

УДК 625.143.036:620.19

## ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ НА КОРОЗИЙНІ ПРОЦЕСИ В ЗАЛІЗНИЧНИХ ШПАЛАХ ІЗ БЕТОНУ ЗІ СТАЛЕВОЮ ТА КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

Д-р техн. наук А. А. Пługін, аспіранти М. А. Муригін, С. М. Мусієнко,  
доктори техн. наук І. О. Редько, Е. С. Геворкян

## COMPARATIVE STUDIES OF THE INFLUENCE OF ELECTRIC POTENTIALS ON CORROSION PROCESSES IN CONCRETE RAILWAY SLEEPERS WITH STEEL AND COMPOSITE REINFORCEMENT

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, postgraduate students M. A. Murygin,  
S. M. Musienko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkian

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341989>



**Анотація.** Для зниження електропровідності залізничних шпал із бетону, запобігання стіканню з рейок тягових струмів і їхнього електрокорозійного впливу на конструкції запропоновано замінити в шпалах сталеву арматуру композитною. Проаналізовано шляхи протікання електричних струмів через шпали, а також традиційні методи досліджень корозії під впливом струмів витоку. За результатами цього аналізу для порівняльних досліджень електрокорозійної поведінки шпал зі сталевую та композитною арматурою розроблено комплексну методiku досліджень процесів, які протікають у бетоні та арматурі в разі впливу електричних потенціалів. Методика полягає в накладанні електричних потенціалів – постійного або пульсуючого однонаправленого – на зразки-моделі шпал і дослідженні вилучених із моделей зразків комплексом методів включно з наноіндентуванням та електронною мікроскопією з елементним мікроаналізом. Наноіндентування дає змогу отримувати величини мікромеханічних властивостей цементного каменю – модуль пружності  $M$  і мікротвердість  $H$ , які залежать від ступеня її електроміграційного вилугування. Експериментально встановлено, що внаслідок електроміграційного вилугування  $M$  і  $H$  знижуються, починаючи з грані зразка, на яку під час експозиції накладали негативний потенціал. У середині моделі зберігаються максимальні величини  $M$  і  $H$ , а їхні залежності від відстані від зазначеної грані добре апроксимовані ступеневими рівняннями та поліномами. Встановлено величини невилуженого і максимально вилуженого цементного каменю з характерним для бетону шпал  $B/C$ , а також залежність характеру цих залежностей та інтенсивності електрокорозійних процесів у бетоні від характеру накладеного електричного потенціалу (постійного або пульсуючого однонаправленого) і виду арматури (сталеві чи композитної).

**Ключові слова:** залізобетонна шпала, композитна арматура, цементний камінь, постійний електричний потенціал, електрокорозія, наноідентація.

**Abstract:** To reduce the electrical conductivity of concrete railway sleepers, minimize the leakage of traction currents from the rails, and mitigate their electrocorrosive impact on structural elements, the replacement of conventional steel reinforcement with composite reinforcement has been proposed. An analysis of current flow paths through the sleepers and a review of conventional methods for investigating corrosion caused by stray currents were performed. Based on this analysis, a comprehensive experimental methodology was developed to comparatively evaluate the

*electrocorrosion behavior of concrete sleepers and other reinforced elements with steel and composite reinforcement. The methodology focuses on processes occurring in concrete and reinforcement under the influence of externally applied electrical potentials. The experimental program involves applying either direct electrical potential or pulsating unidirectional electrical potential to specimens – sleeper models and subsequently examining extracted specimens using a combination of techniques, including nanoindentation and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). Nanoindentation was employed to determine micromechanical properties of the cement paste, namely the elastic modulus ( $M$ ) and microhardness ( $H$ ), which are sensitive to the degree of electromigration-induced leaching. Experimental results showed that  $M$  and  $H$  decrease progressively from the surface exposed to the negative potential during the test. The highest values were retained in the core of the specimen, and their dependence on the distance from the negatively polarized surface was well approximated by power-law and polynomial functions. Baseline and maximum leaching values of  $M$  and  $H$  were established for cement paste with a water-to-cement ratio of 0.35, which is typical for sleeper concrete. It was further observed that the shape of the  $M$  and  $H$  profiles, and therefore the intensity of electrocorrosion processes in concrete, depends on both the type of applied electrical potential (constant or pulsating unidirectional) and the type of reinforcement (steel or composite).*

**Keywords:** reinforced concrete sleeper, composite reinforcement, cement paste, direct electrical potential, electrocorrosion, nanoindentation.

**Актуальність теми дослідження.** На залізницях світу основними типами підрейкових основ є залізобетонні та дерев'яні шпали. Залізобетонні шпали порівняно з дерев'яними не зазнають біопшкоджень і менше зношуються в підрейковому майданчику, отже мають більший ресурс (довговічність). Залізобетонні шпали більш надійно забезпечують стабільність колії через більшу масу та міцність утримання деталей рейкових скріплень, тому саме вони переважні для ділянок із більшою вантажонапруженістю і швидкістю руху, а також безстикової колії. Але в залізобетонних шпал є й низка недоліків. Через їхню більшу масу потрібні більш потужні засоби механізації та енергоресурсовитрати на укладання і утримання колії. Шпали електропровідні, що у вологу погоду, особливо в разі зносу деталей ізоляції та наявності мікротріщин у бетоні, призводить до збільшення втрат тягового струму на ділянках, електрифікованих як перемінним, так і постійним струмом. Впливає на шляхи протікання струмів і наявність випусків арматури на торцях шпал, обумовлених

технологією їх виготовлення. Постійні струми витоку обумовлюють електрокорозійні процеси в металевих деталях, арматурі та навіть бетоні шпал і розташованих на шляху струмів витоку металевих і залізобетонних конструкціях.

Раніше авторами запропоновано на ділянках залізниць, електрифікованих постійним струмом, укласти шпали з композитною арматурою, яку виготовляють із базальтових або скляних волокон, склеєних епоксидною смолою. Припущено і теоретично обґрунтовано, що заміна в бетонних шпалах сталеві арматури композитною підвищить їхній електричний опір; знизить струми витоку (зокрема втрати тягового струму); усуне корозійні процеси, пов'язані з протіканням електричного струму і впливом агресивних середовищ; дасть змогу пом'якшити вимоги щодо тріщиностійкості шпал і знизити зусилля попереднього напруження арматури. Проте фактична поведінка шпал із композитною арматурою в разі електричних впливів залишалася майже недослідженою експериментально. Тому порівняльні дослідження таких впливів на шпали зі сталеві та композитною арматурою є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що з впливом постійних струмів, зокрема струмів витоку з електрифікованих рейкових колій залізниць, металеві конструкції та арматура залізобетонних конструкцій [1, 2], зазнають електрокорозії [3, 4]. Електрокорозійні пошкодження спостерігають також у сталевібробетоні [5].

У роботі [1] та інших роботах автори доводять, що з впливом постійного або однопольового пульсуючого електричного

потенціалу утворюються струми витоку (рис. 1, а) і відбуваються процеси електрокорозії бетону, які полягають у багатократній інтенсифікації відомих видів корозії, залежних від процесів перенесення іонів – вилугування (рис. 1, б), внутрішньої корозії від лужно-кремнеземистої реакції (рис. 1, в) тощо. У роботі [6] доведено, що електричні потенціали прискорюють вилугування за рахунок перенесення іонів і призводять до утворення градієнтів властивостей бетону в конструкціях.

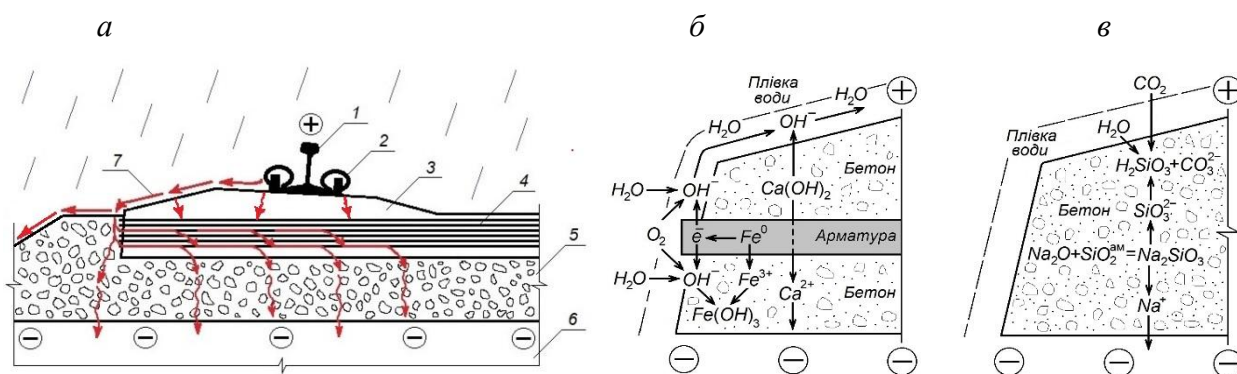


Рис. 1. Схема протікання струму витоку у вологу погоду [1]:

1 – через шпалу та баласт; б – через бетон і сталеву арматуру шпали; в – через бетон шпали з інтенсифікацією його корозії від ASR; 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт; 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм витоку

Для досліджень електрокорозійних процесів використовують різні теоретичні та експериментальні методи аж до методу скінченних елементів [7, 8]. Але за цими методами вивчають переважно електрокорозію арматури. У роботі [1] та інших роботах автори корозійний вплив електричного струму на бетон досліджували за допомогою визначення зміни щільності та міцності бетону, електричних вимірювань, рН-метрії, оптичної та електронної мікроскопії, рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії. Ці методи не завжди точні, але є незалежними і доповнюють один одного.

