

УДК 625.1:691

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ НА КОРОЗИЙНІ ПРОЦЕСИ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛАХ

Д-р техн. наук А. А. Пługін, аспіранти М. А. Муригін, О. П. Крикун,
Е. Ф. Наджафов, В. В. Зінченко

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL POTENTIALS ON CORROSION PROCESSES IN REINFORCED CONCRETE SLEEVES

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, postgraduate students M. A. Murygin, O. P. Krykun,
E. F. Nadzhafov, V. V. Zinchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301944>



Анотація. Проведено експериментальні дослідження впливу електричних потенціалів на інтенсивність корозійних процесів у залізобетонних конструкціях підрейкових основ. Розроблено методику досліджень, яка передбачає створення цих впливів на моделі, та оцінювання їхніх наслідків. Створено впливи капілярного підняття, випаровування, дифузії, кристалізації солей, електричного потенціалу, передбачено оцінювання впливу електричного потенціалу на прискорення процесів перенесення та проявів ознак корозії. Виготовлено моделі та експериментальні установки, проведено дослідження. Експозицію моделей здійснювали у водному середовищі та розчині хлориду натрію без електричного впливу (як контроль) і під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу (ПОЕП). Встановлено, що під час впливу ПОЕП сила струму крізь моделі знижується, питомий електричний опір моделей зростає. ПОЕП прискорює проникнення іонів у модель у 4,43 раза, а також обумовлює більш сильні прояви ознак електрокорозії арматури. Прискорення перенесення іонів має прискорювати й корозійні процеси в бетоні, але їхнє дослідження доцільно проводити з більшими термінами експозиції моделей і з застосуванням фізико-хімічних методів. Рекомендовано засоби дренажу струмів, що стікають із рейок крізь шпали, і запропоновано усунути випуски арматури з їхніх торців.

Ключові слова: залізобетонна шпала, струм витоку, електричний потенціал, електроміграційне перенесення іонів, електрокорозія.

Abstract. Experimental studies of the influence of electric potentials on the intensity of corrosion processes in reinforced concrete structures of under-rail foundations have been conducted. A research methodology has been developed that involves the creation of these influences on models and the assessment of their consequences. The effects of capillary rise, evaporation, diffusion, crystallization of salts, electric potential have been created, and the impact of electric potential on

the acceleration of transfer processes and manifestations of corrosion signs has been estimated. Models and experimental installations were made, research was conducted. The exposure of the models was carried out in an aqueous environment and in a sodium chloride solution without electrical influence (as a control) and under the influence of a pulsating unidirectional electric potential of the PUEP. It was established that the current through the models decreases under the influence of PUEP, and the specific electrical resistance of the models increases. PUEP accelerates the penetration of ions into the model by 4.43 times, and also causes stronger manifestations of signs of electrocorrosion of the armature. As a result of the exposure of the models without electrical influence in the water environment, weak corrosion of the armature outlets was noted, no corrosion of the armature was observed inside the model; in the sodium chloride solution, strong corrosion of the armature outlets and weak corrosion inside the model was observed. As a result of the influence of PUEP in the water environment, weak corrosion of the fittings was observed, inside the model, no corrosion of the fittings was observed; in the sodium chloride solution, weak corrosion of the armature outlets and strong corrosion was observed inside the model. It has been confirmed that the influence of PUEP significantly accelerates the transfer of ions in concrete and intensifies the corrosion processes of reinforcement. Acceleration of ion transport should also accelerate corrosion processes in concrete, but it is advisable to conduct their research with longer exposure periods of models and with the use of physicochemical methods. Means of draining the currents flowing from the rails through the sleepers were recommended and it was suggested to eliminate the armature discharges from their ends.

Keywords: reinforced concrete sleeper, leakage current, electric potential, electromigratory transfer of ions, electrocorrosion.

Вступ. Споруди залізничного транспорту – підрейкові основи, мости, водопропускні труби, тунелі, пасажирські та вантажні платформи тощо – експлуатуються в особливо складних умовах. Додатково до навантажень від рухомого складу, атмосферних впливів вони зазнають вібрації, абразивного впливу потоку повітря з частинками баласту від руху поїздів, впливу електричних струмів витoku з рейок. Руйнівний вплив постійного струму витoku на металеві конструкції та арматуру залізобетону відомий, заходи захисту від нього навіть унормовані, проте не завжди ефективно запобігають електрокорозії арматури. У роботах УкрДУЗТ у результаті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що завдяки особливому пульсуючому через рух поїздів режиму струму бетон також зазнає електрокорозії, яка полягає в його електроміграційному вилуговуванні. Проте в зазначених експериментальних дослідженнях впливу електричного струму піддавали зразки лише бетону. У роботі [2]

проаналізовано шляхи струму крізь бетон і арматуру залізобетонної шпали і показано їхній взаємний вплив, який локалізує зони корозії і визначає її інтенсивність для арматури і бетону. Тому експериментальні дослідження впливу пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу на зразки бетону з арматурою (моделі шпал) та удосконалення заходів із захисту від електрокорозії є актуальними завданнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електрокорозія залізобетонних конструкцій не піддається сумніву, активно досліджується, розробляються заходи з захисту від неї [1–4]. У роботі [5] для залізобетону транспортних споруд пропонувано алгоритм оцінювання її ризику на основі статистичних методів. Проте ушкодження бетону в цих конструкціях звичайно пов'язують із тиском продуктів корозії арматури, статичними та динамічними навантаженнями, морозним руйнуванням, корозією в різних агресивних середовищах і не пов'язують із безпосереднім впливом електричних струмів [6]. Для

підвищення стійкості шпал до зазначених механічних і фізичних впливів а, отже, підвищення ресурсу для їх виготовлення застосовують високофункціональні бетони [7], дисперсно-армовані сталеву або полімерною фіброю фібробетони [8]. Ці бетони мають вищі показники міцності, у т. ч. ударної, зносостійкості, а також водонепроникності, морозостійкості, але їхні електротехнічні властивості не аналізуються і не регулюються, а в роботі [9] зазначено електрокорозійні пошкодження сталеві фібробетону.

