

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БІОЛОГІЧНОЇ КОРОЗІЇ НА МІЦНІСТЬ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Валерій Макаренко¹, Віктор Хоружий², Володимир Любенко³,
Сергій Максимов⁴, Володимир Осадчий⁵, Ігор Недашковський⁶

^{1,2,3} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

⁴ Інститут електрозварювання ім.Є.О.Патона НАНУ
11, вул. Казимира Малевича, м. Київ, Україна, 03150

^{5,6} Одеська державна академія будівництва та архітектури
4, вул. Дідріхсона, м. Одеса, Україна, 65029

¹ докт. техн. наук, професор, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9178-9657

² докт. техн. наук, професор, khoruzhyi.vp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-5314-0483

³ liubenko.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-7492-1166

⁴ докт. техн. наук, професор, knuba_stf@ukr.net, orcid.org/0000-0002-5788-0753

⁵ канд. техн. наук, vig@ogasa.org.ua, orcid.org/0000-0001-8153-8635

⁶ канд. техн. наук, pk-ogasa@ukr.net, orcid.org/0000-0002-9494-6694

DOI: 10.32347/2524-0021.2021.36.27-38

Анотація. Біокорозія спричиняється життєдіяльністю різних мікроорганізмів, які використовують метали як поживне середовище чи виділяють продукти, що руйнують металеві конструкції. Найбільш небезпечними є анаеробні (розвиток відбувається у відсутності кисню) сульфат-редуючі бактерії, які присутні в мулистих і болотних ґрунтах. Бактерії відновлюють іони сульфатів в іони сульфідів, прискорюючи корозію металу. Життєдіяльність аеробних бактерій протікає тільки при наявності кисню. Бактерії окиснюють сірку до сірчаної кислоти, концентрація якої в окремих місцях може досягати 10%. Залізо-бактерії поглинають залізо в іонному вигляді і виділяють його у вигляді нерозчинених сполук. Оскільки нерозчинені продукти розподіляються по поверхні металу нерівномірно, виникає електрохімічна гетерогеність поверхні, що прискорює корозію. Мікроорганізми, які заселяють поверхню металу, можуть спричинити не тільки корозію. Вони також можуть підвищувати концентрацію сірководню в середовищі, збільшуючи кількість відкладень на сталевих гідротехнічних конструкціях.

Найбільшу небезпеку з точки зору корозії представляють сульфат відновлювальні бактерії (СВБ), які широко розповсюджені в гідротехнічних середовищах. Сульфат відновлювальні бактерії відносяться до класу анаеробних бактерій, життєдіяльність яких може протікати за відсутності кисню. Аеробні бактерії, такі як залізобактерії (ЗБ) і сіркобактерії чи тіонові (ТБ), які присутні в ґрунтових водах наряду з СВБ, навпроти, життєздатні тільки в присутності кисню. Анаеробні і аеробні бактерії мають спільне середовище існування, і тому часто розвиток одного виду створює сприятливі умови для інших.

Ключові слова: біологічна корозія, міцність сталевих конструкцій, сульфат відновлювальні бактерії.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ

Перш за все слід звернути увагу на економічну сторону цієї проблеми. Так, економічні втрати (прямі і побічні) від корозії металу в промисловості розвинутих країнах рівняються вкладенням в розвиток крупних галузей промисловості. Під прямими втратами розуміють вартість заміни (з урахуванням трудовитрат) прокородуваних конструкцій і машин чи їх частин, витрати на оздоблювальні операції (перекраску конструкцій) тощо. Прикладами побічних втрат слугують простої устаткування при заміні прокородуваних частин, втрати готової продукції в міжремонтний період, втрати потужності, коли з-за відкладень продуктів корозії погіршується зносостійкість поверхонь металовиробів і т. п., забруднення продукції в результаті корозії. Підрахунок побічних втрат представляє собою важку задачу навіть в рамках однієї галузі, але, безумовно, вони складають істотну частину від загальних корозійних втрат. В сумі побічні і прямі збитки від корозії металів і витрати на захист (в співвідношенні приблизно 3,5-4:5) в промислових розвинутих країнах досягають 3...5% національного прибутку [1-7]; по іншим повідомленням річні витрати на боротьбу з корозією в розвинутих країнах складають від 2 до 4% (в середньому 3,5%) від валового національного продукту.

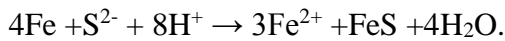
Як свідчать літературні джерела [15-22], в Угорщині збитки, які наносить народному господарству корозія, в кінці 1980-х рр. перевищили 20 млрд. форинтів на рік; до цього ще потрібно додати приблизно таку ж суму, яка щорічно витрачалася на боротьбу з корозією [12-17]. Економічні збитки від корозії в Німеччині в кінці XX ст. оцінювалися в мільярди марок в рік [12]. В СРСР прямі і побічні втрати від корозії оцінювалися в кінці 1970-х рр. в 40 млрд. руб. [14-17]. В сучасній Україні економічні збитки від безповоротних втрат металу, який не повертається для повторного використання в

результаті корозії, оцінюються від 2 до 7 млрд. грн. на рік. Корозійні відмови виявляються головним фактором, що знижує надійність метало-бетонних гідротехнічних споруджень та інженерних конструкцій. Корозійні руйнування металу виявляються причиною приблизно 30% відмов на спорудах ГЕС України [10,11].

В гідротехнічному будівництві часто використовують сталевий тавровий, двотавровий, трубний і листовий прокат, зокрема, при облаштуванні підпірних стінок автодорожнього переїзду спорудами ГЕС. В Україні їх частка складає близько 90 % [15] і в найближчій перспективі ця цифра помітно не зміниться, оскільки через збільшення терміну експлуатації споруд різко зростає зношеність сталевих конструкцій та корозійні руйнування, зокрема, арматури в залізобетонних конструкціях. Тому лише податливі сталеві конструкції можуть забезпечити в більшості випадків задовільний експлуатаційний стан гідротехнічних інженерних споруд. Майже унікальна здатність цих споруджень адаптуватися до зміни навантажень і в зв'язку з цим силових факторів, не руйнуючись, дозволяє розглядати їх як найбільш безпечні.

