

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТРИВАЛУ ВТОМЛЕНІСТЬ СТАЛЕВИХ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Валерій Макарєнко¹, Ольга Войтович², Юлія Макарєнко³, Володимир Гоц⁴,
Володимир Савєнко⁵, Олексій Владимиров⁶, Олексій Стогній⁷, Володимир Азутєв⁸

^{1,2} Херсонський національний технічний університет, 24, Бериславське шосе, м. Херсон, 73008, Україна

³ Медичний університет "Манітоба", м. Вінніпег, Канада

^{4,5,6,8} Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, Повітрофлотський проспект, Київ, 03037, Україна

⁷ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
15, вул. Карпатська, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна

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

² канд. техн. наук, olgavoytovich@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0510-4362

³ бакалавр, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1252-4231

⁴ докт. техн. наук, gots.vi@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-1677-5137

⁵ докт. техн. наук, savenko.vi@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1490-6730

⁶ аспірант, savenko.vi@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-2506-7327

⁷ докторант, vadim-stogny@kdpu-nt.gov.ua, orcid.org/0000-0001-2421-6325

⁸ канд. техн. наук, azutov.vp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-3071-367X

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.43.36-44

Анотація. В роботі проводили експериментальні дослідження тривалої втомленості (міцності) сталевих конструкцій каналізаційних підземних споруд. Встановлено, що тривала втомленість (міцність) сталевих конструкцій каналізаційних підземних споруд значно зменшується при тривалій експлуатації (особливо при перевищенні терміну 20 років і більше) в хімічно-агресивних середовищах побутово-господарських стоків, що приводить часто до корозійно-механічних руйнувань. Показано, що в процесі тривалого терміну експлуатації суттєво знижуються показники тривалої втоми арматурних сталевих стрижнів залізобетонних конструкцій, що спричиняє утворення тріщин в з'єднанні «арматура-бетон», яке приводить, як правило, до руйнувань залізобетонних труб та конструкцій в цілому.

Ключові слова: тріщиностійкість, деформація, текучість, границя міцності, в'язкість.

ВСТУП

В каналізаційному будівництві часто використовують сталевий профільний прокат (труби, таврові і двотаврові балки, кутники), як основний тип конструкцій. В Україні їх частка складає близько 90 % [1, 2, 3] і в найближчій перспективі ця цифра помітно не зміниться, оскільки з-за збільшення терміну експлуатації таких споруд різко зростає зношеність сталевих конструкцій та корозійні руйнування арматури в залізобетонних конструкціях, а тому тільки податливі сталеві конструкції зможуть забезпечити в більшості випадків задовільний експлуатаційний стан підземних каналізаційних інженерних

споруджень [2]. Майже унікальна здатність цих конструкцій адаптуватися до зміни навантажень і в зв'язку з цим силових та температурних факторів, не руйнуючись, дозволяє розглядати їх як найбільш безпечні [3].

Суттєво знижує ефективність використання сталі залізобетонних плит їх корозійна здатність, зокрема арматурних стрижнів [2,3,4-10].

Корозійна агресивність каналізаційних стоків спричинена наявністю аніонів сірчанних кислот, іонів магнію і кальцію, аніонів хлористих солей і кислот. Зокрема в каналізаційних системах Києва, Чернігіва, Одеси, Харківка в побутово-господарських і промислових стоках присутні (мг-екв/дм³) Cl^-

1200...2100; SO_4^{2-} 15...25; $\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$ 120...300; HCO_3^- 10...25. Причому, коефіцієнт корозійного середовища складає в середньому 10...16, а агресивність на метал $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^- > 3$ г/л.

Корозія (руйнування металу) є результатом взаємодії навколишнього середовища з металами. С точки зору механізму корозійного процесу корозія буває хімічна, електрохімічна і біохімічна. В промислових умовах каналізаційних споруд чаще всього може мати місце біологічна корозія з поступовим переходом до електрохімічного виду корозії.

Аналіз літературних джерел свідчить, що

до теперішнього часу в літературі відсутні відомості щодо тривалої втомленості (міцності) сталевих трубних конструкцій, особливо арматурних стрижнів залізобетонних каналізаційних споруд в процесі тривалого терміну експлуатації в агресивних хімічно-активних середовищах, які одночасно містять хімічні інгредієнти та біологічно-агресивні бактерії [11-13].

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА

Зразки для експериментальних випробувань на тривалу втомленість (міцність) показані на рис.1. Всі зразки виготовляли із сталевих конструкцій безпосередньо на об'єктах каналізаційних підземних споруд.