У роботі [9] встановлено кореляцію між відношенням Ca/Si і мікромеханічними

властивостями цементного каменю та запропоновано використовувати цю кореляцію для вивчення наслідків вилугування, для визначення мікромеханічних властивостей використано метод наноіндентування. У роботі [10] обґрунтовано застосування цього методу для дослідження наслідків електричних впливів на бетон. Вважаємо, що цей метод як незалежний добре доповнює відомі методи дослідження електрокорозійних процесів у бетоні та дає змогу підвищити достовірність результатів досліджень.

**Мета роботи** – встановлення і порівняння наслідків електричних впливів від струмів витоку та інших агресивних впливів на бетонні шпали зі сталевую

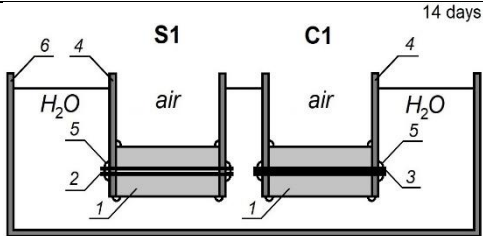
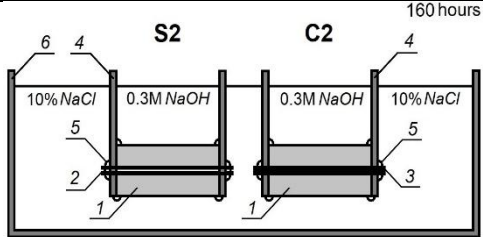
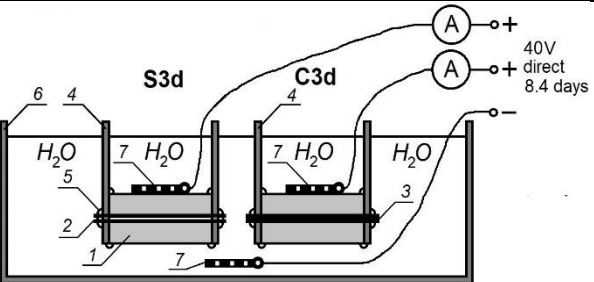
дротяною та композитною арматурою із застосуванням комплексу методів досліджень включно з наноіндентуванням.

**Завдання досліджень:** розробити методику порівняльного дослідження впливу постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів на шпали з бетону зі сталевую та композитною арматурою на моделях; дослідити нейтралізацію цементного каменю, визначити глибину проникнення хлоридів, дослідити корозію арматури, визначити зміну мікромеханічних властивостей цементного каменю в разі впливу електричних потенціалів у моделях; виконати електронно-мікроскопічні дослідження моделей.

**Основна частина дослідження**  
**Методи досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси.** Порівняльні дослідження електричних впливів від електричних потенціалів (струмів витoku) та інших агресивних впливів на бетонні шпали зі сталевую дротяною та композитною арматурою виконували комплексним дослідженням наслідків цих впливів на зразки, що моделювали такі шпали в умовах експлуатації (табл. 1). Електричні та інші агресивні впливи створювали за допомогою експериментальних установок, наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Агресивні впливи на шпали з бетону в електрифікованій колії, позначення та схеми експериментальних установок і зразків, що їх моделюють

| Номер впливу | Опис агресивного впливу                                                                                          | Позначення установки та зразка з арматурою                                           |               |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|              |                                                                                                                  | сталевую дротяною S                                                                  | композитною C |
| 1            | 2                                                                                                                | 3                                                                                    |               |
| 1            | Капілярне підняття води з обводненого баласту від підшви до верху шпали                                          |  |               |
| 2            | Дифузія хлорид-іонів (розчину солі, добрив, що просипаються на колію) у вологу погоду від підшви до верху шпали  |  |               |
| 3d           | Струм витoku від постійного електричного потенціалу на рейці +40 В у вологу погоду (рис. 1, а) протягом 8,4 доби |  |               |

Продовження табл. 1

| 1  | 2                                                                                                                               | 3 |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 4d | Електроміграційне перенесення хлорид-іонів за дії постійного електричного потенціалу на рейці +40 В (рис. 1, а) протягом 94 год |   |
| 3р | Струм витоку від ПОЕП +40 В у вологу погоду (рис. 1, а) протягом 14 діб                                                         |   |
| 4р | Електроміграційне перенесення хлорид-іонів від ПОЕП +40 В (рис. 1, а) протягом 160 год                                          |   |

**Примітки:** ПОЕП – постійний однонаправлений електричний потенціал (15 хв увімкнено, 10 хв вимкнено), що відповідає проходженню електрорухомого складу секцією електрифікованої колії; 160 год впливу ПОЕП за кількістю електрики відповідає 96 год безпосереднього електричного впливу; 1 – цементний камінь або розчин зразка; 2 – сталева дротяна арматура; 3 – композитна арматура; 4 – полівінілхлоридна труба; 5 – силіконовий герметик; 6 – поліетиленовий контейнер; 7 – сталевий накладний електрод.

**Зразки** виготовляли із цементного каменю з В/Ц = 0,35 (зразки S1, C1, S3, C3) і цементно-піщаного розчину 1:1, В/Ц = 0,35 (S2, C2, S4, C4) у вигляді циліндрів діаметром 100 мм і висотою 40 мм, поміщених у полівінілхлоридні труби внутрішнім діаметром і висотою 100 мм. У труби через просвердлені у стінках на висоті 20 мм отвори встановлювали сталеву дротяну арматуру 4Ø3 мм (S1, S2, S3) або композитну базальтово-епоксидну арматуру

Ø8 мм (C1, C2, C3) довжиною 130 мм (рис. 2, а) і заповнювали їх на висоту 40 мм цементним тістом/розчином з ущільненням на стандартному лабораторному вібротрамблері (рис. 2, б). Зразки піддавали тепловологісній обробці в лабораторній пропарювальній камері. Після твердіння контакти розчину і арматури з трубою герметизували силіконовим герметиком.



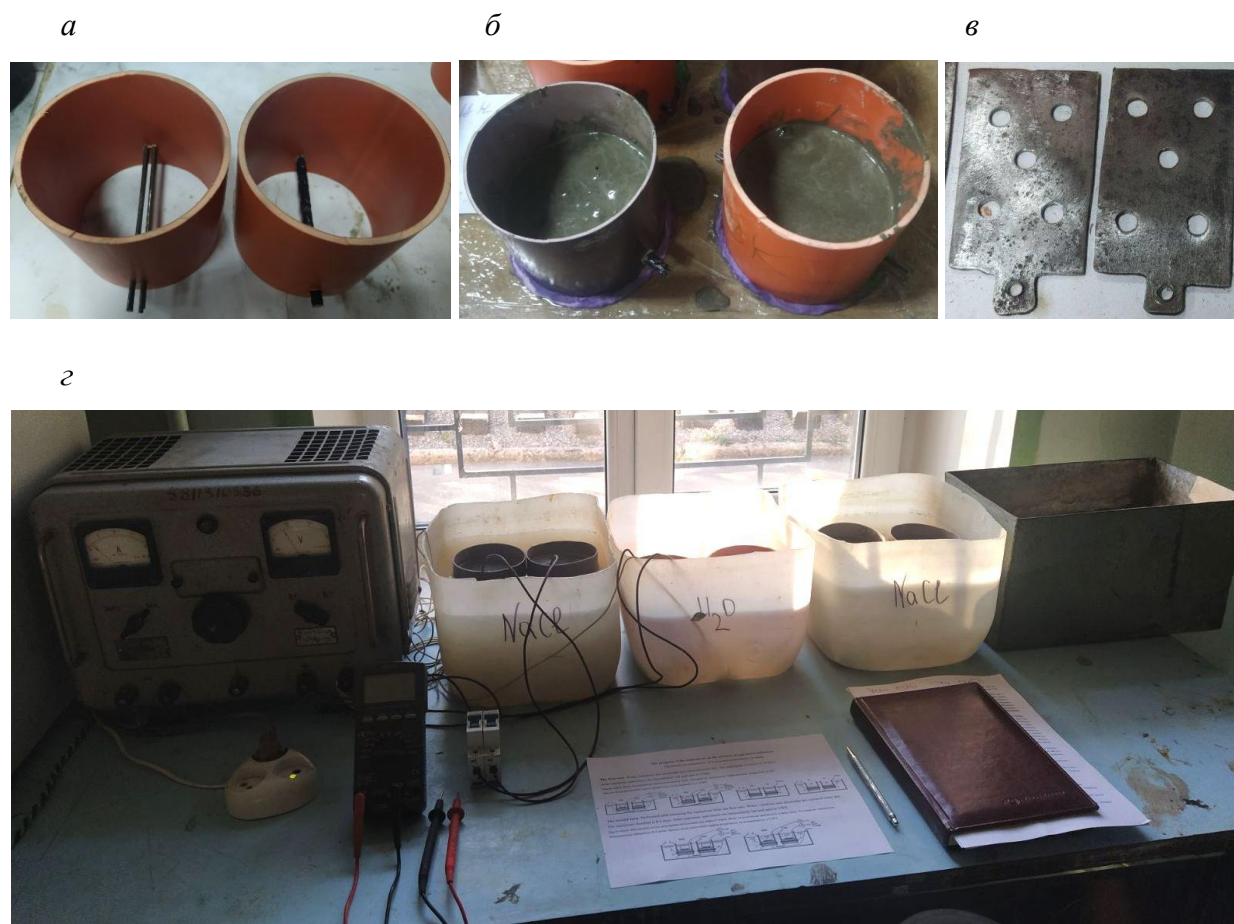


Рис. 2. Підготовка зразків і експериментальних установок зі створення електричних і корозійних впливів:

*а* – установлення арматури у форми; *б* – заповнення форм цементним тістом/розчином; *в* – сталеві накладні електроди; *г* – загальний вигляд установок

**Вплив електричних потенціалів** створювали за допомогою сталевих накладних електродів (рис. 2, *в*) і блока живлення постійного струму з програмованим вимикачем (рис. 2, *г*). Протягом електричного впливу вимірювали силу струму через зразки та електричний опір зразків за схемами, наведеними в табл. 1, за допомогою цифрового мультиметра Sanwa 1000 (рис. 2, *г*).