Суттєво знижує ефективність використання металу для різних гідротехнічних конструкцій його корозійна здатність. При цьому при корозії знижується несуча здатність як самого профілю окремих елементів, так і конструкції в цілому. Слід відмітити, що при цьому вельми негативну роль відіграє біологічна корозія металу основних несучих та огорожувальних конструкцій.

Біокорозія спричиняється життєдіяльністю різних мікроорганізмів, які використовують метали як поживне середовище чи виділяють продукти, що руйнують металеві конструкції. Найбільш небезпечними є анаеробні (розвиток відбувається у відсутності кисню) сульфат-редуючі бактерії, які присутні в мулистих і болотних ґрунтах. Бактерії відновлюють іони сульфатів в іони сульфідів, прискорюючи корозію металу:



Життєдіяльність аеробних бактерій протікає тільки при наявності кисню. Бактерії окиснюють сірку до сірчаної кислоти, концентрація якої в окремих місцях може досягати 10%. Залізобактерії поглинають залізо в іонному вигляді і виділяють його у вигляді нерозчинених сполук при $\text{pH} = 4 \dots 10$. Оскільки нерозчинені продукти розподіляються по поверхні металу нерівномірно, виникає електрохімічна гетерогенність поверхні, що прискорює корозію.

Для біокорозії характерні наступні особливості:

- вона може протікати там, де неможна чекати суттєвих корозійних ушкоджень;

- вона характеризується дуже високою швидкістю;

- до цих пір не ідентифіковані всі мікроорганізми, здатні спричинити біокорозію.

Способи боротьби з біокорозією велими різноманітні і відрізняються від способів боротьби з іншими видами корозійних уражень введенням в середовище бактерицидів і створенням на поверхні металу плівок, що перешкоджають прилипанню бактерій до поверхні металу.

Мікроорганізми, які заселяють поверхню металу, можуть спричинити не тільки корозію. Вони також можуть підвищувати концентрацію сірководню в середовищі, збільшуючи кількість відкладень на сталевих гідротехнічних конструкціях.

Як вже відмічалось, найбільшу небезпеку з точки зору корозії представляють сульфат відновлювальні бактерії (СВБ), які широко розповсюджені в гідротехнічних середовищах. Сульфат відновлювальні бактерії відносяться до класу анаеробних бактерій, життєдіяльність яких може протікати за відсутності кисню. Аеробні бактерії, такі як залізобактерії (ЗБ) і сіркобактерії чи тіонові (ТБ), які присутні в ґрунтових водах наряду з СВБ,

напроти, життєздатні тільки в присутності кисню. Анаеробні і аеробні бактерії мають спільне середовище існування, і тому часто розвиток одного виду створює сприятливі умови для інших (рис.1).

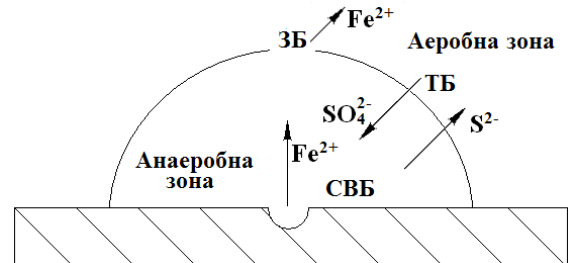
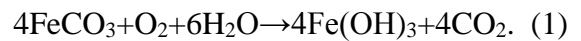


Рис. 1. Схема взаємодії адгезованих на металі мікроорганізмів

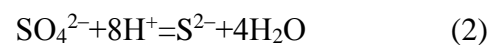
Fig. 1. Scheme of interaction of adhesion on metal microorganisms

В результаті анодного процесу при корозії залізовуглецевих сплавів виділяються іони Fe^{2+} , які в присутності кисню переробляються ЗБ згідно реакції:



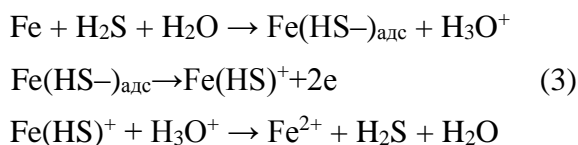
Процес супроводжується вивільненням енергії, яку ЗБ використовують на засвоєння вуглецю з вуглекислого газу і карбонатів, а виділення важкорозчинного гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$ призводить до утворення на металевій поверхні плівок, під якими виникають замкнуті анаеробні зони, де починають розмножуватися СВБ.

Сульфатвідновлювальні бактерії присутні фактично у всіх гідротехнічних водних середовищах, але помітний вплив на корозійний процес здійснюють тоді, коли наявна відносно велика їх кількість. Найбільш сприятливими умовами для розвитку СВБ виявляються середовища з $\text{pH} = 5 \dots 9$ (оптимальне $6 \dots 7,5$) при температурі $25 \dots 30^\circ\text{C}$, відсутність кисню і достатня кількість сульфат-іонів, які слугують поживною базою для СВБ і в результаті засвоєння бактеріями відновлюються до сульфід-іонів:

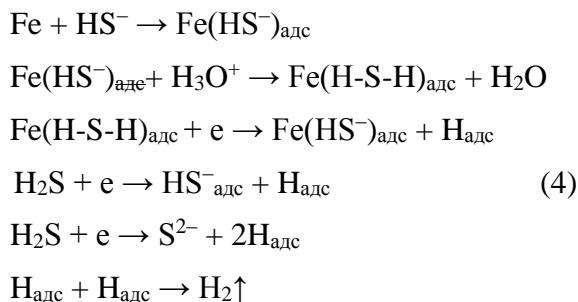


Виділені в результаті життєдіяльності СВБ сульфід-іони прискорюють одночасно і анодний, і катодний процеси:

анодна реакція:



катодна реакція:



Внаслідок цієї прискорювальної дії сульфід-іонів швидкість корозійного руйнування сталевих конструкцій в присутності СВБ може зростати в 20 раз [22].