У роботах [10–12] у результаті теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що завдяки особливому пульсуючому синхронному руху поїздів, режиму струму бетон залізничних споруд також зазнає електрокорозії, яка полягає в його електроміграційному вилугованні. Крім того, показано, що такий пульсуючий однонаправлений електричний потенціал (ПОЕП) рf може інтенсифікувати за рахунок електроміграційного перенесення внутрішню корозію бетону від взаємодії луг цементу з реакційно здатними заповнювачами (Alkali-Silica Reaction ASR) [12–16]. Проте в зазначених експериментальних дослідженнях впливу електричного струму піддавали зразки лише бетону. У роботі [12] проаналізовано шляхи струму крізь бетон і арматуру залізобетонної шпали і показано їхній взаємний вплив, який локалізує зони корозії і визначає її інтенсивність для арматури і бетону. Отже, регулювання електротехнічних властивостей бетону як провідника другого роду та/або застосування електропровідних композицій для екранів-покриттів може запобігти утворенню зазначених зон корозії. Рекомендовано також заходи з дренажу струмів, що стікають з рейок крізь шпали та запропоновано виключити допущені випуски арматури з їхніх торців [12]. У світі успішно розробляють і удосконалюють бетони та суміші з керованою електропровідністю, яка регулюється переважно вуглеграфітовими наповнювачами [17, 18].

Їх застосовують переважно для нагрівальних елементів змінного струму різного призначення. Доведено доцільність застосування електропровідних композицій, здатних дренажувати струми з залізобетонних конструкцій, у т. ч. шпал [12].

Мета дослідження – встановлення показників прискорення корозійних процесів в арматурі та бетоні під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу (ПОЕП) для удосконалення заходів з запобігання їм. Для досягнення мети передбачені такі завдання: розроблення методики експериментальних досліджень впливу ПОЕП на корозійні процеси в бетоні та арматурі моделей залізобетонних шпал; проведення експериментальних досліджень і аналіз їхніх результатів.

Методика експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження виконували на моделях із цементно-піщаного розчину зі сталеву дріткою арматурою (рис. 1). На моделі створювали такі впливи:

1) капілярне підняття і випаровування води, вилуговання бетону – моделі занурені у воду на половину висоти (рис. 1, а);

2) капілярне підняття і випаровування води, електроміграційне від ПОЕП перенесення іонів – електроміграційне вилуговання бетону, електрокорозія арматури – моделі занурені у воду на половину висоти і на них накладено ПОЕП (рис. 1, б);

3) капілярне підняття і випаровування розчину з кристалізацією хлоридів – сольова корозія бетону, корозія арматури хлоридами – моделі занурені в розчин $NaCl$ 3 % на половину висоти (рис. 1, в);

4) капілярне підняття і випаровування розчину, електроміграційне від ПОЕП перенесення іонів, у т. ч. хлорид-іонів із кристалізацією хлоридів – електроміграційне вилуговання бетону, інтенсифікація сольової корозії бетону та електрокорозія арматури – моделі занурені в розчин $NaCl$ 3 % на половину висоти і на них накладено ПОЕП (рис. 1, г).