Для досліджень моделей після агресивних впливів їх розрізали на зразки-призми розміром  $40 \times 40 \times 20$  мм та інші за схемою, наведеною на рис. 3, *а*. Зразки,

експозиція яких відбувалася у воді – С1, S1, C3d, S3d, C3p, S3p, розрізали з водяним охолодженням. Зразки, експозиція яких відбувалась у розчинах  $\text{NaCl}$  і  $\text{NaOH}$  – С2, S2, C4d, S4d, C4p, S4p, для запобігання вимивання хлоридів розрізали насухо.

Як передбачувані наслідки цих впливів, визначали нейтралізацію цементного каменю та цементно-піщаного розчину, проникнення хлоридів, корозію арматури, зміну мікромеханічних властивостей і структури цементного каменю.

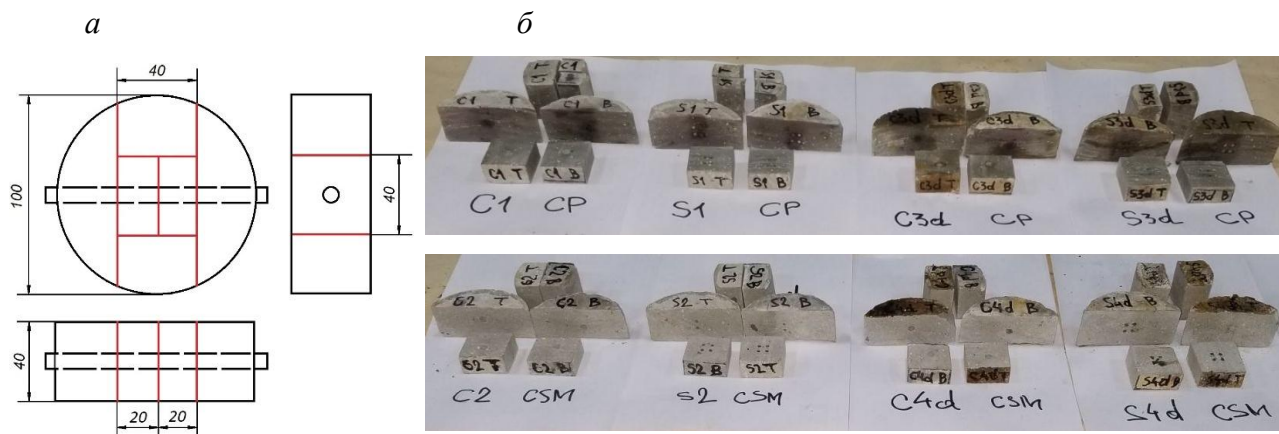
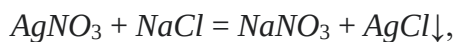


Рис. 3. Зразки для дослідження наслідків агресивних впливів:  
а – схема розрізання моделі на зразки; б – зовнішній вигляд зразків

**Нейтралізацію цементного каменю та цементно-піщаного розчину** визначали нанесенням на зрізи всіх моделей 1 % розчину фенолфталеїну в етанолі. Забарвлення поверхні зрізу в малиновий колір характеризувало збереження лужного середовища, незабарвлення – нейтралізацію цементного каменю внаслідок вилугування  $\text{CaOH}_2$ .

**Глибину проникнення хлоридів** визначали за допомогою розчину нітрату срібла. Хлориди, зокрема хлор-іони  $\text{Cl}^-$ , проникають у бетон (розчин) шляхом дифузії, а за наявності електричного потенціалу – електроміграційним шляхом. Для якісного визначення хлор-іонів застосовували нітрат срібла (азотнокисле срібло)  $\text{AgNO}_3$ , зокрема реакцію його взаємодії з хлоридами:



де  $\text{AgCl}$  – білий сироподібний осад.

Для визначення глибини проникнення хлоридів у цементний камінь або цементно-піщаний розчин на зріз наносили 1 % водний розчин нітрату срібла, вимірювали глибину проникнення хлоридів як товщину шару, на якому утворився світлий наліт, за

результатами декількох вимірювань розраховували середнє значення  $x_x$ . 1 % водний розчин  $\text{AgNO}_3$ : вода дистильована – 100 г (мл); нітрат срібла – 1 г.

**Корозію арматури** оцінювали оглядом випусків арматури та оптичною мікроскопією на відбиття контакту арматури з цементним каменем і розчином на зрізах зразків за допомогою світлового мікроскопа МБС-2 зі збільшенням 7,5–82,5.

**Зміну мікромеханічних властивостей** цементного каменю по висоті моделей, а також відміни міжфазної перехідної зони МПЗ між цементним каменем і арматурою в різних зразках визначали методом наноіндентування. Для цього з різних зон зразків алмазним диском вирізали фрагменти розміром  $20 \times 20 \times (10-20)$  мм, поміщували їх із вакуумним просочуванням у циліндр із епоксидної смоли з модулем пружності 3–4 ГПа. Після твердіння епоксидної смоли верхню грань зразків зрівнювали алмазним диском і полірували за допомогою алмазних абразивних складів на масляній і спиртовій основі для запобігання подальшій гідратації цементу та вимиванню гідратних фаз до розміру нерівностей 0,25 мкм. Готові зразки наведені на рис. 4.

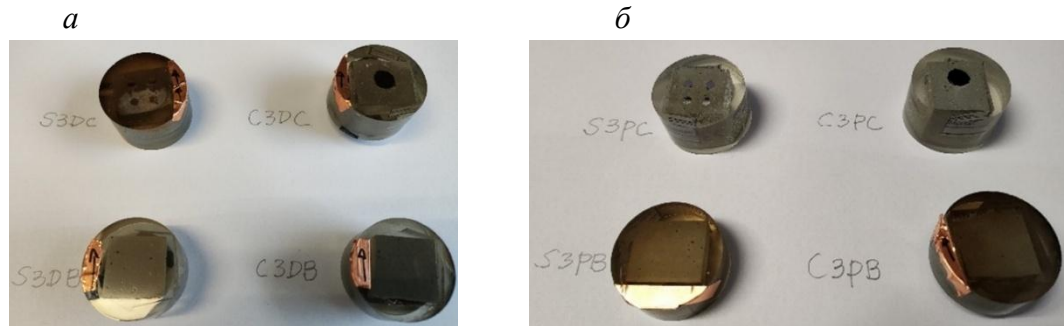


Рис. 4. Підготовлені для наноіндентування зразки зі сталевую та композитною арматурою після впливу у водному середовищі: *а* – постійного потенціалу; *б* – ПОЕП

Методом наноіндентування досліджено впливи, створені за схемами, і на зразки S3d, C3d, S3p, C3p. Наноіндентування здійснювали за допомогою приладу Agilent G200 Nano Indenter®, оснащеного алмазним наконечником індентора Berkovich. Прилад вдавлює індентор у поверхню досліджуваного матеріалу з безперервною реєстрацією сили і глибини вдавлювання. Після контакту індентора з поверхнею до нього прикладають зростаюче навантаження, що спричиняє проникнення його вістря в матеріал. Після досягнення попередньо визначеної величини максимального навантаження та короткого періоду його утримання навантаження знімають, а глибину проникнення зменшують завдяки пружному відновленню деформованого матеріалу. За величинами сили і глибини програмне забезпечення приладу визначає мікроемеханічні властивості – модуль пружності  $M$ , ГПа, і мікротвердість  $H$ , МПа.

Вимірювали в зонах, розташованих на різних відстанях  $h$  від його нижньої під час експозиції грані (табл. 1), а також у МПЗ. По висоті зразка досліджували тестові смужки шириною до 1000 мкм, висотою 30 мкм. У МПЗ досліджували області за сіткою з кроком близько 30 мкм за 30–40 вимірюваннями. Індентор занурювали на глибину до 2 мкм. Для кожної точки визначали середнє значення  $M$  і  $H$  в інтервалі глибини вдавлювання 0,3–1 мкм. Для тестових смужок поверхні цементного каменю розраховували середнє значення, середньоквадратичне

відхилення, коефіцієнт варіації. За результатами вимірювань будували графіки залежності  $M$  і  $H$  від відстані  $h$ . За характером цих графіків робили висновки про градієнти мікроемеханічних властивостей цементного каменю по висоті зразка, а отже, вплив електричного потенціалу на електрокорозійні процеси.

Електронно-мікроскопічні дослідження виконували тих самих зразків, які розрізали алмазним диском на менші об'ємом 1–2 см<sup>3</sup> так, щоб відкрити поперечні перерізи по вертикалі відносно орієнтації зразків в умовах електричного впливу, полірували алмазною суспензією різного розміру, що зменшувався до розміру 1 мкм, і покривали вуглецем. Дослідження проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа Hitachi Regulus 8230 у режимах візуалізації вторинних електронів і зворотного розсіювання електронів (SE і BSE). Елементний мікроаналіз проводили за допомогою системи Oxford Instruments Aztec EDS. Режим зйомки: прискорювальна напруга – 20 кВ, робоча відстань – 15 мм, отримання карти протягом 5–15 повторюваних кадрів і 600 с для лінійного сканування. Дані лінійного сканування були експортовані у формат CSV, що містить відстань і загальну кількість елементів Si та Ca. Відношення  $Ca/Si$  було розраховано як просте арифметичне співвідношення кількості детекторів і нанесено на графік залежності від відстані починаючи з низу зразка.



**Результати досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси.** Результати вимірювань сили

струму через зразки та електричного опору зразків впродовж експозиції наведено на рис. 5 і узагальнено в табл. 2.