На руйнування металів здійснюють вплив і аеробні сіркобактерії. Тіонові бактерії – це вельми поширена група прокариот (організми без ядра клітин), які окиснюють відновлені сполуки сірки. Наприклад, види, які знаходяться в ґрунтах, в процесі життєдіяльності окиснюють сірководень в сірку, а потім в сірчану кислоту:



Основний кінцевий продукт окиснення сполук сірки – сульфати, які, в свою чергу, є поживною базою для СВБ. Таким чином, слід відмітити певну взаємодію різних видів бактерій, яка приводить до збільшення корозійних ушкоджень. Причому вплив біологічного фактору на корозійний процес підземних сталевих гідротехнічних конструкцій може проявлятися як у вигляді безпосереднього впливу на сталеві конструкції продуктів, вироблених мікроорганізмами, так і у вигляді утворень на кородованій сталевій поверхні покритій ізольованими плівками (див рис.2). Це не лише сприяє розвитку колоній анаеробних бактерій, але й призводить до виникнення корозійних елементів, в тому числі і диференційованої аерації. Про наявність СВБ свідчать корозійні виразки на поверхні металу, заповнені об'ємними продуктами корозії, які іноді виражені у вигляді концентричних кілець [16]. На поверхні металу з'являються продукти корозії у вигляді темної кірки і рихлих бугорків, які складаються із сульфідів, карбонатів і гідратів, закису й окису заліза та включають в себе численні колонії СВБ (рис.3).



Рис. 2. Підплівочна корозія поверхні сталевій опорній конструкції (а) та мікробіологічна корозія поверхні спіральної камери ГЕС (б)

Fig. 2. Undepellicle surface corrosion of the steel supporting structure (a) and the surface microbiological corrosion of the spiral chamber of the HPP (b)

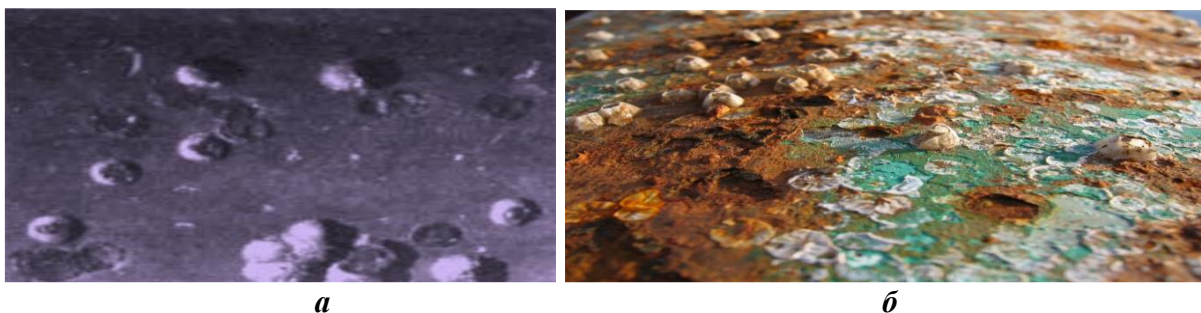
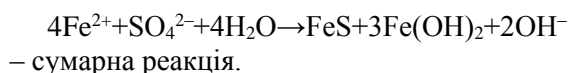
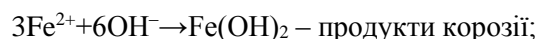
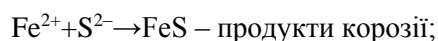
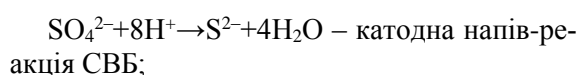
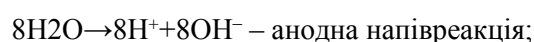


Рис. 3. Корозійні виразки на сталевих гідротехнічних конструкціях від дії бактерій ГТВ (*a*) та бактерій СВБ (*б*)

Fig. 3. Corrosive ulcers on steel hydraulic structures from the action of bacteria НТВ (*a*) and Bacteria SRB (*б*)

Процес підкислення середовища під продуктами корозії в корозійних виразках може доходити до значень рН 2,0...0,5. Дуже часто вони утворюють симбіоз з денітрифікуючими і вуглеводеньокиснювальними бактеріями, які продукують поживні речовини і створюють необхідні для них анаеробні умови, хоча часто вони самі є їжею для СВБ. Кінцевими продуктами анаеробного дихання СВБ є сірководень. Особливо інтенсивно СВБ поширюються в зонах гідротехнічних споруд, де створюються сприятливі умови для формування біоценозу багатьох мікроорганізмів. Основні стадії корозійного процесу, які відбуваються внаслідок життєдіяльності СВБ, можуть бути представлені наступними реакціями [4-6]:



Сульфід заліза, утворений в результаті метаболізму СВБ, може в подальшому сприяти посиленню корозійних процесів.

В табл.1 наведені характеристики безпосередньо технічних вод басейну Київського водосховища “Київська ГЕС”. При цьому виявлена наявність бактерій: СВБ ($1,0 \cdot 10^2 \dots 2,0 \cdot 10^6$) і ГТВ ($6,2 \cdot 10^6 \dots 1,5 \cdot 10^9$) [кл/мл].