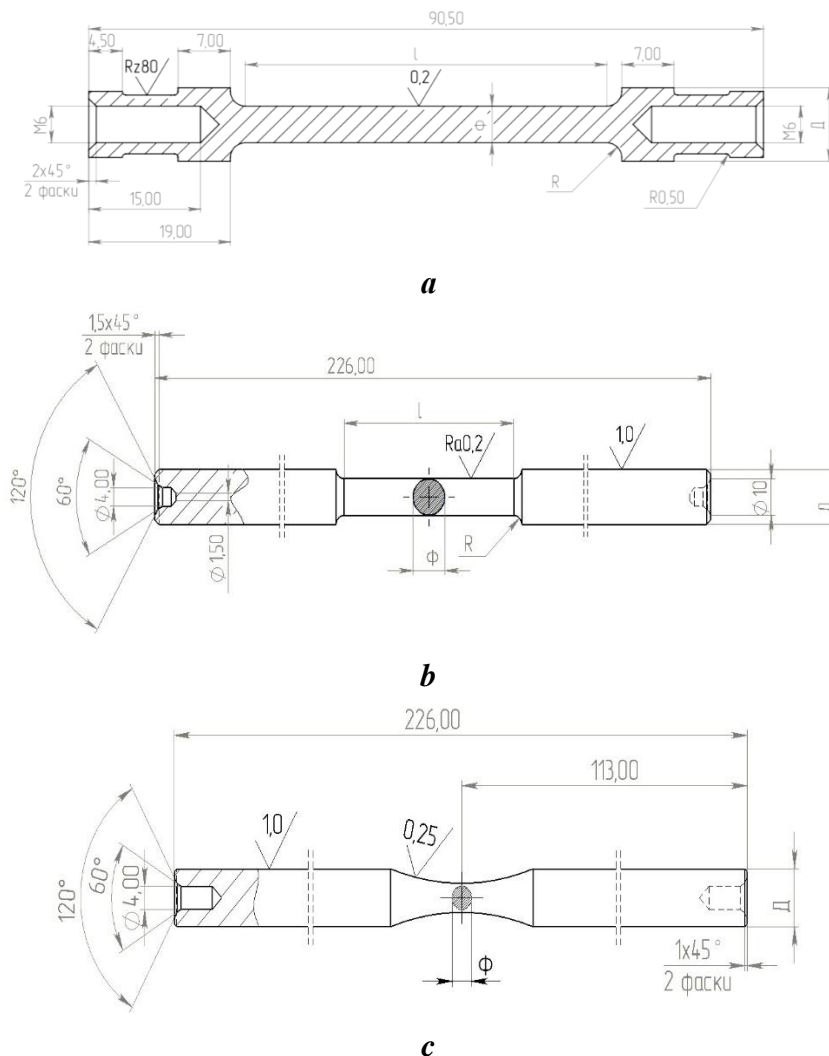


Рис.1. Зразки для випробувань на втомлену (тривалу) міцність: **a** – зразок для випробувань на кручення; **b** – зразок для випробувань при осьовому навантаженні; **c** – зразок для випробувань на згин при обертанні

Fig. 1. Samples for fatigue (long-term) strength tests: **a** – sample for torsion tests; **b** – sample for testing under axial load; **c** – sample for bending tests during rotation

Для проведення досліджень використовували сталь вуглецево-низьколеговану марки 08Г2С з 0,07...0,092%С і наступними характеристиками $\sigma_B = 470...560$ МПа, $\sigma_{0,2} = 315$ МПа ($\sigma_{0,2min} = 245$ МПа) для температур навколишнього середовища $-20...-40^\circ\text{C}$. Вуглецевий еквівалент $CE = 0,21...0,32$; $KCV = 28$ Дж (еквівалентну сталі FISI 1035) [1,11]. Після нормалізації з нагрівом до 860°C і витримки на протязі 30 хв із таких сталей виготовляли зразки, показані на рис. 1. 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 різних видах навантаження. Зразки випробували на уставці моделі «Інстрон» (Великобританія). Проводились випробування на згин з нульовим середнім напруженням і частотою циклів 20 Гц. Використані розчини солі з концентраціями від 0,5% до 10%. Для порівняння результатів іноді випробування проводили на повітрі.

Гетеротрофні бактерії (ГТБ) вводили у воду в наступних кількостях (в кл/мл): $6,2 \cdot 10^6$; $2,2 \cdot 10^7$; $3,1 \cdot 10^8$; $2,5 \cdot 10^8$; $1,5 \cdot 10^9$; сульфатвідновлювальні 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 промислових сталей згідно формату (див рис.1), були попередньо повністю занурені у водний соляний чи бактеріальний розчин, який циркулював зі швидкістю 2,5л/хв між випробувальною камерою – ємністю 1 л і резервуаром, 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) [1, 11]. 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 , що забезпечував електричний автоматичний

регулятор. Вміст розчиненого кисню не контролювали.