Рис. 5. Зміна в часі впродовж впливу постійного та пульсуючого (у перерахунку на тривалість безпосереднього електричного впливу) електричного потенціалу: *а* – сили струму у зразках S3d, C3d, S4d, C4d; *б* – те саме у зразках S3p, C3p, S4p, C4p; *в* – електричного опору зразків S3d, C3d, S4d, C4d; *з* – те саме зразків S3p, C3p, S4p, C4p

Таблиця 2

## Показники корозійного ураження зразків після експозиції

| Середовище     | Показник                       | Показник корозійного ураження зразків з арматурою |                       |               |                                      |                       |       |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------------------------|-----------------------|-------|
|                |                                | сталевою дротяною                                 |                       |               | композитною                          |                       |       |
|                |                                | після експозиції зі впливом                       |                       |               |                                      |                       |       |
|                |                                | тільки середовища (без електричного)              | постійного потенціалу | ПОЕП          | тільки середовища (без електричного) | постійного потенціалу | ПОЕП  |
| у воді         | Зразок                         | S1                                                | S3d                   | S3p           | C1                                   | C3d                   | C3p   |
|                | Сила струму під час експозиції |                                                   |                       |               |                                      |                       |       |
|                | - на початку $I_0$ , А         |                                                   | 0,090                 | 0,057         |                                      | 0,101                 | 0,072 |
|                | - наприкінці $I_i$ , А         |                                                   | 0,042                 | 0,008         |                                      | 0,031                 | 0,011 |
|                | $(I_0-I_i)/I_0$ , %            |                                                   | 58,3                  | 86,0          |                                      | 69,3                  | 84,7  |
|                | Вилуговування (нейтралізація)  | немає                                             | немає                 | немає         | немає                                | немає                 | немає |
|                | Корозія арматури:              |                                                   |                       |               |                                      |                       |       |
|                | - кінців                       | немає                                             | значне руйнування     | немає         | немає                                | немає                 | немає |
|                | - посередині                   | немає                                             | немає                 | немає         | немає                                | немає                 | немає |
| у розчині NaCl | Зразок                         | S2                                                | S4d                   | S4p           | C2                                   | C4d                   | C4p   |
|                | Сила струму під час експозиції |                                                   |                       |               |                                      |                       |       |
|                | - на початку $I_0$ , А         |                                                   | 0,350                 | 0,126         |                                      | 0,481                 | 0,333 |
|                | - наприкінці $I_i$ , А         |                                                   | 0,035                 | 0,074         |                                      | 0,145                 | 0,216 |
|                | $(I_0-I_i)/I_0$ , %            |                                                   | 90,0                  | 41,3          |                                      | 69,9                  | 35,1  |
|                | Вилуговування (нейтралізація)  | немає                                             | немає                 | немає         | немає                                | немає                 | немає |
|                | Глибина проникнення хлоридів   |                                                   |                       |               |                                      |                       |       |
|                | - мм                           | 21,6                                              | 40                    | 40            | 16,2                                 | 40                    | 40    |
|                | - %                            | 54,1                                              | 100                   | 100           | 40,4                                 | 100                   | 100   |
|                | Корозія арматури:              |                                                   |                       |               |                                      |                       |       |
|                | - кінців                       | слабка поверх.                                    | повне розчин.         | повне розчин. | немає                                | немає                 | немає |
|                | - посередині                   | немає                                             | так                   | так           | немає                                | немає                 | немає |

Під час експозиції розчин NaOH зверху зразків S4d, C4d, S4p, C4p інтенсивно забарвлювався продуктами корозії електродів у непрозорий коричневий колір (рис. 6). Електроди впродовж експозиції розчинялись і один раз були замінені. Вода зверху зразків S3d, C3d, S3p, C3p також забарвлювалася, але набагато менш інтенсивно, електроди розчинялися, але також менш інтенсивно, і не були замінені.

Після експозиції зрізи всіх зразків забарвлювали розчином фенолфталеїну в малиновий колір (рис. 7), отже нейтралізації цементного каменю і цементно-піщаного розчину від будь-якого електричного впливу встановленої для дослідження тривалості на помітну глибину від поверхні не спостерігали.

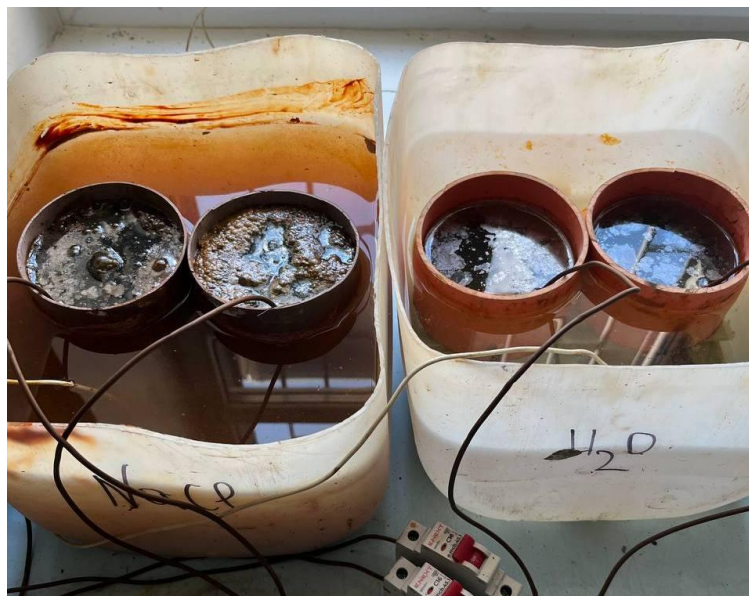


Рис. 6. Зразки C4p, S4p та C3p, S4p (зліва – направо) після восьми діб експозиції під впливом ПОЕП



Рис. 7. Поверхня зрізів зразків C3p після експозиції за агресивних і електричних впливів, оброблена розчином фенолфталеїну (таке саме забарвлення на всю товщину спостерігали на зрізах усіх зразків)

Результати визначення глибини проникнення хлоридів вибірково наведено на рис. 8 та узагальнено в табл. 2. Із рис. 8, а видно, що за рахунок тільки дифузії без електричного впливу у зразках S2 глибина проникнення хлоридів складає 14,8–27,7 мм (рис. 8, а), у середньому 21,6 мм, у зразках C2 – 13,1–19,5 мм (рис. 8, б), у середньому 16,2 мм. У зразках S4d, C4d, S4p, C4p за рахунок електроміграційного перенесення глибина проникнення хлоридів сягнула

40 мм, отже на всю товщину зразка (рис. 8, в).

Зовнішній вигляд розрізаних після експозиції зразків наведено на рис. 3, б і 9. Випуски сталевий дрітної арматури зразка S1 слідів корозії майже не мали (рис. 9, а), зразка S2 – зазнали незначної поверхневої корозії (рис. 9, в), зразка S3d – зазнали суттєвого корозійного руйнування (рис. 9, б), зразка S4d – зазнали повного корозійного розчинення (рис. 9, з).

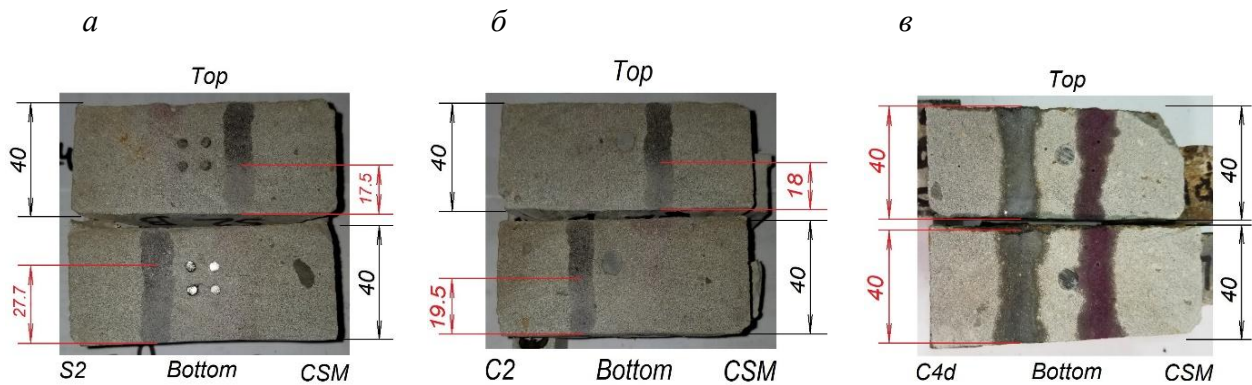


Рис. 8. Визначення за допомогою розчину нітрату срібла глибини проникнення хлоридів внаслідок експозиції в розчині  $\text{NaCl}$ : а – без електричного впливу у зразку S2 зі сталевую дрітвяною арматурою; б – те саме C2 із композитною арматурою (б); в – із впливом постійного електричного потенціалу у зразку C4d із композитною арматурою (у зразку S4d зі сталевую дрітвяною арматурою також спостерігали проникнення на всю товщину зразка)

