

УДК 620.193.01:625.143.2

**МЕХАНІЗМ І КІНЕТИКА ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ РЕЙКОВОЇ СТАЛІ
ТА РЕСУРС РЕЙОК У ЗАЛІЗНИЧНИХ ТУНЕЛЯХ**

Канд. техн. наук О. А. Плугін, доктори техн. наук А. А. Плугін, Е. С. Геворкян,
асп. М. А. Муригін

**KINETIC OF ELECTROCORROSION AND THE LIFE OF RAILS IN RAILWAY
TUNNELS**

PhD (Tech.) O. A. Pluhin, Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin,
Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, post graduate student M. A. Murygin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336481>



***Анотація.** Проаналізовано нормативні та літературні джерела щодо ресурсу конструкцій і елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях. Показано, що нормативні документи АТ «Укрзалізниця» не передбачали заміну рейок і скріплень у кількості, що фактично виходять із ладу, що ускладнювало матеріально-технічне забезпечення поточного утримання та капітальних ремонтів. Виконано теоретичні дослідження і проаналізовано результати експериментальних і натурних досліджень корозії та електрокорозії конструкцій і елементів верхньої будови колії в тунелях. Встановлено, що найбільш інтенсивно зазнають корозії рейкові скріплення, шийка та, особливо, підошва рейки. Розкрито механізм електрокорозійного руйнування, встановлено чинники, які впливають на інтенсивність електрокорозії. Розроблено механізм електрокорозії підошви рейок, за яким під*

впливом наведеного на рейку під час проходження електрорухомого складу позитивного пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу відбувається її вертикальна поляризація, яка змінює електроповерхневий потенціал зерен перліту сталі на кшталт зміни абсолютного електроповерхневого потенціалу до рівноважного під впливом рН. Обґрунтовано залежності величини електроповерхневого потенціалу перліту, еквівалентної величини рН і швидкості корозії, мм/р., від величини потенціалу на рейці. За результатами експериментальних і натурних досліджень розроблено пропозиції з корегування нормативних термінів експлуатації конструкцій і елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях, зокрема рейок.

Ключові слова: залізниця, тунель, рейка, електрифікація, корозія, електрокорозія, ресурс.

Abstract. An analysis of regulatory and literature sources regarding the service life of structures and elements of the railway track superstructure in tunnels has been carried out. It is shown that the regulatory documents of JSC «Ukrzaliznytsia» did not provide for the replacement of rails and fastenings in the quantity that actually fails in operation, which complicated the logistics and material support of current maintenance and capital repairs. Theoretical studies and analysis of the results of experimental and field investigations on corrosion and electrocorrosion of structures and elements of the track superstructure in tunnels have been conducted. It has been established that rail fastenings, the rail web, and especially the rail base are most intensively affected by corrosion. The mechanism of electrocorrosion damage has been revealed, and the factors influencing the intensity of electrocorrosion have been determined. A mechanism of rail base electrocorrosion has been developed. According to this mechanism, under the influence of a positive pulsating unidirectional electric potential induced on the rail during the passage of electric rolling stock, vertical polarization occurs, which alters the electro-surface potential of the pearlite grains in the steel similarly to how pH affects the absolute electro-surface potential in equilibrium. The dependencies of the electro-surface potential of pearlite, the equivalent pH value, and the corrosion rate in mm/year on the rail potential have been substantiated. A potential of 100 V on the rail is equivalent to the effect of an environment with $\text{pH} = 2.6$, corresponding to a steel corrosion rate of 0.91 mm/year. Based on the results of experimental and field studies, proposals have been developed to adjust the regulatory service life of structures and elements of the track superstructure in railway tunnels, particularly for rails.

Keywords: railway, tunnel, rail, electrification, corrosion, electrocorrosion, service life.

Актуальність теми дослідження.

Однією з проблем експлуатації верхньої будови колії в залізничних тунелях є корозія рейок, рейкових скріплень, залізобетонних шпал, яка в деяких тунелях розвивається так інтенсивно, що потрібно замінити набагато раніше відпрацьований нормований за пропущеним тоннажем або роками ресурс. Проте нормативні документи АТ «Укрзалізниця» не передбачали заміну пошкоджених рейок і скріплень у кількості, що ускладнювало матеріально-технічне забезпечення поточного утримання та капітальних ремонтів. Зазначена проблема

ускладнена ще й тим, що вплив багатьох чинників на інтенсивність зносу є невивченим, заходи із захисту чинними нормативними документами не передбачені або є надто недосконалими. Отже, виявлення впливу різних чинників на інтенсивність корозії та електрокорозії рейок, рейкових скріплень, залізобетонних шпал у тунелях є нерозв'язаною науковою проблемою, а розроблення заходів із запобігання, обґрунтування раціональних термінів служби рейок, рейкових скріплень, залізобетонних шпал – актуальним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ресурс матеріалів і конструкцій верхньої будови колії, зокрема на залізницях України, встановлено за ДСТУ [1]. Ресурс вимірюють напрацюванням – пропущеним тоннажем, млн т брутто, або роками експлуатації. Залежно від категорії та конструкції колії (безстикова, ланкова) і якості рейок рейко-шпальна решітка має такий ресурс до заміни: безстикової колії – 800 млн т брутто, ланкової – 700 млн т брутто, у роках для безстикової колії – 30, ланкової – 25 (для I–IV категорій колії і рейок масою не менше 60 кг/пог. м вищої і I категорій).

Категорії колії – швидкісна (із рухом пасажирських поїздів понад 160 км/год), I–VII відповідають категоріям залізничних ліній [2] і встановлені залежно від вантажонапруженості, млн т км брутто/км/р., і швидкості руху пасажирських і вантажних поїздів.

У ДСТУ [1] після напрацювання зазначеного ресурсу передбачено заміну рейко-шпальної решітки під час капітальних ремонтів. Для колій швидкісної, I–IV категорій призначають капітальний ремонт, під час якого замість знятої укладають рейко-шпальну решітку з новими рейковими плітями, шпалами, скріпленнями. Для колій менших категорій призначено капітальний ремонт із використанням старопридатних рейок (шпали та скріплення нові) або капітальний ремонт із використанням старопридатних матеріалів (рейки, шпали та скріплення старопридатні або у сполученні з новими).

Норми пропущеного тоннажу зменшено на 10–30 % для таких ділянок: із рейками Р50; плітями середньою довжиною менше 500 м; на щебеному баласті зі слабких гірських порід; із підвищеним осьовим навантаженням; якими перевозять вугілля, руду, торф, добрива, солі; рекуперативного гальмування; із шахтними підробітками; побудованих в особливо важких умовах. У разі збіжності декількох знижувальних чинників із цього переліку

сумарне зменшення не має перевищувати 40 %. Як бачимо, зазначеними нормами вплив електрифікації врахований тільки для ділянок рекуперативного гальмування, а особливості експлуатації в обводнених умовах або тунелях не враховані.

Норми [3], нещодавно замінені стандартом [4], передбачали часткову заміну рейок під час поточного утримання, комплексно-оздоровчого та середнього ремонту колії і містили норми витрат рейок та інших матеріалів верхньої будови колії під час цих робіт.

Дефекти і пошкодження, що накопичені і визначають термін служби конструкцій та елементів верхньої будови колії, класифіковано в різних джерелах: залізобетонні шпали [5], рейки [6]. У роботі [5] немає корозійних пошкоджень, хоча їх виділяють багато дослідників [7, 8].

Із 99 видів дефектів як корозійні визначено тільки № 59 і 69 [6]. Дефект (пошкодження) № 59 – корозія шийки рейки (рис. 1, а), причинами якої [6] є атмосферний вплив і дія хімічних речовин, а місцями найбільш вірогідного утворення – тунелі та місцевості з солончаковими ґрунтами. Рейки Р65 з глибиною корозії шийки понад 3 мм і Р50 понад 2 мм визнано дефектними і такими, що підлягають плановій заміні. У разі глибини корозії понад 6 і 5 мм відповідно рейки слід замінити в першу чергу.