В процесі експлуатації каналізаційних систем залізобетонні галерейні стінки безпосередньо контактують з вологою, хімічно активними водами і атмосферою. В результаті сталеві трубні та залізобетонні конструкції (зокрема, арматурні стрижні) піддаються різним видам корозії, серед яких відрізняють атмосферну, підводну, підземну, водневу, кисневу, газову та сірчано-кислотну, хлоридну та мікробіологічну (бактеріальну).

Атмосферна корозія особливо інтенсивна, коли температура повітря сягає 40°C , повітряний потік характеризується значною швидкістю повітряного струменя і відносною вологістю, часто рівною 100 %. Підводна корозія – це руйнування металу, зануреного в воду. Під водою знаходяться елементи фундаментних кріплень, прилегаючі до водовідливним канавок і підтопленим виробам, системи водозбірників, трубопроводів і т. д. Наявність у воді домішок солей і кислот прискорює процес. Підземна корозія виникає при дії на метал та залізобетон підводного біологічно-агресивного середовища і мінеральних частинок. Воднева і газова види корозії характерні для металоконструкцій в каналізаційних спорудах.

В підземних каналізаційних умовах корозія металу також класифікується за характером руйнування. Найбільш небезпечною виявляється нерівномірна корозія.

Слід звернути увагу на роль прокатної окалини та іржи в процесах корозії металевих конструкцій, особливо щодо арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій в каналізаційних умовах тривалого терміну експлуатації.

Іржа, на відміну від окалини, виникає в присутності вологи, коли $t < 100^\circ\text{C}$, а тому складається переважно з гідратованих окислів заліза. В загальному вигляді хімічний склад іржи може бути виражений формулою: $(\text{FeO})_n \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_m \cdot (\text{H}_2\text{O})_k$.

В шарі іржи зазвичай виявляються розчинені солі заліза і других катіонів. Через рихлу структуру на поверхні іржи довше затримується волога, яка з'являється в

результаті дренажу ґрунтових вод, а тому швидкість корозії підвищується.

В результаті агресивного впливу підземних каналізаційних умов, попадаючи на окремі частини металевих конструкцій, вода накопичується, утворюючи застійні зони, що призводить до їх швидкого кородування. Практично встановлено, що тонкі плівки рідини діють більш активно і агресивно, тому коли між металевими частинами спостерігаються вузькі зазори, процеси корозії протікають більш інтенсивно.

На швидкість корозії в гідротехнічно-каналізаційних умовах також впливає тимчасова (карбонатна) жорсткість природних вод. В м'яких водах залізо кородує швидше. Жорсткі води мають схильність осаджати нерозчинені солі, наприклад CaCO_3 (особливо на катодних ділянках), що заважає дифузії кисню до металу [4-10,13]. В той же час, легкокорозійні солі (хлориди, сульфати), які знаходяться в ґрунтах чи розчинені в ґрунтових водах, підвищують корозійну агресивність стічних вод, прискорюючи розвиток корозійних процесів. Це відбувається внаслідок активування металу присутніми в ньому іонами, в особливості іонами хлору, які, адсорбуючись на поверхні сталі і витиснюючи звідти кисень, сприяють руйнуванню окисних плівок і затруднюють пасивацію цієї поверхні.

Важливу роль в цьому процесі грають завислі у воді частинки, які за своєю корозійною активністю можна розділити на три групи:

1. Корозійно-активні частинки. Це переважно частинки солей, наприклад, хлористого натрію, сірчаноокислого натрію, сірчаноокислого амонію.

2. Корозійно-неактивні частинки, що адсорбують із повітря корозійно-активні гази. Це частинки замулення днища біля аераційних станцій та наглядових колодязів, присутність яких на металі сильно прискорює його корозію.

3. Корозійно-неактивні частинки, що не адсорбують шкідливих газів.

В деяких випадках в каналізаційних системах спостерігається явище, коли частинки твердих відходів і мінеральних порід за

відсутності водопритоку з навколишнього середовища створюють захисну плівку, під якою процеси корозії тимчасово призупиняються.

Вищерозглянуті умови експлуатації каналізаційного устаткування і різних інженерних металоконструкцій незначно змінюються в межах каналізаційних споруд України.