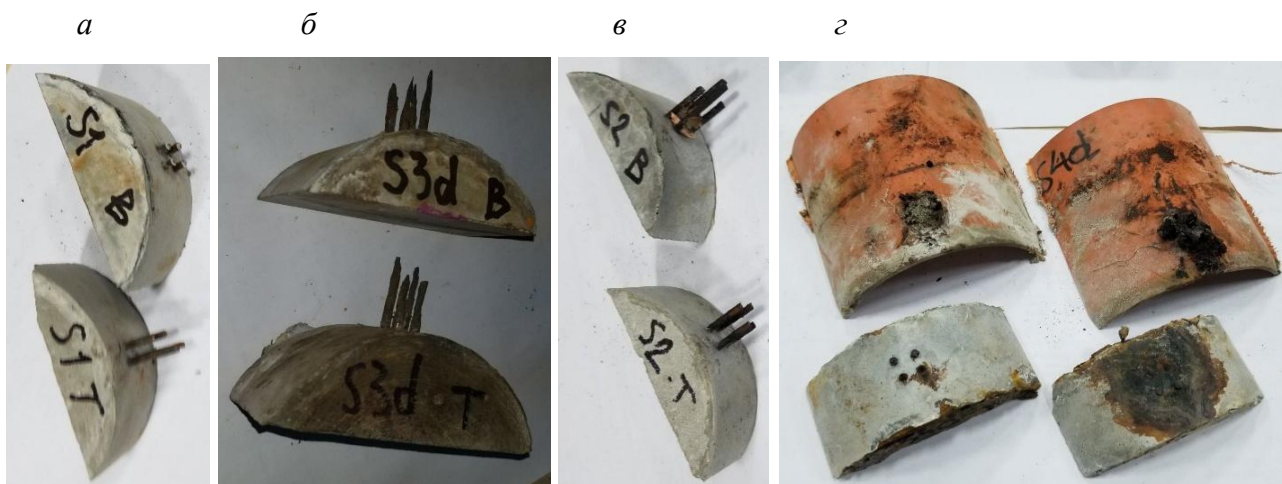


Рис. 9. Стан випусків сталеві дрітвяної арматури зі зразків після експозиції: а – у воді без електричного впливу S1 без слідів корозії; б – те саме з впливом постійного потенціалу S3d із суттєвим корозійним руйнуванням; в – у розчині  $\text{NaCl}$  без електричного впливу S2 із незначною поверхневою корозією; г – те саме з впливом постійного потенціалу з повним корозійним розчиненням

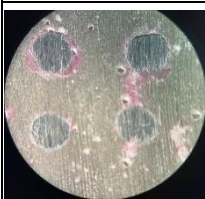
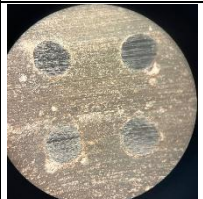
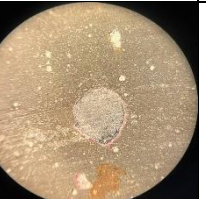
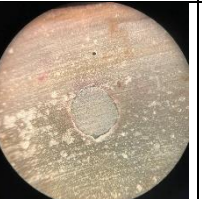
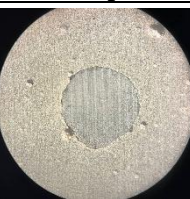
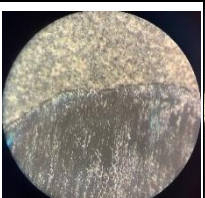
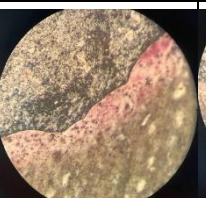
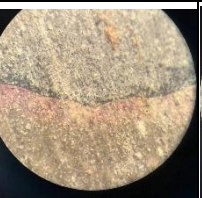
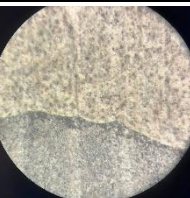
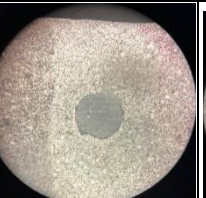
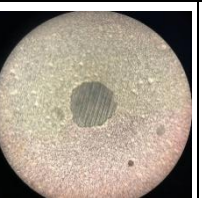
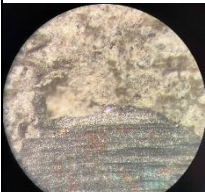
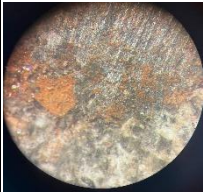
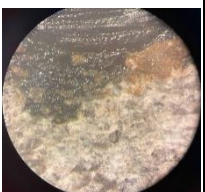
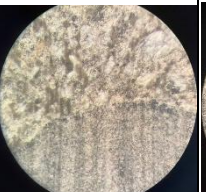
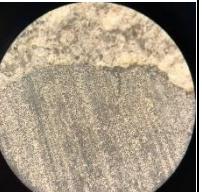
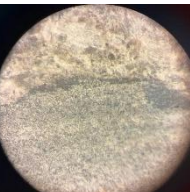
Мікроснімки зрізів зі збільшенням 7,5 і 82,5 наведені на рисунках у табл. 3. Корозії сталеві дрітвяної арматури всередині зразків S1, S2, S3d не спостерігали, у зрізах зразків S4d, S4p неозброєним оком

спостерігали ознаки корозії – винесені продукти корозії у вигляді коричневого ареолу, а у зразка S4d – ще й радіальні мікротріщини.



Таблиця 3

Мікроснімки зрізів зразків зі сталеву дрютяною та композитною арматурою  
після експозиції

| Середовище                | Мікроснімки зрізів зразків з арматурою                                              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                           | сталеву дротяною                                                                    |                                                                                     |                                                                                     | КОМПОЗИТНОЮ                                                                          |                                                                                       |                                                                                       |
|                           | після експозиції зі впливом                                                         |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|                           | тільки середовища (без електричного впливу)                                         | постійного потенціалу                                                               | ПОЕП                                                                                | тільки середовища (без електричного впливу)                                          | постійного потенціалу                                                                 | ПОЕП                                                                                  |
| Вода – вода               | S1                                                                                  | S3d                                                                                 | S3p                                                                                 | C1                                                                                   | C3d                                                                                   | C3p                                                                                   |
|                           |    |    |    |    |    |    |
|                           |   |   |   |   |   |   |
| Розчин NaOH – розчин NaOH | S2                                                                                  | S4d                                                                                 | S4p                                                                                 | C2                                                                                   | C4d                                                                                   | C4p                                                                                   |
|                           |  |  |  |  |  |  |
|                           |  |  |  |  |  |  |

Результати досліджень зразків із моделей, які зазнали електричних впливів, методом наноіндентування наведено на рис. 10, 11 та узагальнено в табл. 4 і на рис. 12. Зокрема, на рис. 10, 11 подано зображення оптичної мікроскопії деяких досліджених зон разом із відповідними їм картами мікроемеханічних властивостей – модуля пружності  $M$  і мікротвердості  $H$ , у

табл. 4 – граничні та середні величини мікроемеханічних властивостей структурних елементів усіх зразків. На рис. 12 наведено отримані залежності модуля пружності  $M$  і мікротвердості  $H$  цементного каменю від відстані  $h$  від нижньої грані зразка, до якої прикладали негативний полюс постійного потенціалу та ПОЕП.

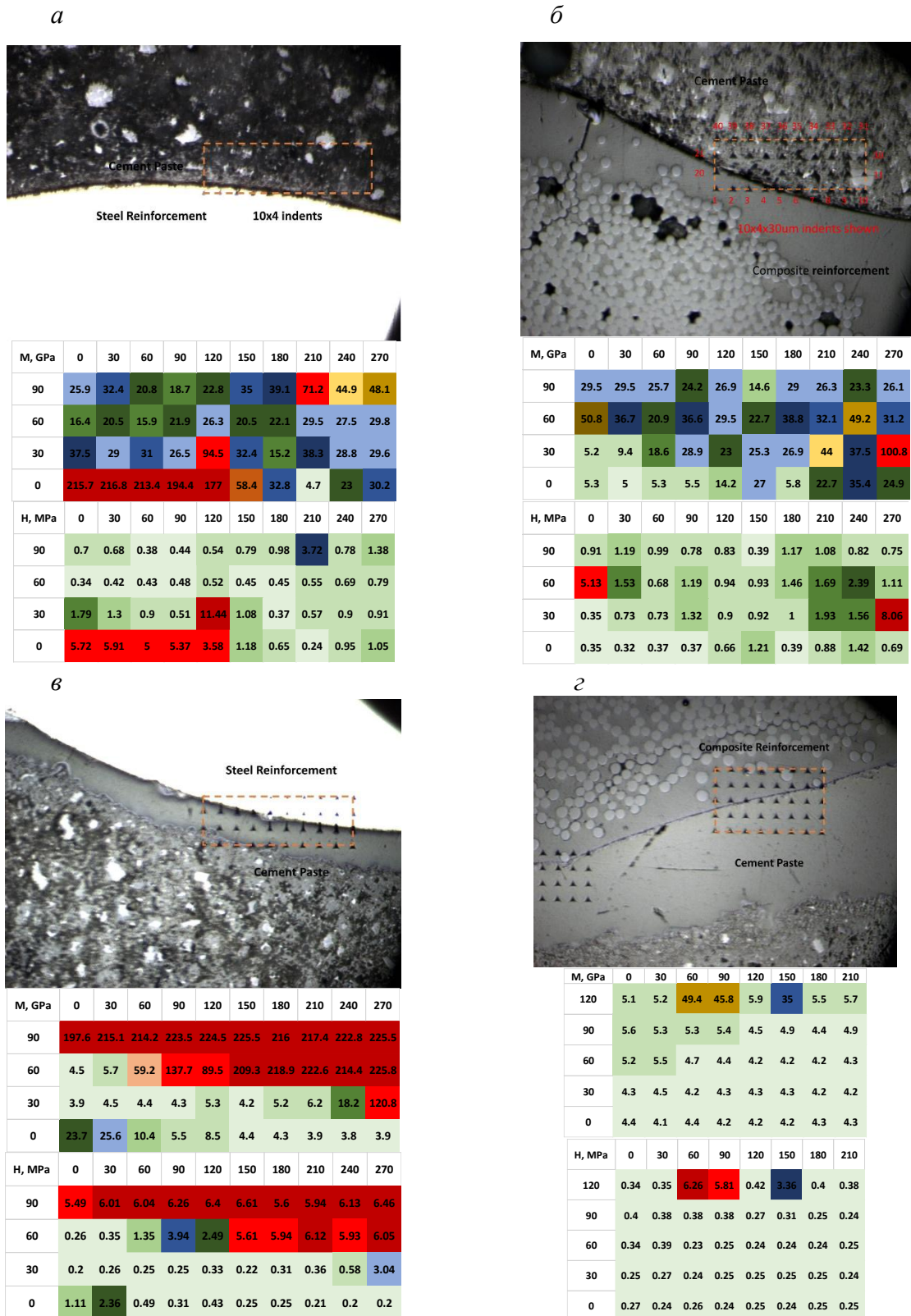


Рис. 10. Поверхні зрізів зразків і карти механічних властивостей після впливу постійного потенціалу у водному середовищі: *a* – МПЗ над сталеву дрітвяною арматурою; *б* – те саме композитною арматурою; *в* – МПЗ під сталеву дрітвяною арматурою; *г* – те саме композитною арматурою