Дефект (пошкодження) № 69 – корозія, підгоряння або місцевий знос подошви рейок і втомлювальні тріщини через них (рис. 1, б). Причинами корозії подошви рейок [5] визнано атмосферний вплив, контакт із матеріалами, що акумулюють вологу (дерев'яними, гумовими та гумокордовими прокладками і картками для виправлення колії), витік тягового струму, а місцями найбільш вірогідного утворення – тунелі, місцевості з солончаковими ґрунтами та вологим кліматом. Автор роботи [9] зазначає, що на корозію подошви рейки впливають обводненість, агресивність підземних вод, загазованість довгих тунелів (понад 500 м).

Рейки Р65 із каверною або місцевим зносом підшви глибиною (із краю) не більше 7 мм і Р50 – 6 мм є дефектними і підлягають

плановій заміні. У разі глибших каверн або зносу рейки визнають гостродефектними, їх потрібно негайно замінити.

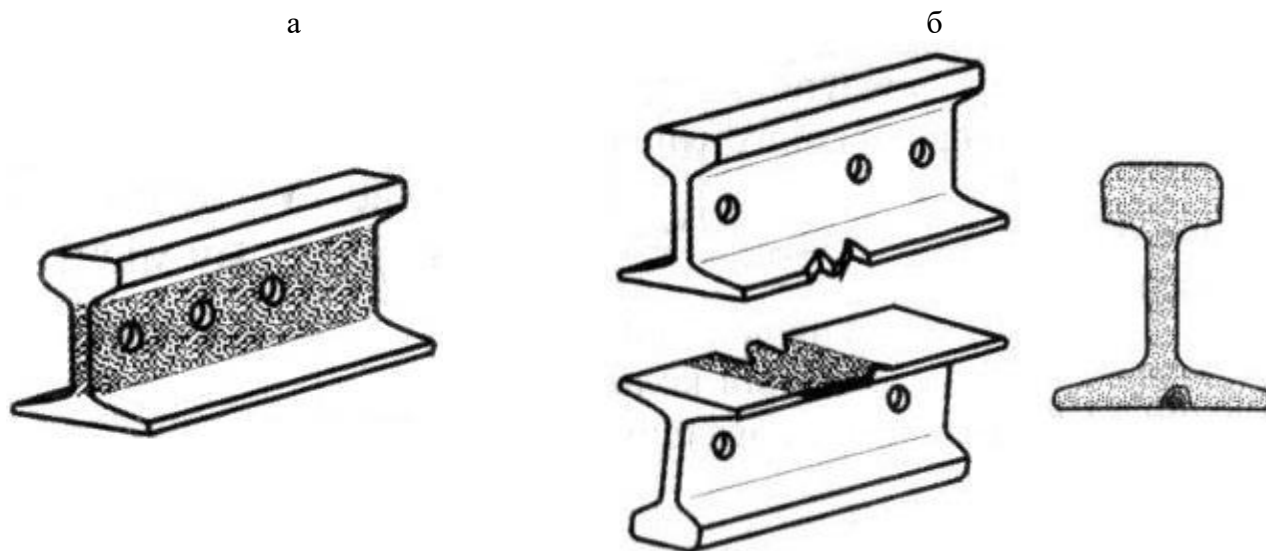


Рис. 1. Корозійні дефекти рейок: а – корозія шийки рейки (дефект № 59); б – корозія, підгоряння або місцевий знос підшви рейок і втомлювальні тріщини через них (дефект № 69)

Отже, корозійні пошкодження рейок – корозія шийки та підшви найчастіше відмічають саме в тунелях. Проте даних про залежність кінетики їхнього розвитку від різних чинників у роботах [5, 9] немає, як і в інших джерелах, що ускладнює прогнозування виходу рейок і нормування їх заміни.

Металеві та залізобетонні конструкції і споруди залізниць, у т. ч. рейки та рейкові скріплення, зазнають електрокорозії струмами витоку з контактної мережі постійного струму, особливо в обводнених умовах [10, 11].

На залізницях України до широкомасштабного вторгнення налічували 44 тунелі, із яких 41 експлуатовані, у т. ч. новий Бескидський тунель, три законсервовані [12]. Довжина тунелів складає від 41 до 2063 м, найбільша кількість тунелів – 20 шт. або 35 % загальної протяжності має довжину від 200 до 500 м.

Вік тунелів – від 2 до 146 років, найбільша кількість тунелів (23 шт. або 49 % загальної протяжності) експлуатована від 100 до 134 років. Отже, проблема виходу і заміни рейок у тунелях є досить масштабною.

Залізничні тунелі найчастіше будують гірським способом. До XX століття оправу тунелів зводили із кам'яного мурування, у XX столітті – із збірних залізобетонних тюбінгів, у XXI столітті – переважно із монолітного залізобетону [13, 14]. На залізницях України найстаріші тунелі мають оправу із кам'яного мурування, більш сучасні – залізобетонну [12], новий двоколіїний Бескидський тунель зведено вже із монолітного залізобетону.

Виникнення та розвиток більшості пошкоджень (дефектів) тунелів і колії в них, як показали дослідження [15, 16], є наслідком їх обводненості. Насичуючи оправу тунелю та фільтруючись крізь неї, вода спричиняє вилугування,

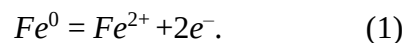
вивітрювання, розморожування цементного розчину, бетону, кам'яного мурування. Тому одним із основних завдань утримання тунелів є усунення або хоча б мінімізація їх обводненості. У сучасній практиці обводненості тунелів намагаються позбутися різними способами [13], які можна об'єднати у дві групи: осушення гірського масиву та гідроізоляція тунелю. Заходи з осушення гірського масиву передбачають перехоплення та організоване відведення атмосферних опадів із надтунельної поверхні, а також підземних вод у безпосередній близькості від оправи і тих, що надходять крізь неї. Заходи гідроізоляції передбачають забезпечення водонепроникності самої оправи тунелю або заоправних порід.

Конструкція верхньої будови колії в тунелях переважно така сама, як і на мостах із їздою по баласту – безстикова або ланкова на залізобетонних чи дерев'яних шпалах. У найдовшому на залізницях України Лутугинському тунелі (зараз на тимчасово окупований території) колію укладали на безбаластне полотно із залізобетонних плит. Під час нового будівництва тунелів зараз у світі перевагу віддають безбаластній конструкції на залізобетонних плитах [14]. У Готардському базовому тунелі [14], уведеному в експлуатацію у 2016 році, конструкція колії безстикова на безбаластній монолітній залізобетонній підрейковій основі, у якій залізобетонні підрейкові блоки ізольовані від залізобетонної монолітної плити полімерними оболонками, що забезпечують зниження шуму та вібрації, а також посилюють електричну ізоляцію рейок. Від такої конструкції можна очікувати мінімальних електрокорозійних ушкоджень матеріалів верхньої будови колії.

Основна частина дослідження. Механізм електрокорозії рейкової сталі. Рейки виготовляють із низьколегованих сталей (У10А, R260) перлітної структури із вмістом вуглецю С – 0,6–0,8 %, марганцю Мп – 0,8–1,3 %, кремнію Si – 0,2–0,6 %. За

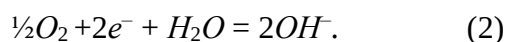
традиційними уявленнями [11], корозія сталі в атмосферних умовах є електрохімічною, природа якої обумовлена електрохімічною гетерогенністю поверхні розподілу метал – електроліт із виникненням на поверхні анодних і катодних ділянок. У літературі наведено різні схеми електрохімічного процесу, але, незважаючи на їхні відмінності, усі вони в принципі схожі (узагальнені на рис. 2) і передбачають обов'язковість анодного та катодного процесів на анодній і катодній ділянках. Проте причину і кількісний механізм виникнення цих ділянок, на нашу думку, глибоко не розкрито або здійснено описово. Унаслідок цього неможливо кількісно описати процес електрохімічної корозії та електрокорозії сталі. Виконаємо критичний аналіз традиційних схем та опису процесу електрохімічної корозії.