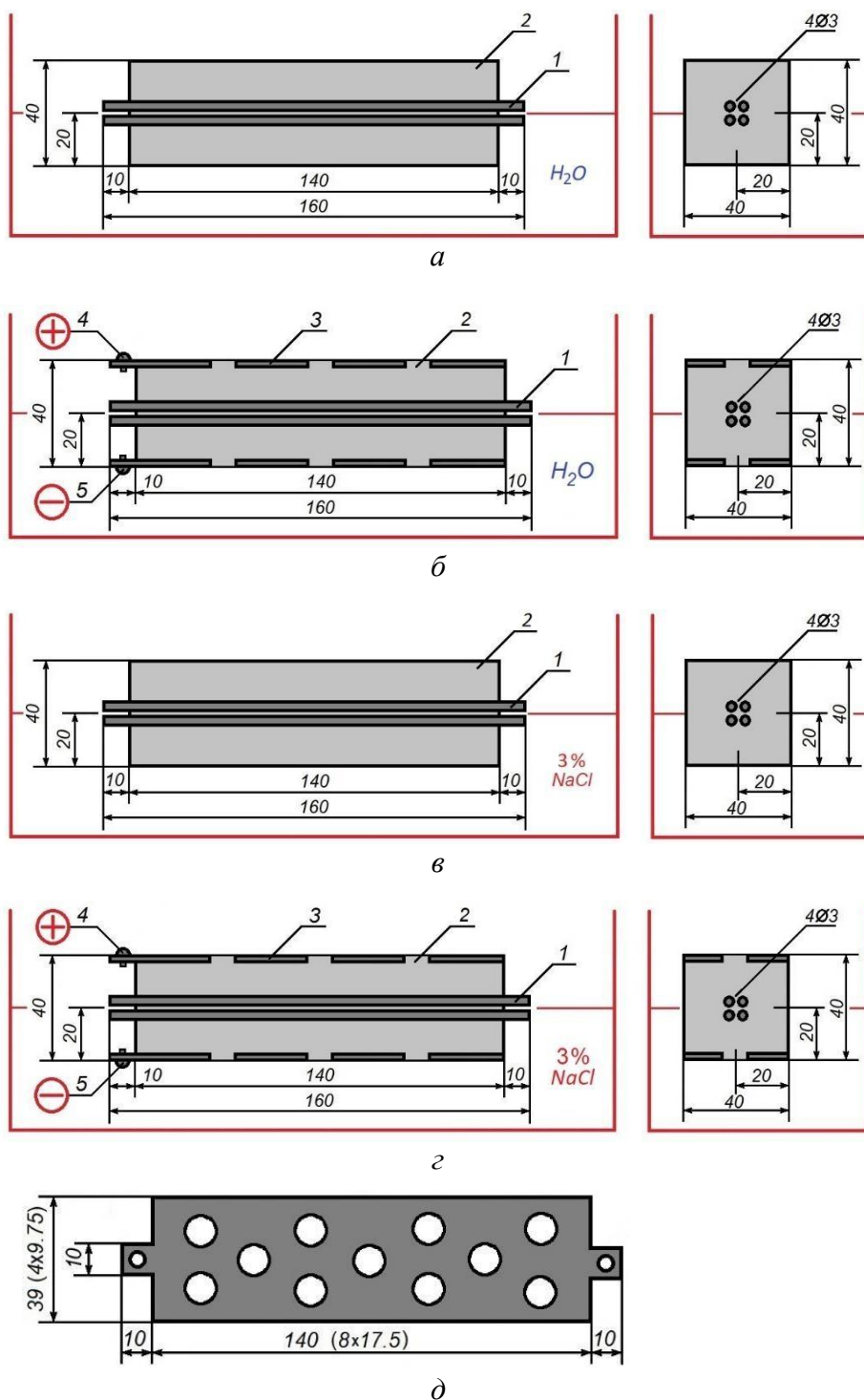


Рис. 1. Схеми створення агресивних впливів на моделі:

a, в – капілярного підняття, випаровування та кристалізації, у т. ч. хлоридів (*в*);
б, г – електроміграційного від ПОЕП перенесення, у т. ч. хлоридів (*г*); *д* – накладний перфорований сталевий електрод; *1* – сталевий дріт діаметром 3 мм; *2* – цементно-піщаний розчин (цементний камінь); *3* – електроди; *4* – контакт з позитивним полюсом; *5* – контакт з негативним полюсом

Моделі 1 і 3 без електричного впливу є контрольними для моделей 2 і 4 з впливом ПОЕП.

Електричний вплив полягав у накладанні ПОЕП 38 В з режимом пульсації: увімкнено – 15 хв, вимкнено – 10 хв через накладні перфоровані сталеві електроди (рис. 1, *д*): зверху – позитивного, знизу – негативного (рис. 1, *б*, *з*), що відповідає умовам експлуатації шпал (рис. 6, 7 [12]). Експозицію моделей без електричного впливу здійснювали впродовж 11 діб, з впливом ПОЕП – вісім діб.

Під час експозиції вимірювали величину сили струму I , А, крізь модель і будували графіки зміни в часі t сили струму I та питомого електричного опору ρ , який розраховували як, Ом \times м,

$$\rho = Ula/Ih, \quad (1)$$

де U – напруга, 38 В;

l , a – довжина і ширина моделі (електродів), 0,07 і 0,04 м відповідно;

h – висота моделі, 0,04 м.

Моделі виготовляли з цементно-піщаного розчину у вигляді балочок розміром 140 \times 40 \times 40 мм, армованих пучком дроту періодичного профілю з високовуглецевої сталі 4 \varnothing 3 мм (рис. 1). Розчин виготовляли з портландцементу СЕМ І 42,5 R і піску кварцового з розмірами зерен 0,2–0,3 мм. Склад розчину відповідав розчинній складовій бетону шпал Ц:П = 1:1,53 з водоцементним відношенням В/Ц = 0,35. Для виготовлення моделей застосовували стандартні форми зразків-балочок 160 \times 40 \times 40 мм (рис. 2). Для фіксації арматури і забезпечення її випусків, а також приформування електродів виготовляли вкладиші з фанери товщиною 10 мм, які перед формуванням моделей вкладали у форму (рис. 2). У вільних гніздах форм виготовляли зразки-балочки 160 \times 40 \times 40 мм для визначення фізико-механічних характеристик цементно-піщаного розчину.



Рис. 2. Фіксація арматури та накладних електродів у формах

Цементно-піщаний розчин моделей ущільнювали на стандартному лабораторному вібротолкатнику з частотою коливань 50 Гц і амплітудою 0,2–0,3 мм. Для прискорення твердіння моделі піддавали тепловологісній обробці в лабораторній пропарювальній камері з ізотермічною витримкою 6 год за температури 60 °С. Після пропарювання моделі розпалублювали і витримували три доби до

експозиції (рис. 3). Перед експозицією моделей зразки-балочки випробували з визначенням середньої щільності та міцності на стиск. Властивості розчину у віці шість діб: середня щільність – 2044 кг/м³, міцність на стиск 31,4 МПа, міцність на розтяг 6,9 МПа.

Моделі з електродами розрізали навпіл на станку з алмазним відрізним кругом без охолодження водою (для запобігання

вимивання хлоридів) і для електричної ізоляції верхньої грані від нижньої та мінімізації поверхневого протікання струму

по поверхні бічних граней наносили смугу з алкідної емалі (рис. 3).



Рис. 3. Моделі для експозиції в агресивних середовищах без електричного впливу та з електричним впливом – з накладними електродами та нанесеним на бічні грані поясом із алкідної емалі

Для накладання ПОЕП на моделі застосовували джерело постійного струму, що генерувало постійну напругу 38 В, для створення пульсуючого режиму – програмований вмикач-вимикач, вимірювання сили струму здійснювали цифровим мультиметром Sanwa PC510 (рис. 4, а).