Табл. 1. Корозійні характеристики вод в басейні Київської ГЕС

Table 1. Corrosion characteristics of water in the basin of Kyiv HPP

рН	Загальна мінералізація, г/л	Хімічний склад, мгдм ³ /екв				Агресивність на SO ₄ ²⁻ +Cl ⁻
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	
6,8	1,5	460	321	75	123	< 3 г/л

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Зразки для експериментальних випробувань на втомлену міцність показаний на рис.4. Всі зразки виготовляли із сталі

стінок мостових сталевих двотаврових балок та підпірних стінок кріплень земляної насипі тривалого терміну експлуатації безпосередньо на об'єктах гідроелектростанцій.

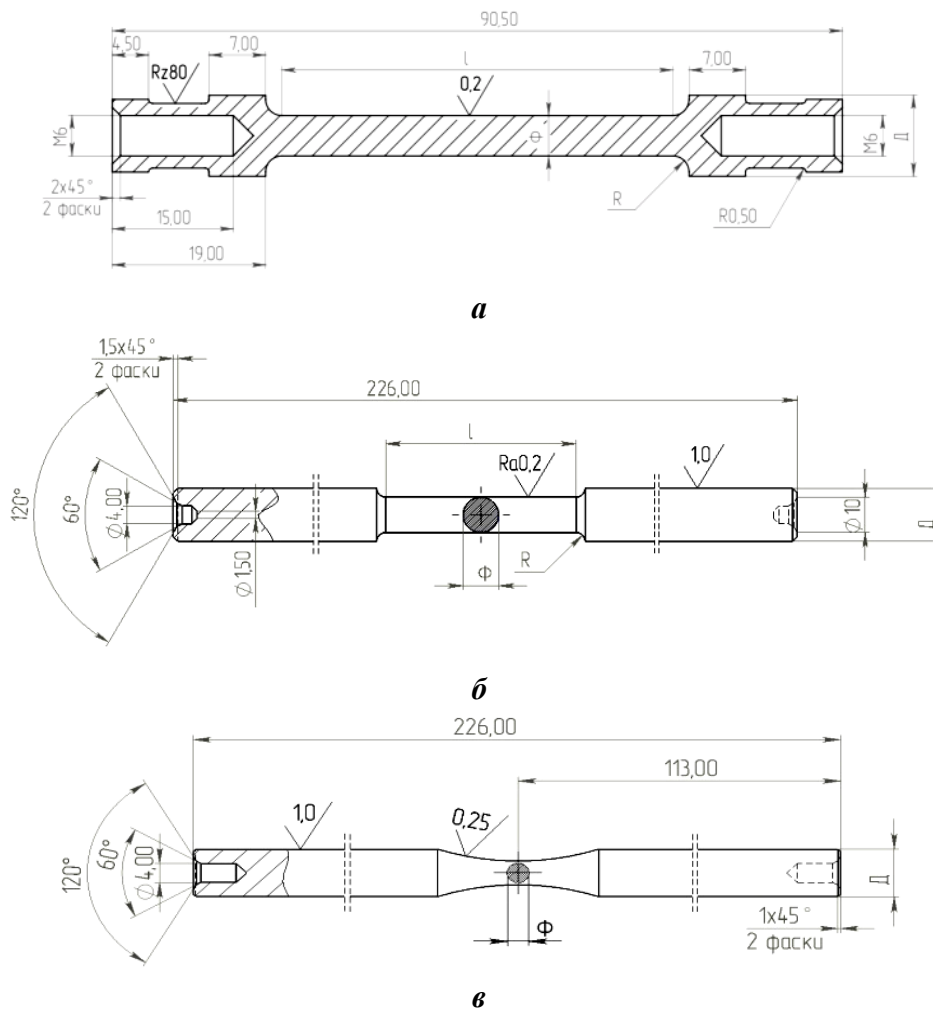


Рис. 4. Зразки для випробувань на втомну (тривалу) міцність:
а – зразок для випробувань на кручення; **б** – зразок для випробувань при осьовому навантаженні; **в** – зразок для випробувань на згин при обертанні

Fig. 4. Samples for tests on weariness (long-term) strength:
a – sample for torsion tests; **b** – sample for tests with an axial load;
v – sample for tests for bend when rotated

Для проведення досліджень використовували сталь вуглецеву марки 08Г2С з 0,07...9,09% С і наступними характеристиками:

- $\sigma_B = 470...590$ МПа $\sigma_{0,2} = 315$ МПа ($\sigma_{0,2}^{\min} = 235$ МПа);
- для температур навколишнього середовища $-20...-40^\circ\text{C}$.

Вуглецевий еквівалент $CE = 0,21...0,32$; KCV = 28 Дж (еквівалентний сталі FISI 1035). Після нормалізації з нагрівом до 860°C і витримки на протязі 30 хв. із таких сталей виготовляли зразки, показані на рис.4. Зразки полірували

шліфувальною шкуркою зернистістю 3/0, а потім піддавали відпуску у вакуумній камері при 620°C на протязі 30 хв. для зняття залишкових напружень.

Експериментальні випробування на корозійну втомленість (тривалу міцність) проводили при навантаженні згином. Зразки випробували на уставці моделі "Інстрон" (Великобританія), Випробування проводили на згин з нульовим середнім напруженням і частотою циклів 20 Гц. Випробування були проведені в розчинах солі з концентраціями від 0,5% до 10%. Для порівняння результатів іноді випробування проводили на повітрі.

Бактерії виду гетеротрофних бактерій (ГТБ) вводили у воду в наступних кількостях (в кл/мл): $6,2 \cdot 10^6$; $2,2 \cdot 10^7$; $3,1 \cdot 10^8$; $2,5 \cdot 10^8$; $1,5 \cdot 10^9$; а бактерії виду сульфат відновлювальні бактерії (СВБ) в кількості (в кл/мл): $1,0 \cdot 10^2$; $1,5 \cdot 10^2$; $1,5 \cdot 10^3$; $2,5 \cdot 10^4$; $1,5 \cdot 10^5$; $2,0 \cdot 10^6$.