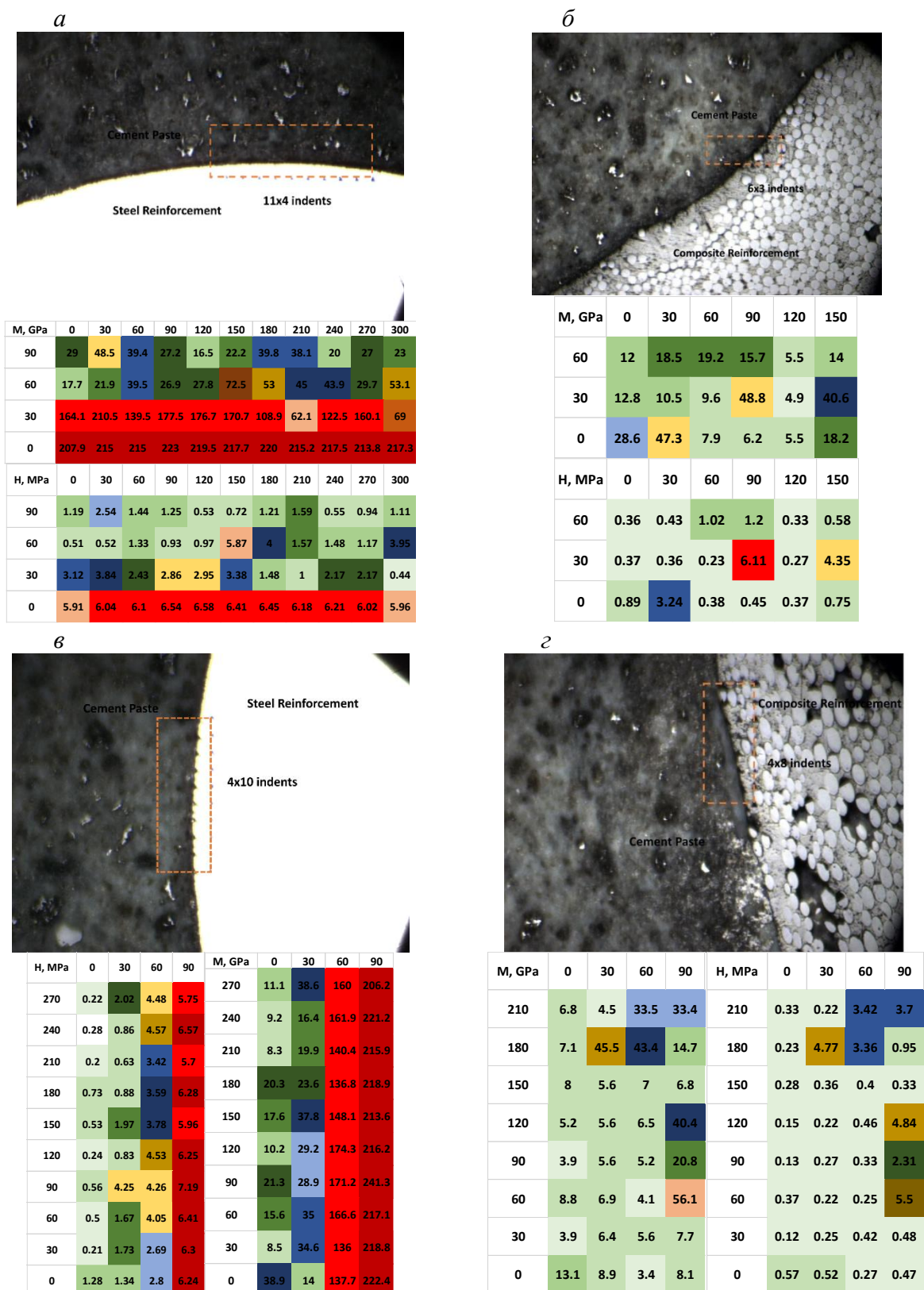


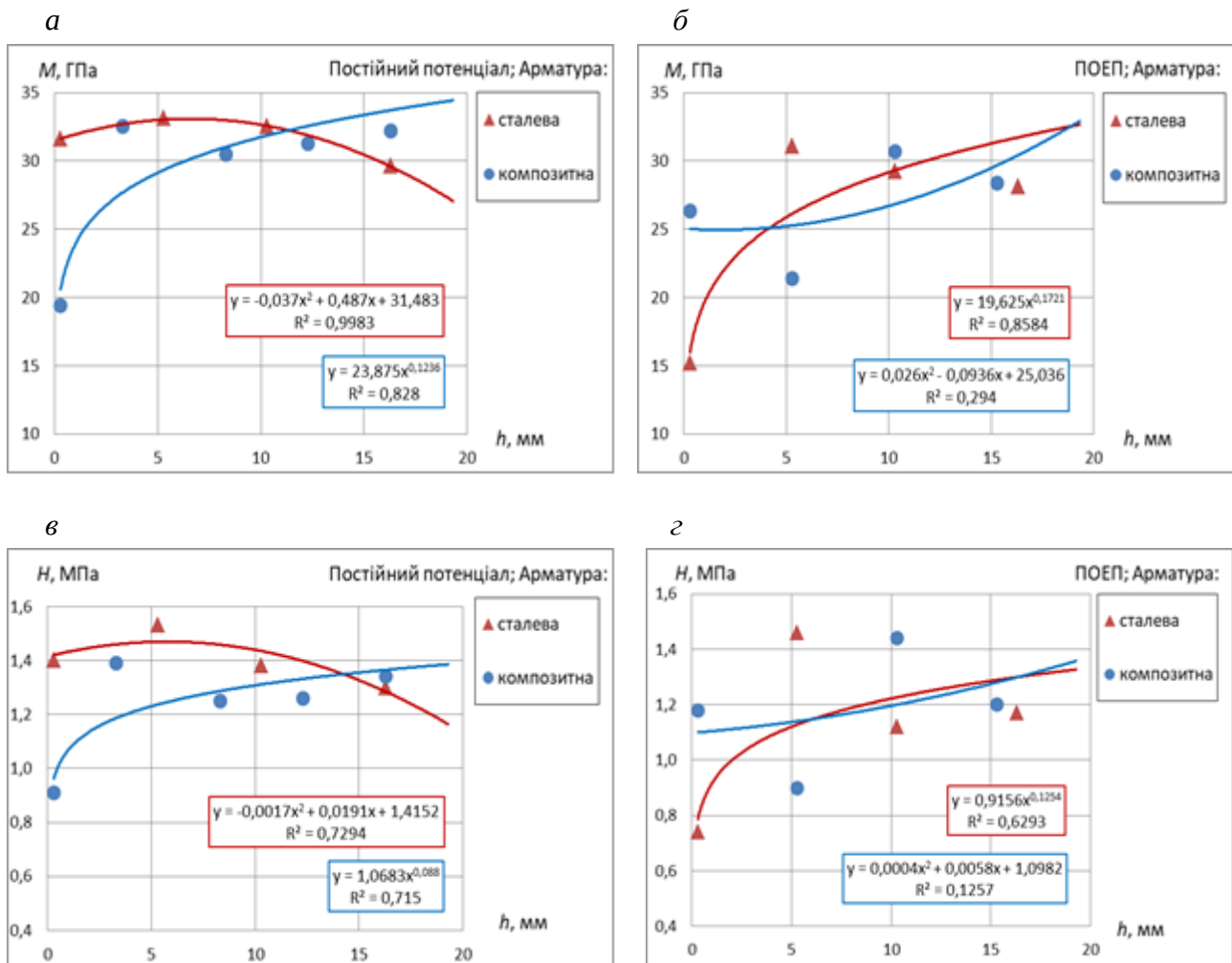
Рис. 11. Поверхні зрізів зразків і карти механічних властивостей після впливу ПОЕП у водному середовищі: *а* – МПЗ над сталеву дрітвяною арматурою; *б* – те саме композитною арматурою; *в* – МПЗ ліворуч від сталеву дрітвяною арматури; *г* – те саме композитної арматури

Таблиця 4

## Мікромеханічні властивості структурних елементів зразків

| Структурний елемент |                                 | Модуль пружності |      |      |        |      | Мікротвердість |      |      |        |      |
|---------------------|---------------------------------|------------------|------|------|--------|------|----------------|------|------|--------|------|
|                     |                                 | М, ГПа           |      |      | S, ГПа | V, % | H, МПа         |      |      | S, МПа | V, % |
|                     |                                 | min              | max  | сер  |        |      | min            | max  | сер  |        |      |
| Цементний камінь    | Зернисті продукти гідратації    | 3,9              | 94,5 | 21,5 | 9,7    | 49,9 | 0              | 11,4 | 1,02 | 1,0    | 98,4 |
|                     | Гомогенні продукти гідратації   | 3,8              | 8,9  | 5,1  | 1,0    | 18,9 | 0,20           | 0,49 | 0,29 | 0,1    | 21,9 |
|                     | Негідратовані частинки клінкеру |                  |      | 101  |        |      |                |      | 8,06 |        |      |
| Сталевий дріт       |                                 | 198              | 241  | 216  | 5,3    | 2,4  | 5,00           | 7,19 | 6,08 | 0,3    | 5,6  |
| Композитна арматура | Епоксидний полімер              | 4,1              | 7,6  | 5,5  | 0,7    | 12,6 | 0,22           | 0,46 | 0,35 | 0,1    | 17,7 |
|                     | Базальтова фібра                | 33,4             | 60,7 | 45,1 | 5,8    | 12,9 | 3,36           | 6,29 | 5,00 | 0,7    | 13,9 |

Примітки: S – середньоквадратичне відхилення; V – коефіцієнт варіації.