Експериментальні установки збирали в контейнерах із діелектричного матеріалу (рис. 4). У контейнерах моделі поміщували на діелектричні підставки. Контейнери заповнювали водою або розчином до половини висоти моделі чи електроізоляційного поясу на ній. Для створення електричного впливу верхній електрод підключали до позитивного полюса джерела живлення, нижній – до негативного. Воду та розчин заміняли щоденно, електроди під час заміни води та розчину оглядали, очищували від продуктів

корозії, за необхідності – заміняли. Під час заміни води та розчинів і обслуговування електродів напругу вимикали. Силу струму вимірювали один раз на добу двічі – безпосередньо перед заміною води і розчину і одразу після.

Після експозиції моделі розрізали на зразки розміром 40×40×20 мм. Грані зразків розміром 40×40 мм, що відповідають поперечними перерізам моделей, досліджували з визначенням глибин нейтралізації та проникнення хлоридів, а також піддавали петрографічним дослідженням.

Для визначення глибини можливої нейтралізації цементно-піщаного розчину зрізи обробляли розчином фенолфталеїну 1 % в етанолі, за нейтралізований шар приймали шар розчину, який не забарвлювався в малиновий колір.

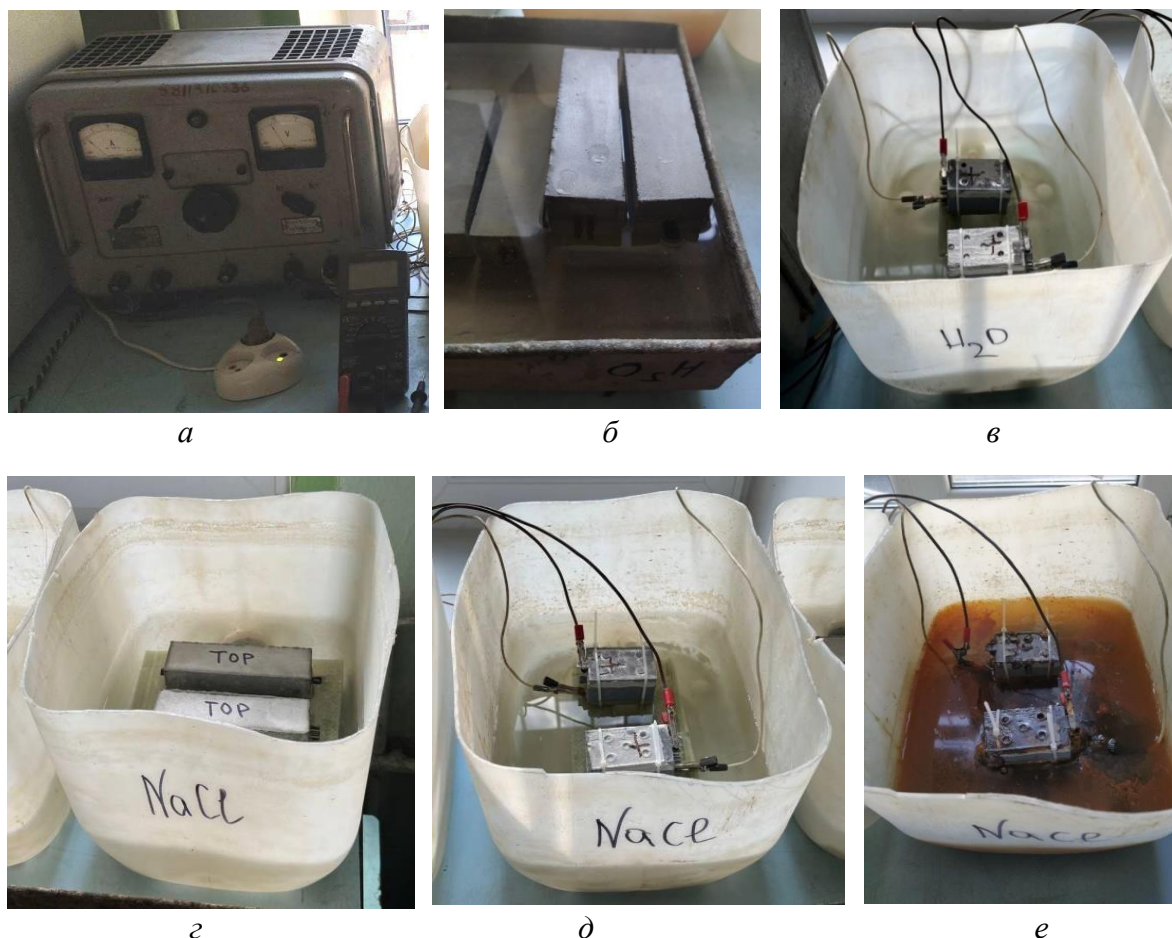
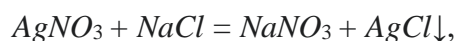


Рис. 4. Експериментальні установки з джерелом постійного струму, програмованим вмикачем-вимикачем і цифровим мультиметром Sanwa PC510 (а) для експозиції моделей в умовах капілярного підняття, випаровування та кристалізації, у т. ч. хлоридів (з, д, е) без електричного впливу (б, з) і з електричним впливом (електроміграційним перенесенням (в, д, е) одразу після вмикання (в, д) і після 1,5 доби експозиції (е)

Глибину проникнення хлоридів визначали за допомогою розчину нітрату срібла. Для якісного визначення хлор-іонів застосовували нітрат срібла (азотнокисле срібло) $AgNO_3$, зокрема реакцію його взаємодії з хлоридами:



де $AgCl$ – білий сироподібний осад.

Для визначення глибини проникнення хлоридів на зріз наносили водний розчин 1 % нітрату срібла, вимірювали глибину проникнення хлоридів x_x як товщину шару,

на якому утворився світлий наліт, за результатами декількох вимірювань розраховували середнє значення x_x .

Петрографічні дослідження виконували за допомогою світлового мікроскопу МБС-2 зі збільшенням 7,5–82,5. Досліджували зону контакту сталевий дрітної арматури з цементно-піщаним розчином на зрізах після агресивних впливів.