Слід відмітити, що зразки виготовлені із дослідних сталей згідно формату (див рис.4) були напередодні повністю занурені у водний соляний чи бактеріальний розчин, який циркулював зі швидкістю 2,5 л/хв між випробувальною камерою – емністю 1 л і резервуаром, і витримували на протязі 720 год згідно вимог Специфікації Міжнародної Асоціації корозійників (Specification TenquizOil and Gas Plant

//ProzessPlant.-Lurgi code:65102-00-MAL-TENGUIZ II.Specification №.SPC-62900-XP-007) [9]. Кількість розчину, використаного для експериментів, складала 10 л, причому після кожного випробування розчин замінювався новим. Температуру розчину під час випробувань зберігали на рівні 22°C , завдяки електричному автоматичному регулятору. Вміст розчиненого кисню не контролювали.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати експериментальних досліджень тривалої втомності різних сталевих конструкцій (сталь 08Г2С) гідротехнічних споруд викладені на рис.5-8.

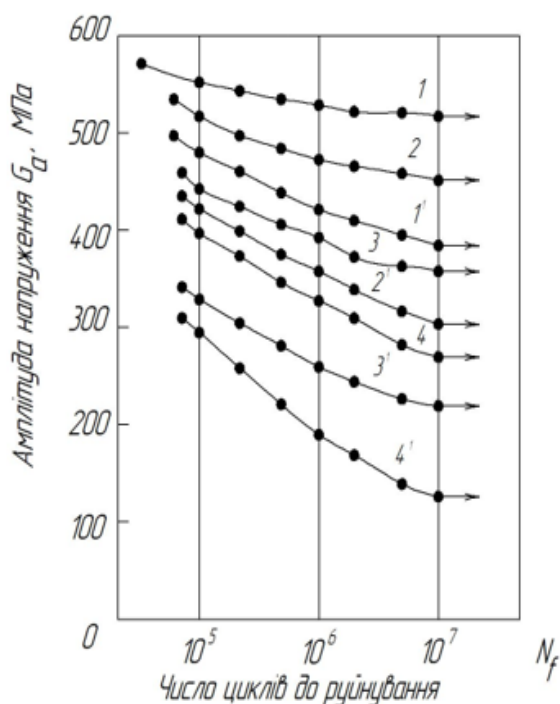


Рис. 5. S-N-криві (випробування на згин при обертанні 30 Гц). Позначення (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40 (іонообмінна вода); 1', 2', 3' і 4' – в розчин з іонообмінною водою добавляли 5% NaCl

Fig. 5. S-N-curves (bend tests in rotation of 30 Hz). Years: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40 (ion exchange water); 1', 2', 3' and 4' – in a solution with ion-exchange water added 5% NaCl

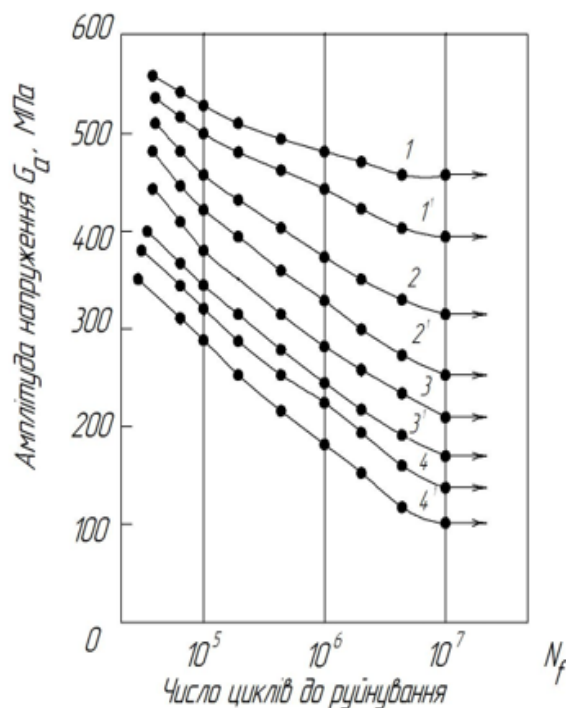


Рис. 6. S-N-криві (випробування на осьове навантаження. Позначення (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40 (іонообмінна вода); 1', 2', 3' і 4' – в розчин з іонообмінною водою добавляли 5% NaCl

Fig. 6. S-N-curves (Axial load tests. Years: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40 (ion-exchange water); 1', 2', 3' and 4' – in a solution with ion-exchange water added 5% NaCl

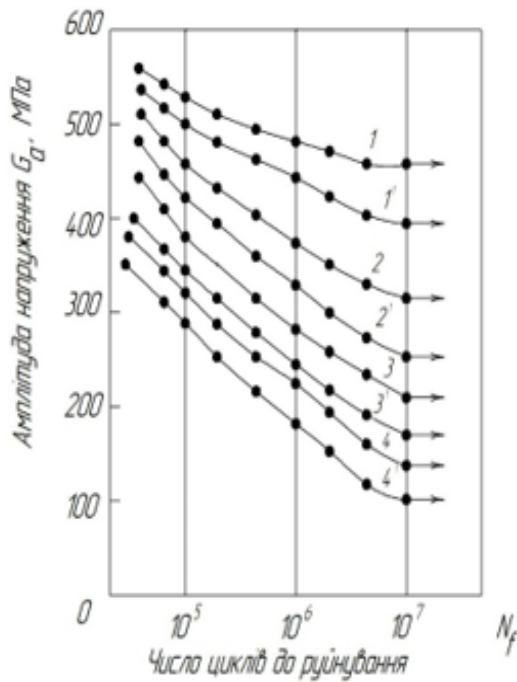


Рис. 7. S-N-криві (випробування на деформацію кручення, 20 Гц). Позначення (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40 (іонообмінна вода); 1', 2', 3' і 4' – в розчин з іонообмінною водою додали 5% NaCl

Fig. 7. S-N-curves (torsion deformation test 20 Hz). Years: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40 (ion exchange water); 1', 2', 3' and 4' – in a solution with ion-exchange water added 5% NaCl

Довжину поверхневих тріщин після випробувань зразків на згин при обертанні міряли під мікроскопом (при збільшенні $\times 30$) або оцінювали візуально. На рис. 9 показана кількість і довжина цих тріщин. Тріщини, які приводили до кінцевого руйнування, при вимірах не враховувалися.