Під час електрохімічної корозії сталі у складі анодного процесу на анодній ділянці відбувається реакція окиснення (віддавання електронів) [11] атомів заліза Fe^0 з утворенням катіонів Fe^{2+} відповідно (рис. 2):



Це призводить до зміщення заряду анода в позитивний бік – анодної поляризації. Анодна поляризація призводить до того, що катіони Fe^{2+} , утворені за рахунок окиснення, переходять в електроліт (рис. 2).

Катодний процес полягає в тому, що електрони, звільнені в анодній зоні, переміщуються всередині сталі від анодних ділянок до катодних. Це призводить до зміщення заряду катода в негативний бік – катодної поляризації. Катодна поляризація призводить до реакції відновлення (прийняття електронів) киснем (киснева деполіаризація). Киснева деполіаризація характерна для слабокислих, нейтральних і лужних середовищ:



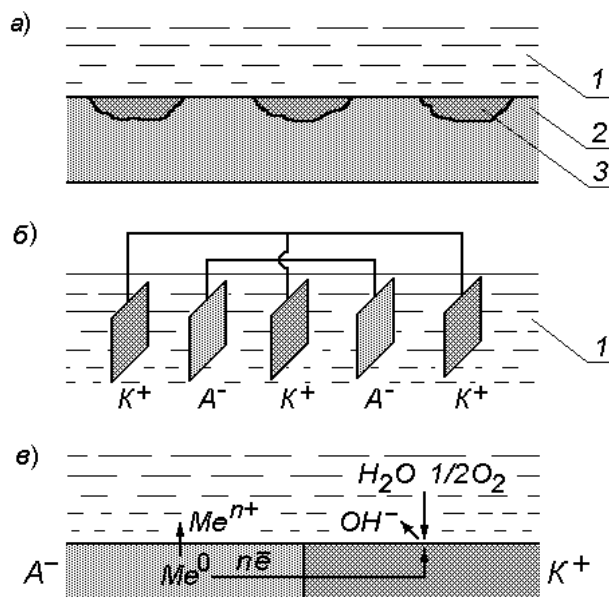
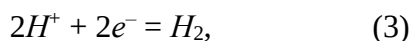
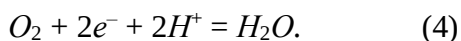


Рис. 2. Схема електрохімічної корозії металу: а – домішки на поверхні металу; б – утворення багатоелектродного гальванічного елемента; в – анодний і катодний процеси; 1 – електролітичне середовище; 2 – метал із більш негативним (менш позитивним) потенціалом (анод); 3 – метал із більш позитивним (менш негативним) потенціалом (катод)

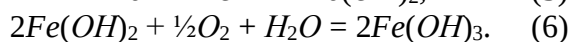
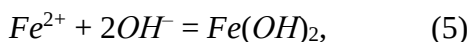
У кислих середовищах може відбуватися реакція відновлення водню (воднева деполяризація):



але тільки в повітряному середовищі, що містить кислі гази CO_2 , SO_2 , NO , NO_2 , H_2S , які, розчиняючись у конденсатній плівці води, знижують значення її pH до 5 і навіть менше. Отже, pH має вплив на інтенсивність електрохімічної корозії сталі. За такої кислотності конденсатної плівки в разі надлишку кисню повітря катодна реакція відбувається з нейтралізацією протонів киснем повітря за рівнянням



Виходячи з цих реакцій, у нейтральних і лужних середовищах відбуваються вторинні реакції:



Таке пояснення не дає змогу оцінити кінетику процесу. Схема електрохімічної корозії, подана на рис. 2, по суті є окремим випадком корозії на межі трьох фаз, що не повністю відображує дійсну схему і механізм утворення анодної та катодної ділянок на поверхні сталі, а отже, і механізм електрохімічної корозії. Схема корозійного елемента і електрохімічної корозії (рис. 2) є надто умовною, яка не відображує, на нашу думку, дійсну структуру металів у поверхневих шарах.

Дійсний механізм виникнення анодної та катодної ділянок і механізмів електрохімічної корозії та електрокорозії сталі (як і більшості інших металів) обумовлений реальною мікро- та субмікροструктурою сталі, а також існуванням у всіх простих (хімічних елементів) і складних речовин абсолютних електроповерхневих потенціалів, Φ . У контакті з водою відбувається розподіл заряду, блоки і зерна набувають подвійного електричного шару ПЕШ з потенціаловизначальними іонами ПВІ Fe^{2+} і

відповідно протиіонами OH^- (що містяться у воді) або O^{2-} , які утворені за рахунок відновлення кисню електронами. У цьому разі встановлено рівноважні електроповерхневі потенціали ψ_{ep}^p [17]. У роботі [18] показано, що у сталі рівноважний потенціал зерен фериту, перліту є більш негативним порівняно з цементитом міжзеренної границі у сталях із феритною структурою або шарів у зернах перліту.

Усе це дає змогу розробити кількісну теорію електрокорозії рейок, зокрема, у тунелях. Залізниця в Україні електрифікована постійним струмом напругою 3,3 кВ або змінним напругою 27,5 кВ. Контактна мережа залізниць, електрифікованих постійним струмом, живиться від тягових підстанцій, розташованих уздовж лінії на відстані до 20 км, і розділена на окремі секції (рис. 3). У секції виділяють також контактну мережу

станцій, парків, великих інженерних споруд – мостів, тунелів. На такі самі секції за допомогою ізолюючих стиків поділено і рейкові колії, які в колах живлення виконують функції зворотного проводу.

На контактний провід залізничі, електрифікованої постійним струмом, подано позитивний потенціал, на ходові рейки – негативний. Під час проходження секцією електричного рухомого складу ЕРС у колі живлення струм рейками протікає від ЕРС до відсмоктувальних ліній (зворотних кабелів підстанцій (рис. 3)). Рейки через скріплення, шпали і баласт у багатьох місцях електрично з'єднані із землею, яка фактично є паралельним їм провідником. Тому струм, що тече рейками, відгалужується в землю, як у паралельно приєднаний провідник, розтікається в землі (блукаючі струми), із якої поблизу тягових підстанцій знов натікає на рейки [10].

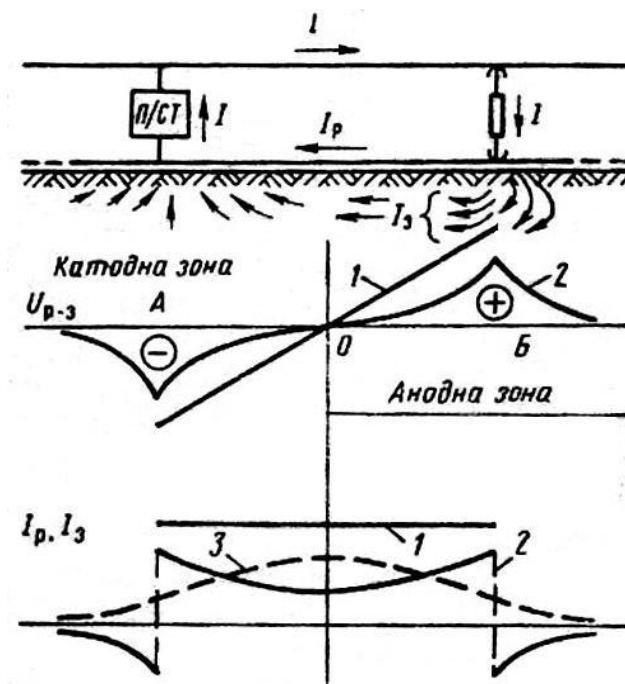


Рис. 3. Схема стікання тягового струму з рейкової колії і розподіл струмів і потенціалів уздовж рейок з однобічним живленням секції: I – тяговий струм; I_p – струм у рейках; I_3 – струм у землі; $U_{p-з}$ – потенціал рейка – земля; 1 – значення за повної ізоляції рейок від землі; 2 – фактичні значення; 3 – струм у землі

Ділянка рейкової колії, із якої струм стікає, набуває відносно землі позитивного потенціалу і є анодною зоною, а ділянка, на яку струм натікає, залишається з негативним потенціалом і є катодною зоною (рис. 3). Із переміщенням ЕРС максимальний позитивний потенціал переміщується вздовж колії разом із ним, а максимальний негативний потенціал залишається закріпленим у точці підключення до відсмоктувальної лінії. Отже, існує й знакозмінна зона, яка залежно від місцезнаходження ЕРС може бути анодною чи катодною. В анодних зонах струми витоку стікають з елементів верхньої будови колії, у катодних зонах блукаючи струми натікають на елементи верхньої будови колії.