Рис. 12. Залежність від відстані  $h$  від нижньої грані (негативного потенціалу):

а – модуля пружності  $M$  цементного каменю після впливу постійного потенціалу; б – те саме після впливу ПОЕП; в – мікротвердості цементного каменю  $H$  після впливу постійного потенціалу; г – те саме ПОЕП



Результати електронно-мікроскопічних досліджень цементного каменю зразків зі сталевую дротяною та композитною арматурою, які зазнали електричних впливів постійного потенціалу та ПОЕП, наведені на рис. 13. Під електронно-мікроскопічними знімками наведено залежності відношення вмісту кальцію до вмісту кремнію  $Ca/Si$  від відстані від нижньої грані зразка, до якої прикладали негативний полюс потенціалу.

**Обговорення результатів досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси.** Із рис. 3 і табл. 2 видно, що сила струму протягом обох видів електричних впливів для всіх зразків зменшувалась, електричний опір зразків зростав. Унаслідок впливу постійного потенціалу сила струму зменшилася на 58–69 %, ПОЕП – 85–86 %. Це може бути обумовлене поляризацією колоїдних частинок продуктів гідратації цементу, збільшенням електричного опору внаслідок колюментації порового простору неелектропровідними продуктами корозії. Також це може свідчити про вилугування, яке призводить до зменшення концентрації іонів  $Ca^{2+}$  у поровому електроліті цементного каменю. Проте з рис. 7 видно, що лужне середовище після експозиції зберігається по всій висоті зразка, отже вилугування на збільшення електричного опору зразка в цілому не впливає.

Із рис. 8 і табл. 2 видно, що внаслідок тільки дифузії глибина проникнення хлоридів не перевищує 16–21 мм (40–54 % товщини зразка), тоді як під впливом як постійного потенціалу, так і ПОЕП проникнення внаслідок електроміграційного перенесення відбулося на всю товщину зразків 40 мм.

Із рис. 3, б і 9, табл. 2 видно, що сталева дротяна арматура зазнає корозії зі зростанням інтенсивності: без електричного впливу в середовищі, що містить хлориди, – у разі впливу постійного потенціалу, у водному середовищі – у разі впливу як постійного потенціалу, так і ПОЕП у середовищі, що містить хлориди. Композитна арматура не зазнала пошкоджень за будь-яких із цих умов.

Із рис. 10, 11 видно, що у зразках розрізняються основні структурні елементи (табл. 4) – цементний камінь і арматура. На зображеннях у цементному камені розрізняють дисперсні та гомогенні продукти гідратації цементу. Для цих структурних елементів розраховано середні значення  $M$  і  $H$ , їхні середньоквадратичні відхилення  $S$  і коефіцієнти варіації  $V$ . Дисперсні продукти гідратації за мікромеханічними властивостями дуже неоднорідні – їхній модуль пружності  $M$  коливається від 3,9 до 94,5 ГПа, середнє значення – 21,5 ГПа, коефіцієнт варіації 49,9 %. Гомогенні продукти гідратації спостерігають на границі розподілу з арматурою, вони утворилися, очевидно, у місцях утворення карманів води замішування під арматурою під час виготовлення моделей. Їхній модуль пружності  $M$  незначний, коливається від 3,8 до 8,9 ГПа, середнє значення – 5,1 ГПа, коефіцієнт варіації 18,9 %. У зерна клінкеру, яке проглядали очевидно,  $M$  склав 101 МПа. Сталевий дріт є однорідним, модуль пружності  $M$  від 198 до 241, у середньому 216 ГПа, коефіцієнт варіації 2,4 %. Композитна арматура складається з базальтових волокон із модулем пружності  $M$  від 33,4 до 60,7, у середньому 45,1 ГПа, коефіцієнт варіації 12,9 %, та епоксидної смоли з  $M$  від 4,1 до 4,6, у середньому 5,5 ГПа, коефіцієнт варіації 12,6 %.

Отже, навколо обох типів армування є міжфазні області з різними механічними властивостями. Наприклад, відносно слабкі та широкі МПЗ навколо сталеві арматури спостерігають на рис. 10, в, навколо композитної – на рис. 10, б, г, тоді як відносно міцні та вузькі МПЗ навколо сталеві арматури відмічаються на рис. 10, а, 11, а, в, навколо композитної – на рис. 11, б, г. Як і очікували, МПЗ на верхній частині арматури виявилися міцнішими порівняно з тими, що знаходяться під арматурою. Переважно це відбувається через те, що зайва вода замішування затримується під арматурою, що робить ділянку більш пористою. Саме ці ділянки МПЗ найбільш уразливі для корозійних процесів (мікрофотознімки зразків S4d, S4p у табл. 2).

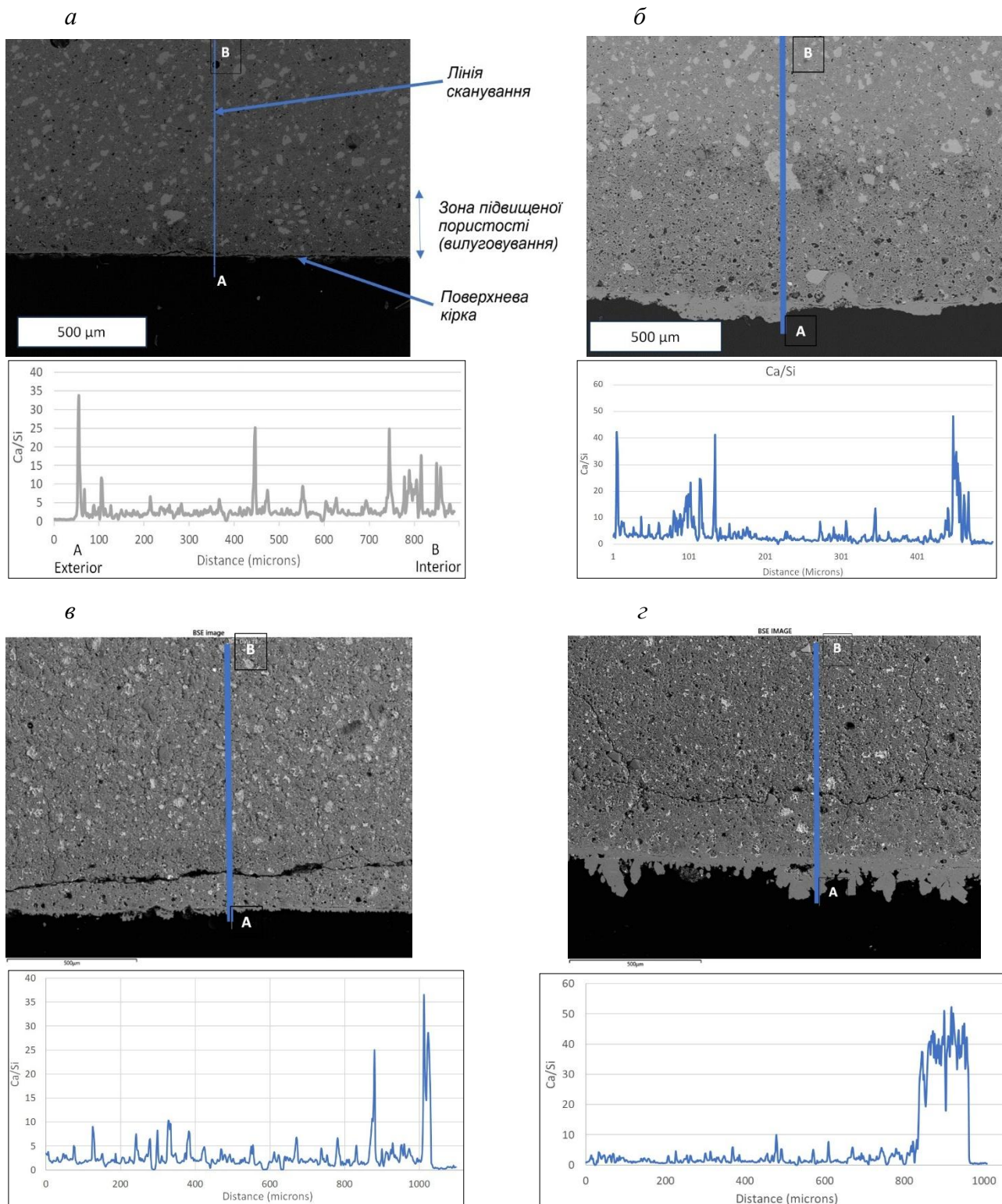


Рис. 13. Електронно-мікроскопічні знімки та розподіл відношення Ca/Si по висоті зразка:  
 а – S3d зі сталеву арматурою, що зазнав впливу постійного електричного потенціалу;  
 б – C3d із композитною арматурою, що зазнав впливу постійного потенціалу;  
 в – S3r зі сталеву арматурою, що зазнав впливу ПОЕП;  
 з – C3r із композитною арматурою, що зазнав впливу ПОЕП

Навколо композитної арматури спостерігають ділянки з товстим шаром полімеру (рис. 10, *г*, 11, *г*). Таке полімерне покриття може впливати на властивості МПЗ і погіршувати зчеплення цементного каменю з арматурою.