Результати дослідження та їх обговорення. Графіки зміни в часі сили струму в моделях і питомого електричного опору моделей впродовж впливу ПОЕП у водному середовищі та розчині хлориду натрію наведені на рис. 5.

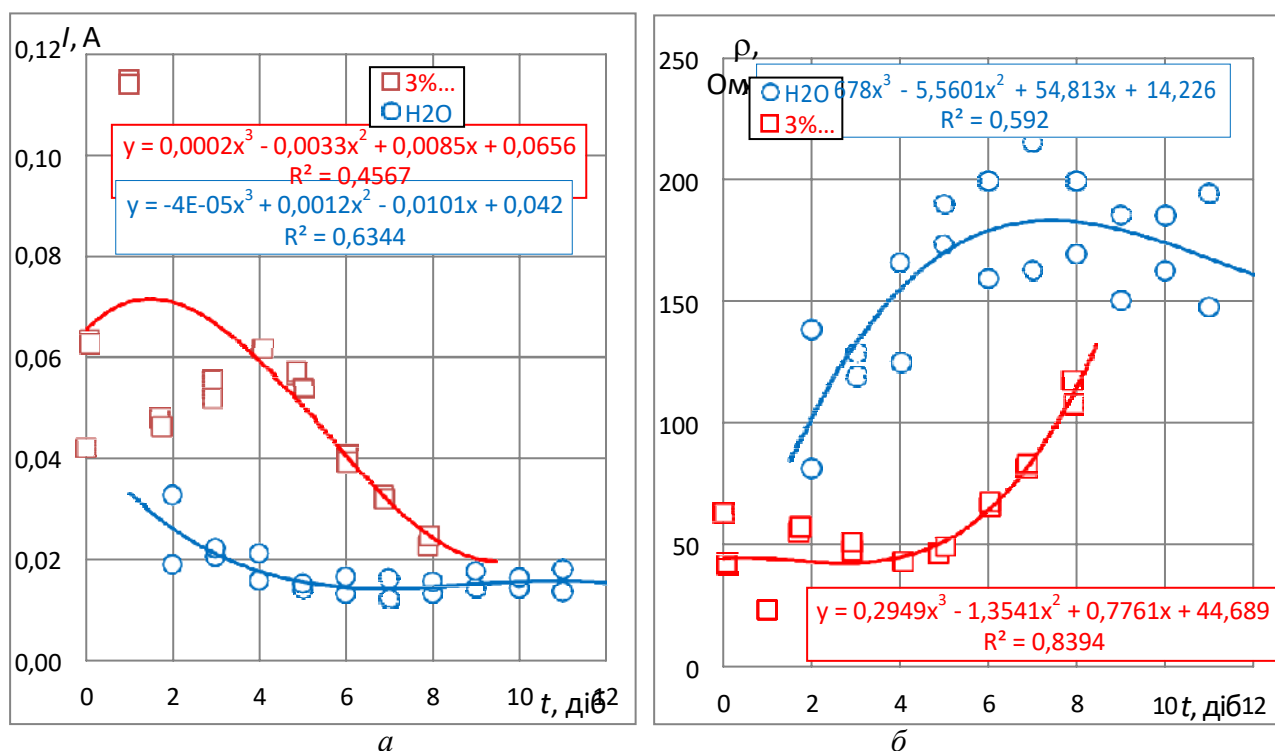


Рис. 5. Зміна з часом сили струму в моделях (а) та електричного опору моделей (б) впродовж впливу ПОЕП у водному середовищі (H_2O) і розчині $NaCl$ 3 %

Із графіків рис. 5 видно, що в моделях, які експонуються у водному середовищі, сила струму I на початку експозиції складає 0,03 А, питомий електричний опір ρ , розрахований за формулою (1), – 70 Ом·м. З експозицією I поступово знижується на 50 %, а ρ збільшується у 2,57 раза і через п'ять днів досягають величин 0,015 А і 180 Ом·м, після чого істотно не змінюються. У моделях, що експонуються в розчині $NaCl$ 3 %, I на початку експозиції складає 0,06 А, через одну добу збільшується до 0,07 А, очевидно, з проникненням у модель хлорид-іонів, а потім знижується, через вісім днів досягаючи 0,02 А. Відповідно ρ збільшується з 40 до 130 Ом·м. Такі зміни сили струму I та питомого електричного опору ρ задовільно апроксимуються поліномами третього ступеня з коефіцієнтами кореляції 0,68, 0,8 (рис. 5, а) і 0,77, 0,92 (рис. 5, б) відповідно. Зниження сили струму та збільшення питомого електричного опору впродовж

експозиції обумовлене, очевидно, зниженням пористості цементного каменю внаслідок догідратації клінкерних реліктів, у т. ч. з утворенням гідрохлоралюмінатів, поляризаційними явищами. Це певною мірою відповідає концепції адаптації бетону до агресивних впливів [19].

Під час експозиції в моделей, які експонували в розчині хлориду натрію під електричним впливом, спостерігалась інтенсивна корозія електродів і забарвлення розчину в коричневий колір, характерний для гідроксидів заліза (рис. 4, е), один раз електроди було замінено.

Зовнішній вигляд моделей після експозиції наведено на рис. 6. Після експозиції на вільних від емалі поверхнях випусків сталевих арматур моделей, які експонували у водному середовищі без електричного впливу, спостерігався наліт коричневого кольору (рис. 6, а), характерного для $Fe(OH)_2$. На поверхнях випусків сталевих арматур моделей, які

експонували в розчині $NaCl$ без електричного впливу, спостерігалися продукти корозії темно-коричневого кольору (рис. 6, *в*), характерного для $Fe(OH)_3$. У моделей, що експонували в розчині $NaCl$ із впливом ПООП, спостерігався наліт коричневого кольору $Fe(OH)_2$ (рис. 6, *г*) як на випусках арматури, так і поверхні розчину.