На електрифікованому постійним струмом рейковому транспорті струми витоку обумовлюють електрокорозію металевих конструкцій і деталей, арматури і навіть бетону залізобетонних конструкцій залізничних споруд, а блукаючи струми – близько розташованих металевих споруд. У таких спорудах ділянки, на які струми натікають, є катодними зонами, а з яких стікають – анодними, причому також існують знакозмінні зони.

Електрокорозійне руйнування металу полягає в його електрохімічному розчиненні на анодних ділянках, із яких в електролітичне середовище стікає постійний струм. Отже, на анодних ділянках колії електрокорозії зазнають рейки, скріплення, арматура залізобетонних конструкцій – шпал, мостових опор, тунельної оправи тощо.

На катодних ділянках колії, на які блукаючи струми натікають, електрокорозії металевих конструкцій і деталей, арматури залізобетонних конструкцій не відбувається.

Електрокорозії металевих конструкцій і деталей не відмічають також на рейковому транспорті, електрифікованому змінним струмом. У цьому випадку катодні та анодні процеси відбуваються на одних і тих самих

ділянках і змінюються з частотою, яка виключає розвиток корозійних процесів.

Позитивний потенціал від ЕРС передається на рейку від колісних пар через невеликі за площею контакти, умовно точкові, що переміщуються разом із ним.

У цьому разі рейка в поздовжньому напрямку від ЕРС до відсмоктувальної лінії поляризується так, що ближча до ЕРС зона рейки (десь на половину відстані між відсмоктувальними лініями), набуває позитивного потенціалу, а частини, ближчі до відсмоктувальних ліній, – негативного. Електричний опір рейки на цих ділянках

$$R_p = \rho L / S_p. \quad (7)$$

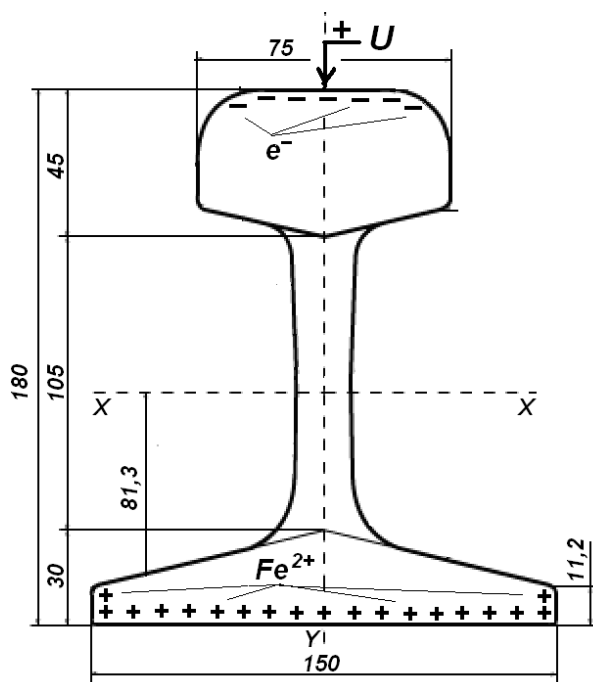
Для питомого електричного опору сталі $\rho = 12 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, площі поперечного перерізу рейки Р65 $S_p = 82,65 \text{ см}^2 = 0,0083 \text{ м}^2$ та довжини ділянки близько $L = 10 \text{ км} = 10000 \text{ м}$

$$R_p = 12 \cdot 10^{-8} \cdot 10000 / 0,0083 = 0,144 \text{ [Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м} / \text{м}^2 = \text{Ом}].$$

Як бачимо, електричний опір рейки вскрай малий.

Через гранично малий електричний опір рейки і значний (порівняно з рейкою) опір ізолюючих деталей рейкових скріплень рейка поляризується – виникає поле поляризації напруженістю $E_{\text{пол}}$ також у напрямку від головки до підшви. У цьому разі електрони з підшви зміщуються в бік позитивного потенціалу на колісних парах, у головці рейки (у поперечному перерізі) накопичується надлишкова кількість електронів e^- (негативний заряд), а в нижній частині – надмірна кількість катіонів Fe^{2+} (позитивний заряд) із переходом через нульовий заряд у зоні нейтральної осі.

Ураховуючи це і форму рейки (рис. 4), припускаємо для спрощення, що весь позитивний заряд накопичується рівномірно в підшві рейки. Відповідно негативний – у головці рейки.

Рис. 4. Поляризація рейки під впливом потенціалу U_p

Напруженість поля поляризації залежатиме від потенціалу на рейці U_p (або електричного заряду Q) і висоти рейки H_p :

$$E_{\text{пол}} = U_p/H_p = Q_p/H_p^2 \text{ [В/м]}. \quad (8)$$

Оскільки напруженість електричного поля – це щільність поверхневого заряду на відстані від нього H_p , що відповідає визначенню напруженості електричного поля, електричний заряд у підшві рейки дорівнює

$$Q_p = E_{\text{пол}} H_p^2 = UH \text{ [Кл]}. \quad (9)$$

Для висоти рейки $H_p = 180 \text{ мм} = 0,18 \text{ м}$ і максимально можливого для умов тунелів потенціалу на рейці 80 В електричний заряд дорівнюватиме

$$Q_p = 80 \cdot 0,18 = 14,4 \text{ [В} \cdot \text{м} = \text{Кл]}.$$

Об'єм підшви рейки над підкладкою в місці стікання корозійного струму для ширини підкладки 140 мм дорівнюватиме

$$V_p \approx (11,2 + (30 - 11,2)/2) \cdot 150 \cdot 140 = 432600 \text{ мм}^3 = 432,6 \text{ см}^3 = 0,00433 \text{ м}^3.$$

Заряд Q_p утворився з виникненням потенціалу на рейці за рахунок стікання з поверхні зерен перліту поверхневих потенціалвизначальних електронів ПОЕ (вільних електронів) і їх переходу в головку рейки.

Отже, на місці, звідки пішли електрони, залишаються катіони Fe^{2+} , зрушуючи в позитивний бік негативний

абсолютний і рівноважний електроповерхневі потенціали зерен перліту, які прийемо рівними потенціалам зерен фериту [36] – $\psi_{\text{еп}}^0 = -1,77 \text{ В}$ і $\psi_{\text{еп}}^p = -1,36 \text{ В}$ відповідно.

Питома поверхня зерен перліту розміром b складе

$$s_{\text{ф}} = 6b^2/b^3 = 6/b \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (10)$$

Для $b = 13$ мкм вона складе

$$s_{\phi} = 6/(13 \cdot 10^{-6}) = 4,6 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Загальна площа поверхні зерен перліту в об'ємі, що розглядають,

$$s_{\phi} = 4,6 \cdot 10^5 \cdot 0,00433 = 1992 [(\text{м}^2/\text{м}^3) \cdot \text{м}^3 = \text{м}^2].$$

Зміна густини поверхневого заряду зерен перліту в разі наведення на рейку потенціалу $U_p = 80$ В складе

$$q_{\phi} = U_p H_p / s_{\phi} = 80 \cdot 0,18 / 1880 = 0,0072 \text{ Кл}/\text{м}^2. \quad (11)$$

Електроповерхневий потенціал сталі [36] зміниться:

$$\Delta\psi_{\text{еп}} = q_{\phi} d_1 / \epsilon \epsilon_0. \quad (12)$$

де d_1 – відстань між потенціалвизначальним іонієм і протиіоном у подвійному електричному шарі, $2,52 \cdot 10^{-10}$ м;

ϵ – відносна діелектрична проникність вакууму, 1;