ВИСНОВКИ

Досліджено спротив корозійній втомленості вуглецевої низьколегованої сталі гідротехнічного призначення при згині з обертанням, осьовому навантаженні і

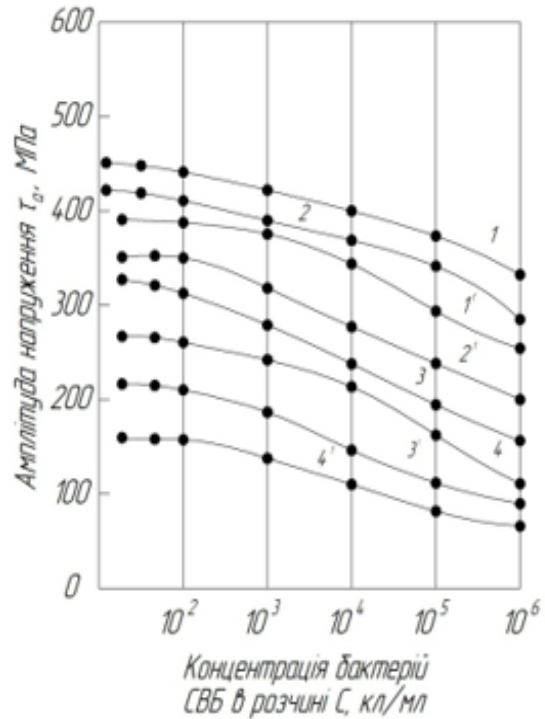


Рис. 8. Криві залежності між концентрацією бактерій СВБ в розчині і спротивом втомленості на базі $N = 10^7$ циклів при випробуванні зразків деформацією кручення. Позначення: експлуатація опірних стінок гідротехнічної греблі (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 1', 2', 3', 4' – розчин ГТБ + 5% NaCl

Fig. 8. The curves of the dependence between the concentration of bacteria of SRB in the solution and resistance of tiredness based on $N = 10^7$ cycles when testing samples of torsion deformation. Points: operation of the resistance walls of the hydrotechnical dam (years): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 1', 2', 3' and 4' – HTB solution + 5% NaCl

крученні в соляній воді з різною концентрацією солі, в яку додавали бактерії ГТБ і СВБ. Отримані результати дозволили підсумувати наступне:

1. Спротив корозійній втомленості на базі $N = 10^7$ циклів при випробуваннях в іонообмінній воді значно вище, чим випробування в іонообмінній воді з добавками солі (5% NaCl), а також з добавками бактерій ГТБ і особливо з добавками в соляний розчин бактерій СВБ. Причому, критична концентрація солі, при досягненні якої різко знижується тривала втомленість, складає приблизно 0,1%.

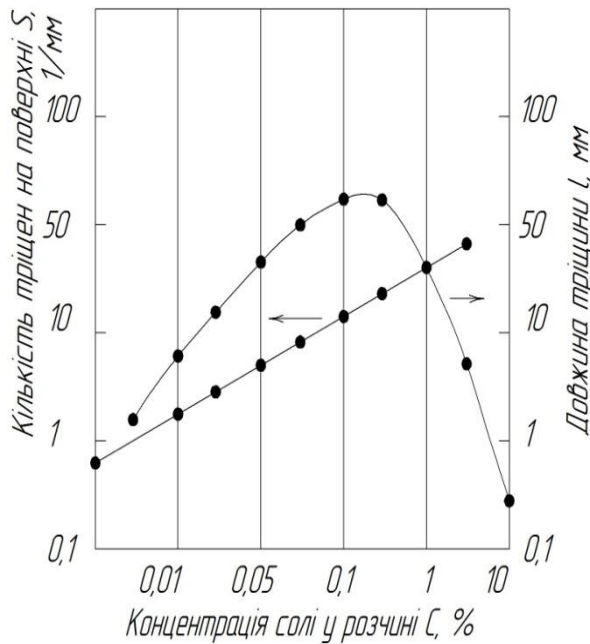


Рис. 9. Кількість і довжина тріщин, які виявлені на поверхні зразків після випробувань на згин при обертанні. Термін експлуатації опорних гідротехнічних конструкцій, з яких були вирізані зразки для випробувань, – 40 років

Fig. 9. The number and length of cracks that are detected on the surface of the samples after tests on the bend when rotated. Term of exploitation of supporting hydrotechnical structures from which samples were cut – 40 years

2. Експериментальні результати засвідчили, що різке зменшення спротиву корозійній втомленості проявляється при перевищенні 20-річного терміну експлуатації сталевих конструкцій в агресивних соляних середовищах з добавками бактерій ГТБ і СВБ. При можливості потрібно обмежувати концентрацію корозійно-агресивних бактерій величинами СВБ $1 \cdot 10^7$ кл/мл, а ГТБ $2 \cdot 10^5$ кл/мл, що досягається використанням відповідних бактерицидів.