На моделях, що піддавали впливу ПООП у воді, на верхньому (позитивному)

електроді ознак корозії не спостерігалось, на нижньому (негативному) спостерігався наліт коричневого кольору $Fe(OH)_2$ (рис. 6, *б*). На обох електродах моделей, що піддавали електричному впливу в розчині $NaCl$, спостерігалися корозійні ушкодження у вигляді виразок і значна кількість продуктів корозії темно-коричневого кольору $Fe(OH)_2$ (рис. 6, *г*).

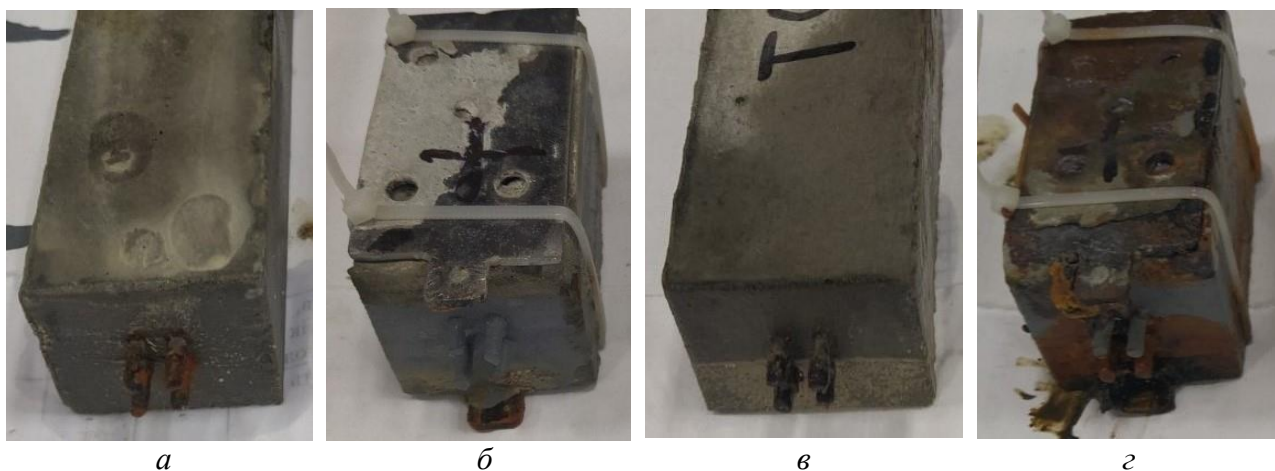


Рис. 6. Моделі після експозиції: *а, б* – у водному середовищі без електричного впливу (*а*) і під впливом ПООП (*б*); *в, г* – у розчині хлориду натрію без електричного впливу (*в*) і під впливом ПООП (*г*)

Нейтралізація цементного розчину за реакцією з фенолфталеїном у межах чутливості цієї реакції на жодній із моделей не спостерігалася (рис. 7).

Проникнення хлоридів спостерігалось на всіх моделях, що експонувались у розчині $NaCl$, без електричного впливу – на глибину до 9 мм (рис. 7, *а*), під впливом ПООП – на глибину до 29 мм з концентруванням навколо арматури (рис. 7, *б*). Швидкість проникнення хлоридів у розчин за рахунок капілярного підняття і дифузії без електричного впливу склала близько $9/11 = 0,82$ мм/доба або 299 мм/р., із впливом ПООП за рахунок електроміграційного перенесення – $29/8 = 3,63$ мм/доба або 1323 мм/р. Отже, ПООП за рахунок

електроміграційного перенесення прискорив перенесення хлорид-іонів у 4,43 раза.

Отримані в результаті петрографічних досліджень знімки зрізів моделей наведені на рис. 8, із якого видно, що всередині моделей, які експонували у водному середовищі як без електричного впливу, так і з впливом ПООП, ознак корозії арматури не спостерігалось. Усередині моделей, які експонували в розчині $NaCl$, спостерігались ознаки корозії арматури: без електричного впливу – коричневі плями на всьому зрізу дротин (можливо перенесені з границі дротини на поверхню зрізу під час різання), із впливом ПООП – рясні продукти корозії та краплини рідини коричневого кольору (незважаючи на застосоване сухе різання) на

границі між арматурою і цементним каменем.

Результати досліджень узагальнені в таблиці.

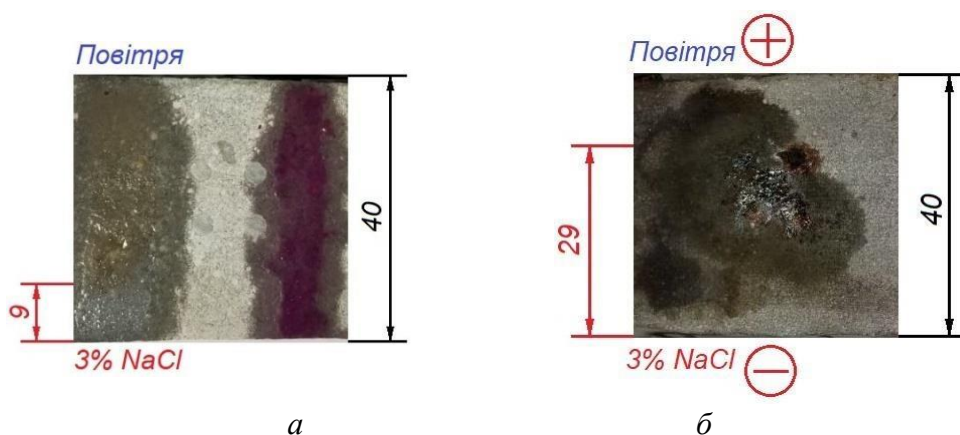


Рис. 7. Визначення за допомогою розчину фенолфталеїну глибини нейтралізації і за допомогою нітрату срібла глибини проникнення хлоридів у моделі внаслідок експозиції в розчині хлориду: а – без електричного впливу; б – під впливом ПОЕП