ϵ_0 – електрична стала, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м.

$$\Delta\psi_{\text{еп}} = 0,0072 \cdot 2,52 \cdot 10^{-10} / 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} = 0,206 \text{ В}.$$

У результаті отримаємо

$$\Delta\psi_{\text{еп}} = 9,04 \cdot 10^{-5} \cdot U_p \cdot 2,52 \cdot 10^{-10} / 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} = 2,57 \cdot 10^{-3} \cdot U_p, \text{ В}. \quad (13)$$

Наведений потенціалом на рейці рівноважний (на контакті з водою) електроповерхневий потенціал перліту сталі в підшві рейки

$$\psi_{\text{еп}} = \psi_{\text{еп}}^p + \Delta\psi_{\text{еп}} = 2,57 \cdot 10^{-3} \cdot U_p - 1,36, \text{ В}. \quad (14)$$

Отже, потенціал на рейці, що дорівнює $U_p = 80$ В, зміщує потенціал на підшві рейки в позитивний бік. Таке зміщення потенціалу еквівалентно зменшенню рН розчину (конденсатної плівки, води у ґрунті) [36] до величини

$$pH = 7 - 2,57 \cdot 10^{-3} \cdot U_p / 0,059 = -0,044 U_p + 7, \quad (15)$$

що для $U_p = 80$ В складе $pH = 3,5$.

Залежності величини потенціалу перліту сталі в підшві рейки $\psi_{\text{еп}}$ та еквівалентної величини pH від потенціалу на рейці U_p (14) і (15) подано на рис. 5, а, б.

Кінетика електрокорозійного пошкодження рейок. Величини pH добре корелюють із даними [11] щодо швидкості корозії вуглецевої сталі, мм/р. (табл. 1).

Таблиця 1

Швидкість корозії вуглецевої сталі, мм/р., у неорганічних кислих середовищах

Ступінь агресивного впливу	pH	Швидкість корозії, мм/р.
Неагресивний або дуже слабо агресивний	7	0
	5,5	0,01
Слабо агресивний	4	0,1
	2	1
Помірно агресивний (середньо агресивний)	0	5

У результаті апроксимації залежності, наведеної на рис. 5, а, отримано рівняння регресії – поліном четвертого ступеня, коефіцієнт кореляції якого складає $R = 1$:

$$x = 0,0045pH^4 - 0,1019pH^3 + 0,873pH^2 - 3,3743pH + 5. \quad (16)$$

У результаті підстановки отримано рівняння

$$x = 1,687 \cdot 10^{-8} \cdot U_p^4 - 2,053 \cdot 10^{-6} \cdot U_p^3 + 1,086 \cdot 10^{-4} \cdot U_p^2 - 1,865610^{-3} \cdot U_p + 0,0097. \quad (17)$$

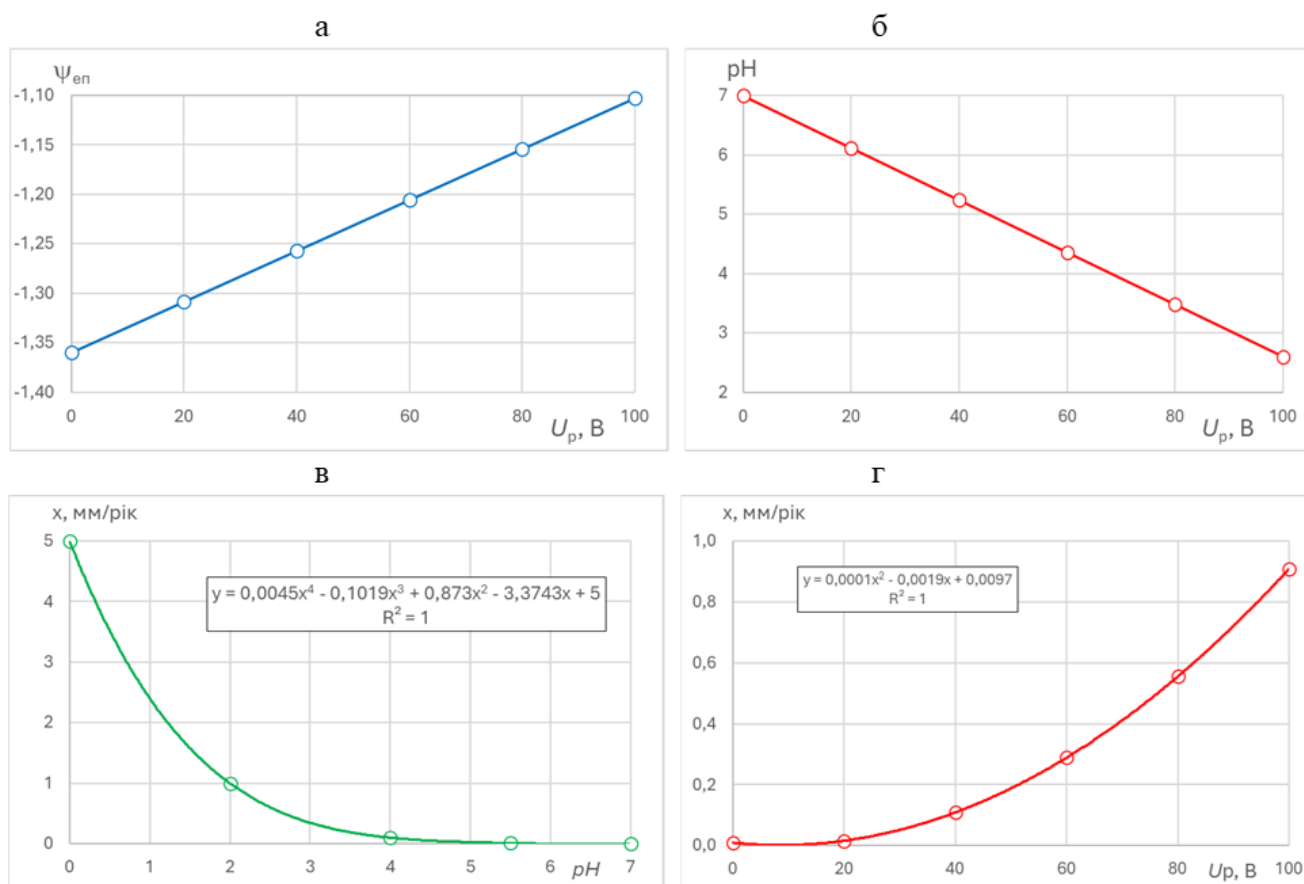


Рис. 5. Залежності від потенціалу на рейці U_p електроповерхневого потенціалу перліту сталі в підшві рейки $\psi_{\text{еп}}$ (а), еквівалентної величини pH (б), швидкості корозії x , а також залежність швидкості корозії x від еквівалентної величини pH

Рівняння (17) може бути використано для оцінювання швидкості корозії рейок в обводнених залізничних тунелях залежно від величини потенціалу на рейках, який виникає під час проходження тунелем ЕРС.

Отже, якісно можна порівняти електрокорозію рейок від позитивного потенціалу на них із корозією в кислих середовищах. Поверхня блоків перліту в зернах сталі окиснюється з передаванням електронів молекулам (атомам), будучи

мікрокатодами за традиційною схемою електрохімічної корозії. Оскільки відрив катіонів заліза здійснюється з кутів цих блоків, анодами є точки атомних розмірів, а не ділянки.

Отже, теоретично доведено, що однією з причин корозії підшви рейок (дефект № 69) є струми витоку з рейок на електрифікованих ділянках залізниць, а ця корозія є електрокорозією. Електрокорозія підшви рейок відбувається в умовах наведення на рейку позитивного потенціалу під час проходження ЕРС і обводненості, а її інтенсивність залежить від величини потенціалу на рейці. Уперше отримано кінетичне рівняння просування корозії в підшву рейки залежно від потенціалу на ній, який наведений під час руху рухомого складу.

