous reinforcing bars. *Experimental Techniques*. 35 (2011). 53-58.



4. Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Pietro Pedferri. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 49 (2007). 1056–1068.
5. Старосельський А. А. Електрокорозія залізобетону. Київ: Будівельник, 1978. 168 с.
6. Kangkang Tang. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cem. Concr. Res.* 100. 445-456 (2017).
7. Пługін О. А. Дослідження впливу величини напруги пульсуючого однонаправленого електричного поля на електрокорозію бетону. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2010. Вип. 115. С. 56-67.
8. Пługін О. А., Борзяк О. С., Дудін А. А. Захист металевих і залізобетонних споруд залізничного транспорту від електрокорозії за допомогою діодного заземлення. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2011. Вип. 127. С. 204-212.
9. Plugin Dmytro, Kasyanov Vladimir, Konev Vitalii, Nesterenko Sergii and Afanasiev Aleksander. Research into the effectiveness of grounded screens of electroconductive silicate compositions for electrocorrosion protection. *Matec Web of Conf.* 116. 01012 (2017). DOI: 10.1051/mateconf/201711601012.
10. Конєв В. В. Електропровідна силікатна композиція для захисту від електрокорозії залізничних конструкцій: дис канд. техн. наук: 05.23.05. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 338 с.
11. Касьянов В. В. Електропровідне покриття для захисту від електрокорозії та ремонту залізничних конструкцій: дис канд. техн. наук: 05.23.05. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 281 с.
12. Plugin A., Borziak O., Kaliuzhna O., Krykun O., Zhuravel V. Protection Against Electrical Corrosion of Railway Constructions by Grounded Screens from Silicate Compositions (Online). *Internat. Scient. Confer. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies BulTrans-2022*. URL: <http://bultrans.org/BulTrans-2022-program.pdf>.
13. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von beton. *Architektur und Bauwesen Weimar Universität*. (1995). 100 p.
14. Stark J. Alkali-Kieselsäure-Reaktion. *Bauhaus Universität Weimar* (2008) 139 p.
15. Kurdowski W. *Chemia Cementu i Betonu*. Kraków. (2010). 728 s.
16. Петрова Т. М., Сорвачова Ю. А. Внутренняя коррозия бетона как фактор снижения долговечности объектов транспортного строительства. *Наука и транспорт. Транспортное строительство*. 2012. № 4. С. 56–60.
17. Пшінько П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.
18. Коваленко В. В., Заяць Ю. Л., Пшінько П. О. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ-10 Одеської залізниці. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. 2015. № 6. С. 149–163.
19. Mindess S. Resistance of concrete to destructive agencies *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (2019). 251-283.
20. Krivenko P., Gelevera O., Kovalchuk O., Bumanis G., Korjamins A. Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 660(1) (2019). 012002.

---

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.  
Борзяк Ольга Сергіївна, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

---

Плугін Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039.

E-mail: pluhin\_bmg@kart.edu.ua.

Крикун Оксана Петрівна, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: krikun@kart.edu.ua.

Зінченко Владислава Володимирівна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501.

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

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Borziak Olga, PhD (Tech), associate professor, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Pluhin Oleksii, PhD (Tech), associate professor, department of Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039. E-mail: pluhin\_bmg@kart.edu.ua.

Krykun Oksana, postgraduate student, department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: krikun@kart.edu.ua.

Zinchenko Vladyslava, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 20.06.2023 р.