Таблиця

Узагальнені результати дослідження агресивних впливів на моделі

Показник		Величина для агресивного впливу			
		H_2O		Розчин $NaCl$ 13 %	
Електричний вплив		Нема	ПОЕП 38 В	Нема	ПОЕП 38 В
Сила струму, А, на стадії експозиції	на початку I_0	-	0,030	-	0,07
	наприкінці I	-	0,015	-	0,02
Зниження сили струму $(I_0 - I)/I_0$, %		-	50	-	71,4
Питомий електричний опір, Ом·м, на стадії експозиції	на початку ρ_0	-	70	-	40
	наприкінці ρ	-	180	-	130
Збільшення питомого електричного опору ρ/ρ_0		-	2,57	-	3,25
Вилугування (нейтралізація за фенолфталеїном)		Не спостерігається			
Проникнення хлоридів (за нітратом срібла)	глибина, мм	-	-	9	29
	швидкість, мм/доба	-	-	0,82	3,63
	прискорення, раз	-	-	-	4,43
Корозія арматури та продукти корозії	всередині	Нема	Нема	Слабка $Fe(OH)_2$	Сильна $Fe(OH)_2$
	випусків	Слабка $Fe(OH)_2$	Слабка $Fe(OH)_2$	Сильна $Fe(OH)_3$	Слабка $Fe(OH)_2$
Корозія електродів і продукти корозії		-	Слабка $Fe(OH)_2$	-	Сильна $Fe(OH)_3$
Рисунки		4, б; 6, а; 8, а	4, в; 6, б; 8, б	4, г; 6, в; 7, а; 8, в	4, д, е; 6, г; 7, б; 8, г

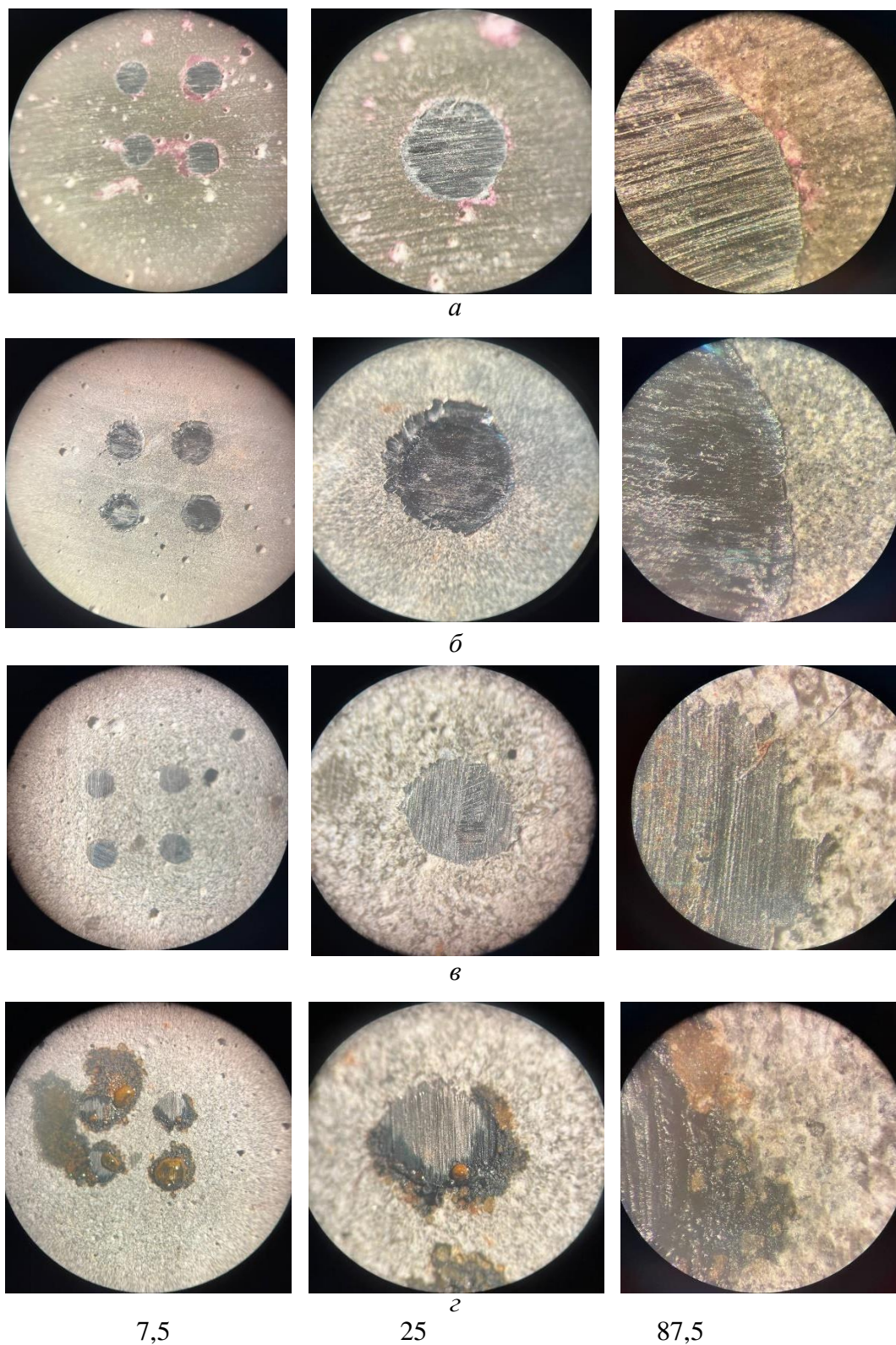


Рис. 8. Зрізи моделей після експозиції: *а, б* – без електричного впливу у водному середовищі (*а*) і в розчині хлориду натрію (*б*); *в, г* – під впливом ПОЕП у водному середовищі (*в*) і в розчині хлориду натрію (*г*)

Висновки та рекомендації.