Аналіз результатів натурних досліджень. Проаналізовано результати натурних досліджень за роботою [16]. У складі натурних досліджень тунелів було

виявлено показники обводненості тунелю, пошкоджень оправи і верхньої будови колії, визначено електричні потенціали на рейках та оправі. За показник обводненості приймали відсоток площі поверхні оправи, яка знаходиться в мокрому стані (з активними течіями) і вологому стані (волога без активних течій). Електричні потенціали вимірювали в режимі реального часу за допомогою цифрового мультиметра з високим вхідним опором Sanwa PC510 і ПЗ PC Link до нього за схемою, наведеною на рис. 6.

Було обстежено 13 залізничних тунелів на залізницях України: Донецькій – три, неелектрифікованих, довжиною від 41 м до 2063 м; Львівській – п'ять, електрифікованих постійним струмом, довжиною від 142 до 1746 м (рис. 6, а); Південній – один, електрифікований постійним струмом; Південно-Західній – один, електрифікований змінним струмом; Придніпровській – три, електрифікованих постійним струмом, довжиною від 301 до 453 м.



Рис. 6. Вимірювання потенціалів на рейці та поверхні оправи тунелю: а – тунель на електрифікованій постійним струмом ділянці Львівської залізниці; б – схема вимірювання; 1 – оправа тунелю; 2 – рейкова колія; 3 – вимірювальні прилади (цифрові мультиметри Sanwa PC510); 4 – кріплення провідника вимірювальної схеми до рейки затискачем; 5 – мідно-сульфатний електрод; 6 – заземлюючий електрод (сталевий стрижень $\varnothing 12$ мм, забитий у вологу землю на глибину 0,5 м на відстані не ближче 25 м від порталу тунелю)

На рис. 7 подані характерні (із максимальною з отриманих величин потенціалів) залежності електричних потенціалів на рейці та поверхні оправи на рівні головки рейки від часу під час проходження ЕРС. Як бачимо, з

наближенням ЕРС потенціал на рейці збільшувався до 115 В, а потім із віддаленням знов зменшувався. Те саме спостерігали під час проходження ЕРС сусідньою колією, але максимальна величина потенціалу складала 48 В.

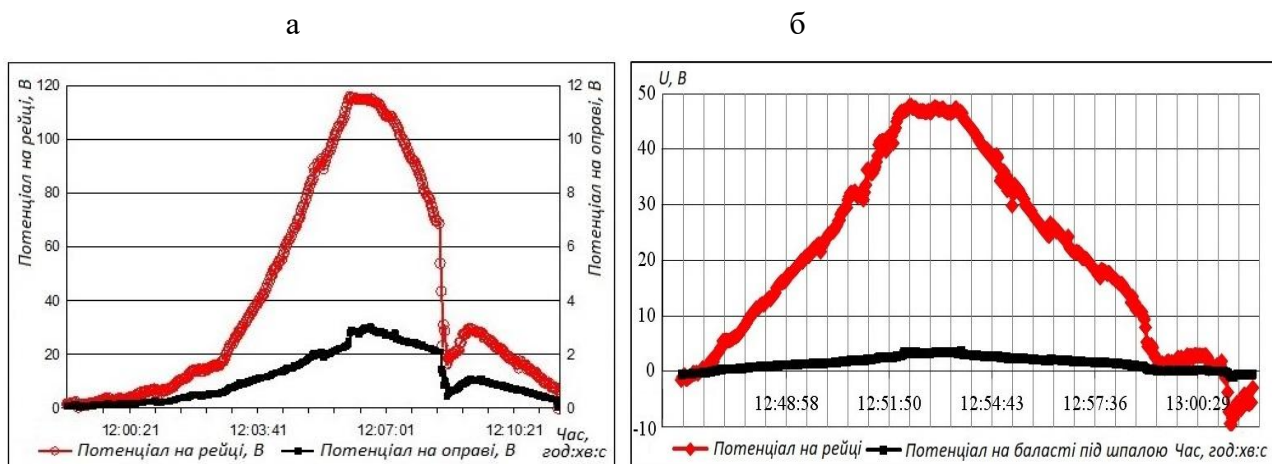


Рис. 7. Зміна в часі потенціалу U , В, на рейці, оправі тунелю на рівні головки рейки, баласті під шпалою під час проходження вантажного потяга:
а – колією, на якій вимірюють потенціал; б – сусідньою колією

На рис. 8 наведено найбільш характерні корозійні пошкодження елементів верхньої будови колії в тунелях. Як бачимо, у місцях більшої обводненості тунелю (із капежами) на шийці (рис. 8, б) і підшві рейки (рис. 8, г), деталях скріплень (рис. 8, г), спостерігають більш глибокі корозійні ушкодження, що відповідають дефектам № 59 і 69 відповідно, ніж у менш обводнених місцях (рис. 8, а, в).

Натурні дослідження показали, що корозію елементів верхньої будови колії в тунелях спостерігали за їхньої обводненості від 0 до 90 % і величини постійного (пульсуючого) електричного потенціалу на рейці від 0 до +116 В. Корозію не спостерігали в тунелях з обводненістю від 0 до 15 % і потенціалу до +22 В, а також тунелі, електрифікованому змінним струмом. Отже, натурні дослідження підтвердили залежність інтенсивності корозії конструкцій оправи і верхньої будови колії від обводненості

тунелів, наявності електрифікації постійним струмом і величини потенціалу на рейці. Зазначено також залежність інтенсивності корозії від довжини тунелів і, як наслідок, інтенсивності їх вентиляції, особливо за низької інтенсивності руху.

Експериментальні дослідження та аналіз результатів. Експериментальними дослідженнями імітували вплив електричного струму від проходження ЕРС на рейки та рейкові скріплення, що знаходяться в обводнених умовах. Дослідження проводили на зразках, складених із фрагменту рейки Р65 і підкладки, прикріплених костиллями до фрагменту дерев'яної шпали (рис. 9, а, в), а також із фрагменту рейки, встановленої на бетон або деревину (рис. 9, б, в). Зразки встановлювали в комірки з проточною водою і накладали на них електричний потенціал за схемами рис. 9, в, г. На зразки

згідно зі схемами рис. 9, в, г подавали пульсуючий однонаправлений електричний потенціал 40 В, що моделює проходження ЕРС, у режимі 10 хв – увімкнено, 7 хв –

вимкнено, протягом 1850 год. Напругу і силу струму реєстрували в режимі реального часу з дискретністю 2 с.