На рис. 12 наведено розподіл мікромеханічних властивостей цементного каменю (дисперсних продуктів гідратації) по висоті зразка – залежності  $M$  і  $H$  від відстані від його нижньої грані, яка була з боку негативного потенціалу. Як видно з рис. 12, більшість із них добре або задовільно апроксимована (із коефіцієнтами кореляції  $R$  від 0,55 до 1,0, одиничний випадок 0,35) поліномами другого ступеня або ступеневими рівняннями. Видно також, що розподіл мікромеханічних властивостей цементного каменю по висоті зразка для моделей зі сталевую дріткою і композитною арматурою, які зазнавали впливу постійного потенціалу (S3d, C3d) та ПОЕП (S3р, C3р) суттєво відрізняється. Для зразків C3d і S3р шар над нижньою гранню товщиною близько 0,3 мм має значно нижчі значення  $M$  і  $H$  порівняно з іншими тестовими смужками, на кілька міліметрів вище. Отже, впливи постійного та пульсуючого електричних потенціалів на зазначений шар цементного каменю моделі зі сталевую та композитною арматурою різні:

1) під впливом постійного потенціалу в зразку зі сталевую арматурою S3d зміна мікромеханічних властивостей по його висоті задовільно описана поліномами другого ступеня і є несуттєвою –  $M$  і  $H$  по всій висоті зразка складають близько 32 ГПа і 1,4 МПа відповідно;

2) під впливом постійного потенціалу в зразку з композитною арматурою C4d  $M$  по висоті зразка збільшується від 20 до 34 ГПа, а  $H$  – від 1 до 1,4 МПа, зміна добре описана ступеневими рівняннями з коефіцієнтами кореляції 0,85 і 0,91;

3) під впливом ПОЕП в зразку зі сталевую арматурою S3р  $M$  по висоті зразка збільшується від 15 до 32 ГПа, а  $H$  – від 0,8 до 1,3 МПа, зміна добре описана

ступеневими рівняннями з коефіцієнтом кореляції 0,79 і 0,93;

4) під впливом пульсуючого однонаправленого потенціалу в зразку з композитною арматурою C3р зміна мікромеханічних властивостей задовільно описана поліномами другого ступеня і є несуттєвою –  $M$  і  $H$  по всій висоті зразка складають близько 26 ГПа і 1,2 МПа відповідно.

Як видно із графіків рис. 12, електричні впливи призвели до утворення градієнтів мікромеханічних властивостей цементної пасти, обумовлених винесенням катіонів  $Ca^{2+}$  і розкладанням  $Ca(OH)_2$  і гідросилікатів кальцію. У глибині моделей, де вилуговування не спричинило відчутних наслідків, модуль пружності  $M$  складає 27–33 ГПа, а мікротвердість  $H$  – 1,2–1,4 МПа. Поблизу нижньої грані, де винесена максимальна кількість іонів  $Ca^{2+}$ ,  $M$  і  $H$  знижуються до 15–20 ГПа і 0,8–1 МПа відповідно.

Отже, під впливом постійного потенціалу в моделі зі сталевую арматурою електрокорозійні процеси в цементному камені майже не відбуваються, очевидно, через стікання струму через випуски арматури (рис. 1). У моделі з композитною арматурою, у якій стікання струму через арматуру не відбувається, він весь протікає через цементний камінь, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають.

Під впливом ПОЕП у зразку зі сталевую арматурою, незважаючи на стікання струму з випусків арматури, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають інтенсивно, очевидно, через процеси поляризації і деполяризації арматури і шару цементного каменю між арматурою і нижньою гранню. У моделі з композитною арматурою, навпаки, електрокорозійних процесів у цементному камені майже не спостерігають, можливо, через відсутність участі арматури в поляризації та вдвічі більшу товщину шару цементного каменю, який поляризований.

Скануюча електронна мікроскопія показала, що нижній шар цементного каменю всіх зразків товщиною до 1 мм значно більш пористий, ніж інші частини вище. Це є чіткими ознаками вилугування, хоча й помірного, судячи зі збереження лужної реакції фенолфталеїну, але прогресуючого. Для зразків S3d і C3r різниця в значеннях  $M$  і  $H$  на різній висоті від низу істотно не відрізнялася. Скануючою електронною мікроскопією виявлено кальцит у нижній частині зразків. Вважають, що кальцит утворюється внаслідок карбонізації кальцію, який вимивається з внутрішньої частини цементного тіста. Оскільки значення  $M$  і  $H$  кристалів кальциту значно вищі, ніж у фаз гідратованого цементного тіста, вони могли вплинути на результати  $M$  і  $H$  нижнього шару.

**Висновки.** Розроблено оригінальну методику порівняльного дослідження впливу постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів на шпали з бетону зі сталеву та композитною арматурою на моделях, що включає новий метод досліджень – наноіндентування, який дає змогу визначати мікромеханічні властивості цементного каменю – модуль пружності  $M$  та мікротвердість  $H$ , які залежать від ступеня її електроміграційного вилугування.

Експериментально встановлено, що сила струму протягом обох видів електричних впливів для всіх зразків зменшувалася, електричний опір – зростав. Це пояснено поляризацією колоїдних частинок продуктів гідратації цементу і збільшенням електричного опору внаслідок колюментації порового простору неелектропровідними продуктами корозії.

Електричні впливи протягом передбаченого методикою строку експозиції повну нейтралізацію цементного каменю по більшості глибини не спричинили.

Встановлено, що внаслідок тільки дифузії протягом передбаченої експозиції

глибина проникнення хлоридів не перевищує 16–21 мм, тоді як під впливом постійного потенціалу і ПОЕП проникнення внаслідок електроміграційного перенесення відбулося на всю товщину зразків.

Сталева дротяна арматура зазнала корозії в порядку зростання інтенсивності: без електричного впливу в середовищі, що містить хлориди, – у разі впливу постійного потенціалу, у водному середовищі – у разі впливу постійного потенціалу і ПОЕП у середовищі, що містить хлориди. Композитна арматура не зазнала пошкоджень за будь-яких із цих умов.

Методом наноіндентування встановлено, що під впливом постійного потенціалу у зразку зі сталеву арматурою електрокорозійні процеси в цементному камені майже не відбуваються через стікання струму через випуски арматури. У моделі з композитною арматурою, у якій стікання струму через арматуру не відбувається, він увесь протікає через цементний камінь, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають.

Під впливом ПОЕП у зразку зі сталеву арматурою, незважаючи на стікання струму з випусків арматури, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають інтенсивно через процеси поляризації і деполяризації арматури і шару цементного каменю між арматурою і нижньою гранню. У зразку з композитною арматурою, навпаки, електрокорозійних процесів у цементному камені майже не спостерігають через відсутність участі арматури в поляризації та вдвічі більшу товщину шару цементного каменю, який поляризований.

**Подяки.** Ці дослідження виконані в Українському державному університеті залізничного транспорту спільно з University of the West of Scotland у складі робочого пакета III Залізничні шпали дослідницького проєкту у рамках UUK і UK-Ukraine R&I twinning grant, Project #11150 «Integrated rail freight optimisation in



Ukraine: Railway sleepers, rolling stock and logistics» (ДРН 0123U102700, ДОН 0224U031548). Автори щиро дякують професору Дмитру Пługину (УкрДУЗТ) за допомогу у створенні експериментальних установок з електричних впливів на моделі

шпал в УкрДУЗТ, доктору Wenzhong Zhu за проведення досліджень методом наноіндентування і доктору John Hughes за проведення електронно-мікроскопічних досліджень в UWS.

### Список використаних джерел

1. Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій / А. А. Пługін, О. С. Борзяк, О. А. Пługін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2023. 204. 35-52. <http://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>.
2. Liu Y.-C., Chang E., Shyu, J., Chen X. Dynamic analysis of the leakage current corrosion for the non-grounded DC railway systems. *International Journal of Electrical Energy*. 2015. 3(4). 257-261. <https://doi.org/10.18178/IJOEE.3.4.257-261>.
3. Bertolini L., Carsana M., Pedferri P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 2007. 49. 1056–1068. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.048>.
4. Chen Z., Koleva D. Corrosion behavior of reinforcing steel undergoing stray current and anodic polarization. *Materials*. 2021. 14(2). 261. <https://doi.org/10.3390/Fma14020261>.
5. Tang K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017. 100. 445-456. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.004>.
6. Babaahmadi A., Tang L., Abbas Z., Zack T., Martensson P. Development of an electro-chemical accelerated ageing method for leaching of calcium from cementitious materials. *Materials and Structures*. 2016. 49:705–718. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0531-8>.
7. 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*. 2011. 35. 53-58. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2010.00656.x>.
8. Eichler T., Isecke B. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.
9. Howind T., Hughes J.J., Zhu W. Correlation of Ca/Si and micromechanical properties in leached grey and white cement pastes. *34<sup>th</sup> International Conference on Cement Microscopy, ICMA 2012*. [https://www.researchgate.net/publication/288709407\\_Correlation\\_of\\_CASI\\_and\\_micromechanical\\_properties\\_in\\_leached\\_grey\\_and\\_white\\_cement\\_pastes](https://www.researchgate.net/publication/288709407_Correlation_of_CASI_and_micromechanical_properties_in_leached_grey_and_white_cement_pastes).
10. Plugın A. A., Zhu W., Murygin M. A., Plugın D. A. and Murygina N. O. New research methods of electro-corrosion processes in concrete structures. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>.

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.

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.

Мусієнко Сергій Миколайович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Тел.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb\_86@ukr.net.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-1556-0830. Тел.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: redko@kart.edu.ua.

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.

Plugin Andrii, 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: aapugin@gmail.com.

Murygin Maksym, 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.

Musyenko Sergii, Postgraduate Student of the Department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Tel.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb\_86@ukr.net.

Redko Ihor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-1556-0830. Tel.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: redko@kart.edu.ua.

Gevorkyan Edvin, 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.

Статтю прийнято 20.09.2025 р.