Розроблено методику дослідження електричного впливу на інтенсивність корозійних процесів у залізобетонних конструкціях підрейкових основ, яка передбачає створення цього впливу на моделі конструкцій та оцінювання їхніх наслідків. Методи передбачають дослідження впливів і їхніх наслідків: капілярного підняття і випаровування води – вилуговування бетону; капілярного підняття і випаровування води з електроміграційним перенесенням іонів під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП – електроміграційного вилуговування бетону та електрокорозії арматури; капілярного підняття і випаровування розчину з дифузією та кристалізацією хлоридів – сольової корозії бетону, корозії арматури хлоридами; капілярного підняття і випаровування розчину $NaCl$ з електроміграційним перенесенням іонів під впливом ПОЕП, у т. ч. хлорид-іонів із кристалізацією хлоридів – електроміграційного вилуговування бетону, інтенсифікації сольової корозії бетону та електрокорозії арматури.

Згідно з розробленою методикою виготовлено моделі та експериментальні установки, проведено дослідження. Здійснювали експозицію моделей у водному середовищі та розчині хлориду натрію без електричного впливу (як контроль) і під впливом ПОЕП.

Встановлено, що впродовж впливу ПОЕП сила струму крізь моделі знижується на 50 % у водному середовищі та на 71,4 % у розчині хлориду натрію, питомий

електричний опір моделей зростає у 2,57 і 3,25 рази відповідно.

Нейтралізація цементного каменю в усіх моделях не спостерігалася. Дифузійне проникнення хлоридів без електричного впливу відбувається зі швидкістю 0,82 мм/доба, під впливом ПОЕП – зі швидкістю 3,63 мм/доба, отже, ПОЕП прискорює проникнення іонів у модель у 4,43 рази.

У результаті експозиції моделей без електричного впливу у водному середовищі відзначалася слабка корозія випусків арматури, всередині моделі корозія арматури не спостерігалася; у розчині хлориду натрію спостерігалася сильна корозія випусків арматури і слабка всередині моделі. У результаті впливу ПОЕП у водному середовищі відзначалася слабка корозія випусків арматури, всередині моделі корозія арматури не спостерігалася; у розчині хлориду натрію спостерігалася слабка корозія випусків арматури та сильна всередині моделі.

Отже, підтверджено, що вплив ПОЕП суттєво прискорює перенесення іонів у бетоні та інтенсифікує процеси корозії арматури. Прискорення перенесення іонів має прискорювати й корозійні процеси в бетоні, але їх дослідження доцільно проводити з більшими термінами експозиції моделей і з застосуванням фізико-хімічних методів.

Підтверджено рекомендації [12] щодо доцільності дренажу струмів, що стікають із рейок крізь шпали, і необхідності усунення випусків арматури з їхніх торців.

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., 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. Bertolini L., Carsana M., Pedferri P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 49 (2007). 1056–1068.
5. Ju Myong, Jin Kim, Kim Gwon. Investigation of the forecast algorithm for assessing the risk of electrocorrosion in the lining of railway tunnels. *Transport Technician*. 1 (3) (2020).
6. Mindess S. Resistance of concrete to destructive agencies. In book: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier. (2019) 251–283.
7. Bae Y., Pyo S. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance. *Engineering Structures*. 210 (2020). 110374.
8. Sadeghi J., Tolou Kian A. R., Shater Khabbazi A. Improvement of mechanical properties of railway track concrete sleepers using steel fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 28 (11) (2016). 04016131
9. Kangkang Tang. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 100 (2017). 445-456.
10. Плугін О. А. Дослідження впливу величини напруги пульсуючого однонаправленого електричного поля на електрокорозію бетону. Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. 115 (2010). 56-67.
11. Плугін О. А., Борзяк О. С., Мартинова В. Б., Халюшев О. К. Електричні впливи на бетон (електрообробка та захист від електрокорозії бетонів, виробів і конструкцій із них). Харків: Форт, 2013. 300 с.
12. Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій / А. А. Плугін, О. С. Борзяк, О. А. Плугін та ін. Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. 204 (2023). 35-52. URL: <http://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>.
13. Stark J. Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Bauhaus Universität Weimar. (2008). 139 p.
14. Kurdowski W. Chemia Cementu i Betonu. Kraków (2010) 728 str.
15. Коваленко В. В., Заяць Ю. Л., Пшінько П. О. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ-10 Одеської залізниці. *Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. 6 (2015). 149–163.
16. Krivenko P., Gelevera O., Kovalchuk O., Bumanis G., Korjakins A. Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 660(1) (2019). 012002.
17. Baoguo Han, Liqing Zhang, Jinping Ou. Electrically Conductive Concrete. In book: *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*, 2017. P. 247-259.
18. Cordon H. C. F., Tadini F. B., Akiyama G. A., de Andrade V. O., da Silva R. C. Development of electrically conductive concrete. *Cerâmica*. 66 (377). 2020.
19. Чернявський В. Л. Адаптація бетону і залізобетону – ресурс довговічності будівельних конструкцій. *Будівництво України*. 3 (2007). 2–5.

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, 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.

Муригін Максим Андрійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Крикун Оксана Петрівна, аспірантка кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. Тел.: +380957781771. E-mail: 0509ksushka@gmail.com.

Наджафов Ельшад Фаєд огли, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6143-8183. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Зінченко Владислава Володимирівна, аспірантка кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. Тел.: +38 (099) 601-34-25. E-mail: f23vladislava11v@gmail.com.

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.

Murygin Maksim, postgraduate student, department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

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.

Nadzhafov Elshad, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6143-8183. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: bmcs@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 19.03.2024 р.