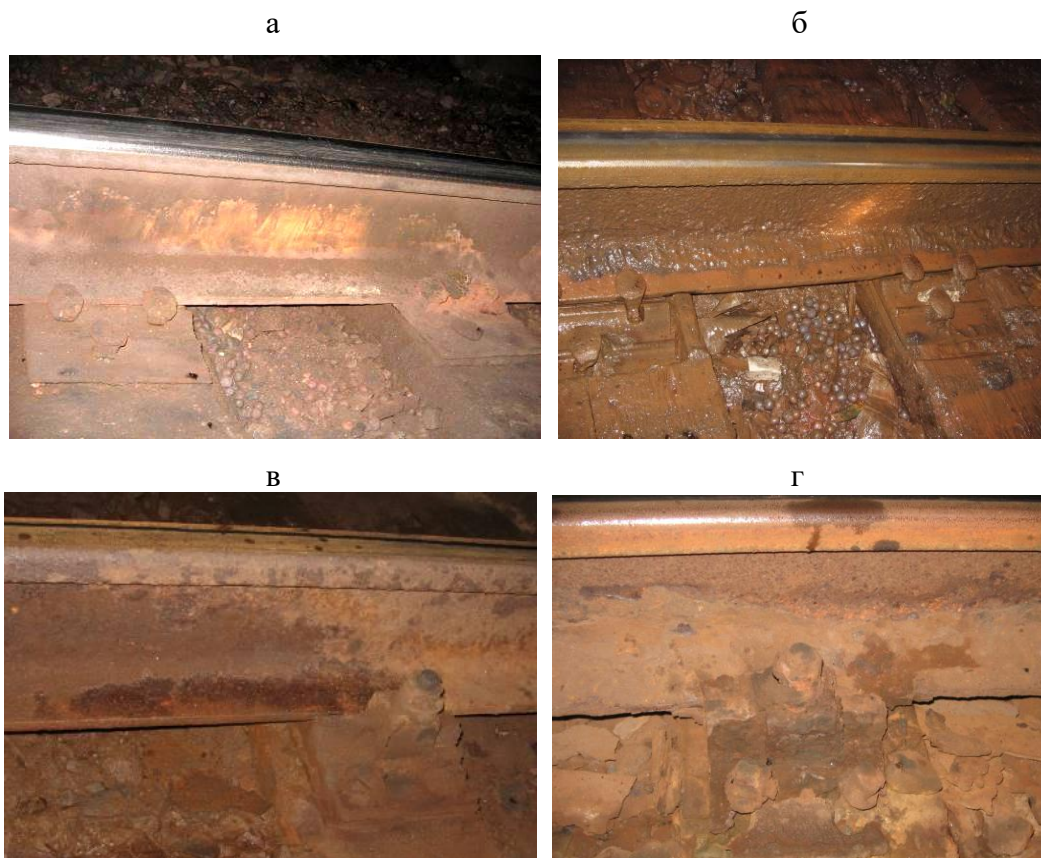


Рис. 8. Корозійні пошкодження рейки та елементів скріплень Д0 (а, б) і Д2 (в, г) тунелів у місцях зволоження баласту (а, в) і безпосереднього капежу на рейки (б, г)

Ступінь корозійного пошкодження визначали, періодично оглядаючи основний і контрольний зразки з інструментальним вимірюванням площі та глибини корозійного пошкодження підшви рейки та підкладки. Вигляд зразків після експозиції 1850 год наведено на рис. 10. Як бачимо, у результаті електричного впливу спостерігають більші корозійні пошкодження підшви підкладок (рис. 10, б), ніж без електричного впливу (рис. 10, а).

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що інтенсивність електрокорозії сталі прямо пропорційно

залежить від величини потенціалу, а інтенсивність електрокорозії в разі стікання струму крізь деревину вища, ніж у разі стікання струму через бетон, отже, інтенсивність електрокорозії елементів ВБК на дерев'яних шпалах за інших рівних умов вища, ніж на залізобетонних шпалах. У результаті експериментальних досліджень також підтверджено запропонований механізм електрокорозії підшви рейок в умовах обводнення внаслідок впливу пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу, який наведений на рейку ЕРС.

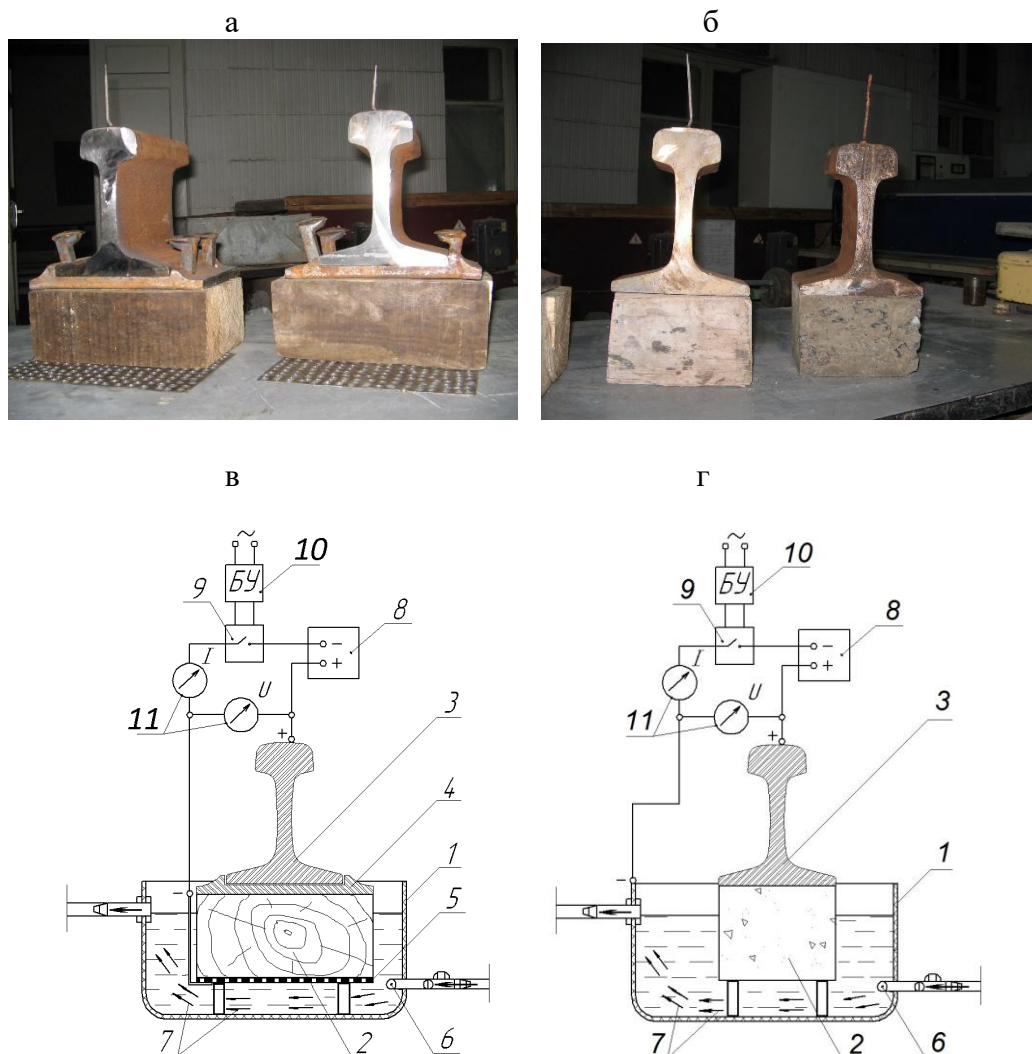


Рис. 9. Зразки та лабораторні установки для дослідження впливу пульсуючого однонаправленого струму і протікання води на рейки, встановлені:

- а, в – на дерев'яну шпалу з підкладкою; б, г – на бетон або деревину без підкладки;
 1 – поліетиленова (г – металева) комірка; 2 – фрагмент дерев'яної шпали (г – зразок деревини або бетону); 3 – рейка Р65; 4 – підрейкова підкладка;
 5 – перфорований електрод; 6 – трубка подавання води; 7 – потік води;
 8 – джерело живлення; 9 – реле; 10 – програмований блок управління;
 11 – вимірювальні прилади (Sanwa PC510)

Розроблення пропозицій із корегування нормативних термінів експлуатації конструкцій та елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях

За результатами проведеного аналізу встановлено чинники небезпеки корозії та електрокорозії елементів верхньої будови

колії в залізничних тунелях: обводненість верхньої будови колії і тунелю в цілому; наявність і величина позитивного електричного потенціалу на рейках електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць; розташування тунелю в умовах морського клімату ближче 1,5 км від моря; висока інтенсивність руху поїздів;

несправність рейкових скріплень (втрата властивостей прокладками тощо); агресивність підземних і ґрунтових вод, що потрапляють у тунель і на верхню будову колії; пошкодження шпал (гниль дерев'яних, корозія і тріщини залізобетонних); забрудненість баласту;

агресивні вантажі, що просипаються; агресивні вихлопні гази тепловозів (на неелектрифікованих ділянках); значна довжина тунелів – понад 500 м у поєднанні з несправною або неефективною вентиляцією. Перші два чинники є найвпливовішими.



Рис. 10. Зразки, що експонували 1850 год без електричного впливу (тільки у воді) (а) і під електричним впливом (б, в, г): а, б – скріплення Д0, нижня грань підкладки (рис. 9, а); в, г – рейка на деревині (рис. 9, б); а – без електричного впливу (тільки у воді); б – під електричним впливом, рейка на деревині; в, г – рейка на бетоні; а, в – вигляд збоку; б – підшва рейки; г – нижня грань бетону

Виконано системний аналіз великого масиву інформації [16], у складі якого для кожного із дев'яти обстежених тунелів зіставлено дані про їхню довжину, обводненість (табл. 2), величину потенціалу на рейці (рис. 7), фактичні терміни заміни

елементів ВБК згідно з експлуатаційною документацією, за результатами якого розроблено пропозиції з корегування нормативних термінів експлуатації конструкцій та елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях.