3. Встановлено, що кількість і довжина тріщин збільшуються по мірі збільшення вмісту солі в розчині до 0,1%, після чого спостерігається уповільнення процесу тріщиноутворення, що, мабуть, спричинено гальмуванням корозійних ушкоджень металу.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Makarenko V. D., Prochorov N. N., Paliy R. V.** Effekt of barium on the phosphorus content of deposited metal of welded joints in cold-resistant steel. *Welding International*. 2002. №16(7). P.553-557.
2. **Makarenko V. D., Prochorov N. N., Paliy R. V.** Effekt of carbon monoxide on metal transfer in coated electrode welding. *Welding International*. 2003. №17. P.975-978.
3. **Makarenko V. D., Muravjev K. A., Kalyanov A. I.** Special features of manual ans welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Westem Siberia.-*Welding International*. 2006. №20(5). P.410-413.
4. **Макаренко В. Д., Лукач В. С., Василюк В. І. та інші.** Дослідження корозійних процесів екологічно небезпечних в експлуатації металоконструкцій. Проблеми тертя та зношення. 2016. №1(70). С.131-136.
5. **Макаренко В. Д., Грачев С. И., Прохоров Н. Н. и др.** Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири. Киев: Наукова думка. 1996. 549 с.
6. **Макаренко В. Д., Ковенский И. М., Прохоров Н. Н. и др.** Коррозионная стойкость сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов. М.: ООО "Недра-Бизнес-центр". 2000. 500 с.
7. **Макаренко В. Д.** Эксплуатационная надежность стальных конструкций. Нежин: Изд-во Лисенко М.М. 2011. 190 с.
8. **Чеботар І. М., Макаренко В. Д.** Інженерна оцінка безпечного ресурсу металевих конструкцій агропереробного виробництва. Київ: Видавництво "Ліра-К". 2017. 116 с.
9. **Боксер Э. Л.** Об адгезии расплавленных эмалей к твердой закиси Fe. Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наукова думка, 1972. С. 304-306.
10. **Окада Т., Хаттори С.** Зависимость между концентрацией соли в воде и сопротивлением коррозионной усталости конструкционной стали, содержащей 0,37% углерода. Труды Американского общества инженеров-механиков. Изд-во Мир: №3. 1085. С.98-107.
11. **Шимановський О. В., Шалінський В. В.** Щодо технічного стану авто- переїзду по прогонових будовах греблі ДніпроГЕС, зведених у 1932р. Промислове будівництво та інженерні споруди. Вид-во: ДК "Український Інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського". Київ, 2020. С.2-6.

12. **Бабік К. М., Гах Н. Д., Шалінський В. В.** Технічний стан конструкцій та елементів земляної вставки автодорожного переїзду спорудами Дніпровської ГЕС. Промислове будівництво та інженерні споруди. Видво: ДК "Український Інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського". Київ, 2020. С.7-15.

13. **Іванов Ф. М.** Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф. М. Иванов. М.: Транспорт, 1968. 110 с.

14. **Коррозия:** справочник / под ред. Л.Л. Шрайера; пер. с англ. М.: Metallurgiya, 1981. 632 с.

15. **Ликверман А. И.** Эффективная система защиты металлических мостов от коррозии / А. И. Ликверман, Ф. Б. Глазман, К. О. Распоров // Транспортное строительство. 2001. №8. С. 2-5.

16. **Маринин А. Н.** Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А. Н. Маринин, Р. Б. Гарибов, И. Г. Овчинников. Саратов: Издат. центр «РАТА», 2008. 296 с.

17. **Москвин В. М.** Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.

18. **Распоров О. Н.** Комплексная защита. Необходимость и целесообразность комплексной антикоррозионной защиты металлических, бетонных и железобетонных элементов мостовых сооружений / О. Н. Распоров, И. Г. Овчинников, К. О. Распоров // Дороги России 21 века. 2009. № 4. С.98-101.

19. **Сахаров В. Н.** Современные методы антикоррозионной защиты металлоконструкций в гидротехнике / В. Н. Сахаров, В. Г. Майоров // Гидротехническое строительство. 2005. №3. С. 46-19.

20. СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. Введ. 01.01.2013. М., 2012. 99 с.

21. **Шлугер М. А.** Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. М.: Metallurgiya, 1981. 216 с.

22. **Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Винников Ю. Л. і ін.** Корозійні руйнування

гідротехнічних споруд//Київ: Науково-видавничий центр. 2021. 310с.

REFERENCES

1. **Makarenko, V. D., Prochorov, N. N., & Paliy, R. V. (2002).** Effekt of barium on the phosphorus content of deposited metal of welded joints in cold-resistant steel. *Welding International*, 16(7). 553-557. <https://doi.org/10.1080/09507110209549575>
2. **Makarenko, V. D., Prochorov, N. N., & Paliy, R. V. (2003).** Effekt of carbon monoxide on metal transfer in coated electrode welding. *Welding International*, 17(12). 975-978. <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3238>
3. **Makarenko, V. D., Muravjev, K. A., & Kalyanov, A. I. (2006).** Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia. *Welding International*, 20(5). 410-413. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3640>
4. **Makarenko, V. D., Lukach, V. S., Vasylyuk, V. I., Kozachenko, N. V., & Taraborkin, L. A. (2016).** Research of corrosion processes of ecologically dangerous in operation metalworks. *Problems of Friction and Wear* 1(70). 131-136. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(70\).10400](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(70).10400)
5. **Makarenko, V. D., Grachev, S. I., & Prokhorov, N. N. (1996).** *Svarka i korroziya neftega-zoprovodov Zapadnoy Sibiri*. Kiev: Naukova dumka [in Russian]
6. **Makarenko, V. D., Kovenskiy, I. M., & Prokhorov, N. N. (2000).** *Korroziyonnaya stoykost' svarnikh metallokonstruktsiy neftegazovykh ob'yektov*. Moscow: LLC "Nedra-Business Center"[in Russian]
7. **Makarenko, V. D. (2011).** *Serviceability of steel structures*. Nizhyn: M. M. Lisenko Publishing House [in Russian]
8. **Chebotar, I. M., Makarenko, V. D. (2017).** *Inzhenerna otsinka bezpechnoho resursu metalevykh konstruktsiy ahropererobnoho vyrobnytstva*. Kyiv: Lira-K Publishing House. [in Ukrainian]
9. **Bokser, E. L. (1972).** *Ob adgezii rasplavlennykh emaley k tverdoy zakisi Fe. Smachivayemost' i poverkhnostnyye svoystva rasplavov i tverdykh tel*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian]
10. **Okada, T., & Hattori, S. (1985).** Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon

- Structural Steel. ASME. *J. Eng. Mater. Technol.*, 107(3). 235-239.
<https://doi.org/10.1115/1.3225809>
11. **Shymanovs'kyi, O. V., & Shalins'kyi, V. V. (2020).** Shchodo tekhnichnoho stanu avtopereyizdu po prohonovykh budovakh hrebli DniiproHES, zvedenykh u 1932 r. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*. 2-6 [in Ukrainian]
 12. **Babik, K. M., Hakh, N. D., & Shalins'kyi, V. V. (2020).** Tekhnichnyy stan konstruksiy ta elementiv zemlyanoyi vstavky avtodorozhn'oho pereyizdu sporudamy Dniiprovs'koyi HES. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*. 7-15 [in Ukrainian]
 13. **Ivanov, F. M. (1968).** *Zashchita zhelezobetonnykh transportnykh sooruzheniy ot korrozii*. Moscow: Transport [in Russian]
 14. **Schreier L.L. (ed.) (1981).** *Corrosion: a handbook*. Moscow: Metallurgy [in Russian]
 15. **Likverman, A. I., Glazman, F. B., Rasporov, K. O. (2001).** Effektivnaya sistema zashchity metallicheskih mostov ot korrozii. *Transport construction*, 8. 2-5. [in Russian]
 16. **Marinin, A. N., Garibov, R. B., & Ovchinnikov, I. G. (2008).** *Soprotivleniye zhelezobetonnykh konstruksiy vozdeystviyu khloridnoy korrozii i karbonizatsii*. Saratov: Publishing house. center "RATA" [in Russian]
 17. **Moskvin, V. M., Ivanov, F. M., Alekseyev, S. N., & Guzeyev, Ye. A. (1980)** *Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity*. Moscow: Stroyizdat [in Russian]
 18. **Rasporov, O. N., Ovchinnikov, I. G., & Rasporov, K. O. (2009).** Kompleksnaya zashchita. Neobkhodimost' i tselesoobraznost' kompleksnoy antikor-rozionnoy zashchity metallicheskih, betonnykh i zhelezobetonnykh elementov mostovykh sooruzheniy. *Roads of Russia of the 21st century*, 4. 98-101. [in Russian]
 19. **Sakharov, V. N., & Mayorov, V. G. (2005).** Sovremennyye metody antikorrozionnoy zashchity metallokonstruksiy v gidrotekhnike. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, 3. 46-19. [in Russian]
 20. **Ministry Of Regional Development Of The Russian Federation (2012)** *Protection against corrosion of construction*. Set of rules SP 28.13330.2012 Decree №625 dated 29.12.2011). Retrieved from <https://docs.cntd.ru/document/1200092602>
 21. **Shluger, M. A., Azhogin, F. F., & Yefimov, Ye. A. (1981).** *Korroziya i zashchita metallov*. Moscow: Metallurgy [in Russian]
 22. **Makarenko, V. D., Maksymov, S. Yu., & Vynnykov, Yu. L. (2021).** Korozivni ruynuvannya hidrotekhnichnykh sporud. Kyiv: Scientific and Publishing Center [in Ukrainian]

Research influence of biological corrosion on the strength of steel structures of hydrotechnical construction of long-term operation in aggressive environments

*Valeriy Makarenko, Viktor Khoruzhyy, Volodymyr Liubenko, Sergiy Maksymov,
Volodymyr Osadchyy, Ihor Nedashkovs'kyu*

Abstract. Biocorrosion is caused by the vital activity of various microorganisms that use metals as a nutrient medium or produce products that destroy metal structures. Anaerobic is the most dangerous (growth without oxygen) sulfate-reducing bacteria, which are present in slimy and swamp soils. Bacteria restore sulfate ions to sulfides ions, accelerating corrosion of metal. Life of aerobic bacteria occurs only in the presence of oxygen. Bacteria oxidize sulfur to sulfuric acid, the concentration of which in separate places can reach 10%. Ironobacteria absorb iron in ionic form and excrete it in the form of non-dissolved compounds. Since non-dissolved products are distributed on the metal surface unevenly, the electrochemical heterogeneity of the surface occurs, which accelerates corrosion. Microorganisms formed on the metal surface can cause not only corrosion. They can also increase the concentration of hydrogen sulfide in the environment by increasing the amount of deposits on steel hydraulic structures.

The greatest danger from the point of view of corrosion is sulfate reducing bacteria (SRB), which are widespread in hydraulic environments. Sulfate renewable bacteria belong to the class of anaerobic bacteria, the vital activity of which can be without oxygen. Aerobic bacteria, such as ironbacteria (IB) and sulfur bacteria or thionic (TB), which are present in groundwater with SRB, is viable only in the presence of oxygen. Anaerobic and aerobic bacteria have a common existence environment, and therefore often the development of one species creates favorable conditions for others.

Keywords: biological corrosion; strength of steel structures; sulfate renewable bacteria.

Стаття надійшла до редакції 09.06.2021