Таблиця 2

Стан тунелів за обводненістю

Стан тунелю за обводненістю	Відсоток поверхні оправи та колії (площі або кількості кілець), що знаходиться у стані		
	сухому	вологому, з окремими капежами	мокрому, з інтенсивним капежем і течіями
сухий	понад 75	до 25	0
обводнений	будь-який	понад 25	до 50
дуже обводнений		будь-який	понад 50

Для забезпечення надійності та безпеки експлуатації колії в тунелях для елементів верхньої будови колії в них запропоновано призначати норми періодичності ремонтно-колійних робіт [1] і

заміни матеріалів [3] з урахуванням поправок, наведених у табл. 3, залежно від довжини та обводненості тунелю, наявності і максимальної величини позитивного електричного потенціалу.

Таблиця 3

Зменшення норм періодичності ремонтно-колійних робіт [1] і збільшення норм витрат матеріалів на поточне утримання, комплексно-оздоровчий і середній ремонт колії [3] для тунелів

	Довжина тунелю, м	Величина зменшення / збільшення норм ^{1, 2} , %, для тунелів: неелектрифікованих та електрифікованих змінним струмом / електрифікованих постійним струмом		
		сухих	обводнених	дуже обводнених
Зменшення норм періодичності ремонтно-колійних робіт	до 100	0/0	0/1	1/2
	понад 100 до 200	0/0	1/3	2/4
	понад 200 до 500	0/1	4/10	6/12
	понад 500 до 1000	1/2	7/16	10/22
	понад 1000 до 2000	3/3	18/22	25/28
	понад 2000	4/4	22/24	30/30
Збільшення норм витрат матеріалів	до 100	0/0	1/2	2/3
	понад 100 до 200	0/1	3/6	4/9
	понад 200 до 500	1/3	9/19	12/25
	понад 500 до 1000	2/5	14/33	20/43
	понад 1000 до 2000	6/7	36/44	50/57
	понад 2000	7/8	43/47	60/61

Примітки: ¹ Залежно від максимального значення електричного потенціалу на рейці величину зменшення/збільшення норм потрібно множити на поправку: у разі максимального значення потенціалу до 0 В – 1; понад 0 до 10 В – 1,05; понад 10 до 50 В – 1,2; понад 50 В – 1,4.

² У разі збіжності декількох знижувальних чинників сумарне зменшення не має перевищувати 50/100 %.

Пропозиції повністю враховані в нещодавно чинному замість [3] стандарті [4].

Розроблено заходи із захисту конструкцій та елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях. Як першочергові потрібно вживати всіх заходів з осушення гірського масиву та/або гідроізоляції тунелів, а також обмеження струмів витoku, без яких ефективність всіх інших у вигляді захисних покриттів, способів активного захисту тощо буде набагато меншою.

Висновки. У результаті теоретичних досліджень встановлено, що корозія підшви рейок відбувається на електрифікованих ділянках залізниць в умовах обводненості через стікання струмів із них, і, отже, є електрокорозією. Розроблено механізм електрокорозії підшви рейок, за яким під впливом наведеного на рейку під час проходження електрорухомого складу позитивного пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу відбувається її вертикальна поляризація, яка змінює

електроповерхневий потенціал зерен перліту сталі на кшталт зміни абсолютного електроповерхневого потенціалу до рівноважного під впливом pH . Обґрунтовано залежності величини електроповерхневого потенціалу перліту, еквівалентної величини pH і швидкості корозії, мм/р., від величини потенціалу на рейці. Потенціал на рейці 100 В еквівалентний впливу середовища з $pH = 2,6$, якому відповідає швидкість корозії сталі 0,91 мм/р. У результаті натурних та експериментальних досліджень підтверджено запропонований механізм електрокорозії підшви рейок в умовах обводнення, а також залежність інтенсивності корозії елементів ВБК від обводненості тунелів, наявності електрифікації постійним струмом і величини потенціалу на рейці, довжини тунелів. Для призначення періодичності ремонтно-колійних робіт у тунелях і витрат матеріалів ВБК для заміни запропоновано поправки, залежні від довжини і ступеня обводненості тунелю, наявності і максимальної величини позитивного електричного потенціалу, довжини тунелю.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 9002:2020. Споруди транспорту. Класифікація, періодичність призначення та проведення планово-запобіжних ремонтів залізничних колій. Київ, 2020. 30 с.
2. ДБН В.2.3-19:2019. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування. Чинні з 29.03.2019 р. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-126>.
3. ЦП 0123. Середні норми витрат матеріалів і виробів на поточне утримання та ремонт колії й інших пристроїв колійного господарства залізниць України. Київ: Укрзалізниця, 2005. 43 с.
4. СТП 06-009:2021. Колійне господарство. Норми витрат матеріалів і виробів на поточне утримання, реконструкцію, технічне переоснащення та ремонти. Київ: Укрзалізниця, 2021. 57 с.
5. ЦП 0150. Технічні вказівки з використання староприслужних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України. Київ: Укрзалізниця, 2006. 56 с.
6. ВНД УЗ 32.2.03.018-2013. ЦП Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України (ЦП 0285).
7. Stark J. Alkali-Kieelsäure-Reaktion. Finger-Institutes für Baustoffkunde. Weimar (2008).
8. Пішінко П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.2001. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.
9. Бульба Т. Г. О корозії підшви рейок *Колія та колійне господарство*. 1967. З. 12.
10. Котельников А. В. Блукаючи струми електрифікованого транспорту. Транспорт, 1986. 279 с.

11. Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd ed. R. Winston Revie (ed). Wiley (2011). <http://doi.org/10.1002/9780470872864>.
12. Технічна характеристика інженерних споруд залізниць України. Київ: Укрзалізниця, 2014.
13. Tunnel Engineering Handbook. 2nd ed. J.O.Bickel, T.R.Kuesel, E.H.King (Eds) Springer. 1996.
14. Zacharie Grossen. Gotthard Base Tunnel at Sedrun multifunction station (east tube), looking north. The vertical distance to the ground is about 1100 metres from this point. CC BY-SA 4.0. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=53217042>.
15. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: верхня будова колії в залізничних тунелях / А. А. Пługін, А. М. Пługін, Д. А. Пługін та ін. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2011. Вип. 122. С. 187–201.
16. Проведення досліджень корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях, визначення їх термінів експлуатації та розробка заходів щодо їх захисту від корозії: звіт про НДР / УкрДАЗТ. Етап 1 (2010) 108 с.; Етап 2 (2010) 204 с.; Етап 3 (2011) 101 с. № 60/3-2010.
17. Основи теорії твердіння, міцності, руйнування та довговічності портландцементу, бетону та конструкцій із них. Т. 1. Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка цементних бетонів / за ред. А. М. Пługіна. Київ: Наукова думка, 2011. 331 с.
18. Пługін А. М., Пługін А. А., Горбачова Ю. М., Афанасьєв О. В. Електроповерхневий потенціал простих речовин – основа моделювання міцнісних і корозійних властивостей сталевих і залізобетонних конструкцій. *Науковий вісник Луганського національного аграрного університету*. 2010. 14. 19–41.

Пługін Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039. Тел.: +38 (095) 862-48-89. E-mail: plugin0785@gmail.com.

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 (050) 533-68-85. E-mail: aaplugin@gmail.com.

Геворкян Едвін Спартаківич, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів і якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577. Тел.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com.

Муригін Максим Андрійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Тел.: +38 (099) 096-62-01. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Oleksii Pluhin, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials, Structures, and Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039. Tel.: +38 (095) 862-48-89. E-mail: plugin0785@gmail.com.

Andrii Plugin, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: aaplugin@gmail.com.

Edvin Gevorkyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Car Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com.

Maksym Murygin, Postgraduate Student of the Department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Tel.: +38 (099) 096-62-01. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.