Однак слід відмітити що агресивні стічні води виявляються найбільш корозійно-активними по відношенню до металевого устаткування, сильно мінералізовані, містять значну кількість іонів Cl^- і SO_4^{2-} . Їх загальна жорсткість коливається в межах 5...10 мг-екв/дм³, лужність $\text{pH} = 6...7,2$ мг-екв/дм³.

Вміст мінеральних солей (сульфатів і хлоридів) в ґрунтових водах здійснює значний вплив на розвиток процесів корозії металевих конструкцій, що в підсумку відображається на їх несучій здатності.

Як правило, проблему забезпечення стійкості пошкоджених ділянок сталевих і залізобетонних конструкцій каналізаційних споруд вирішують в єдиному ключі – заміняють пошкоджене корозією устаткування, на нове. Оптимальне рішення даної проблеми вимагає детального вивчення процесу корозії інженерних конструкцій в каналізаційних (натурних) умовах.

Слід зауважити, що для оцінки внутрішніх напружень в діючих металоконструкціях гідротехнічних споруд використовували прилад моделі «Stresscan» фірми «Argosy Technologies» (США), принцип роботи якого заснований на використанні властивостей магнітопружності феромагнітних матеріалів (шумів Баркхаузена). Цей прилад дозволяє виявляти параметри напружено-деформованого стану металу в дослідній локації, в автоматичному режимі знаходити концентراتори механічних напружень і градієнти різниці механічних напружень, а також кількісно оцінити їх небезпеку, а також знаходити зони з остаточними пластичними деформаціями і зварювальними напруженнями. Принцип роботи цього дослідного приладу більш детально описаний в роботі [34].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати експериментальних досліджень тривалої втомності різних сталевих конструкцій (сталь 09Г2) каналізаційних споруд викладені на рис. 2-7, зокрема на

рис. 6-7 викладені дані втомної міцності арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій каналізаційних споруд. В експериментальних випробуваннях використовували арматурні стрижні діаметром 32 мм із сталі марки 20ГС.

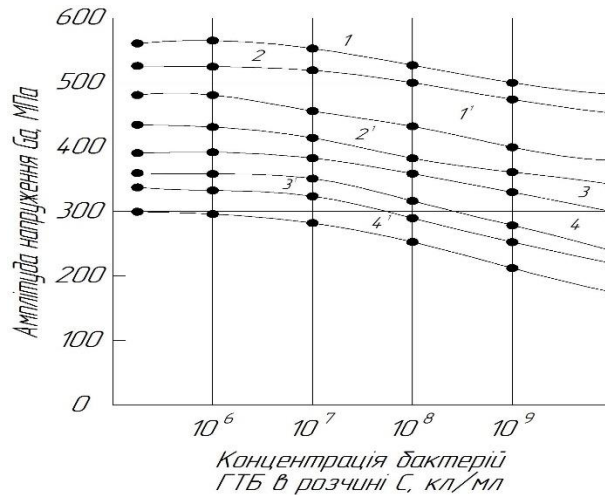


Рис. 2. Криві залежності між концентрацією бактерій ГТБ в розчині і спротивом втомленості на базі $N = 10^7$ циклів при випробуванні деформацією згин при обертанні. Позначення: експлуатація каналізаційних трубних конструкцій (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 1', 2', 3', 4' – (розчин ГТБ +5% NaCl)

Fig. 2. Curves of dependence between the concentration of HTB bacteria in the solution and the fatigue resistance based on $N = 10^7$ cycles during the flexural deformation test during rotation. Designation: operation of sewage pipe structures (in years): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 1', 2', 3', 4' – (HTB solution +5% NaCl)

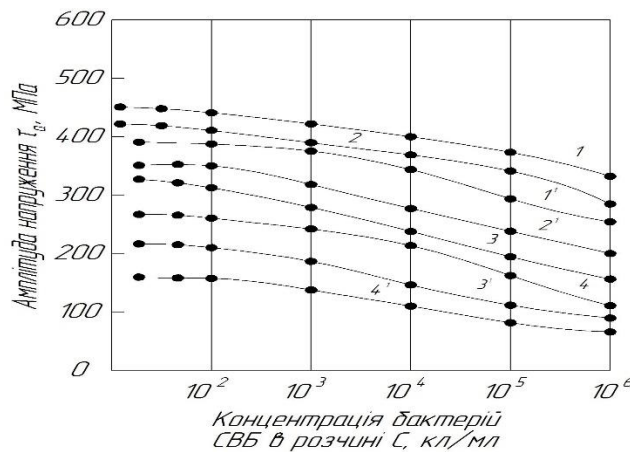


Рис. 3. Криві залежності між концентрацією бактерій СРБ в розчині і спротивом втомленості на базі $N = 10^7$ циклів при випробуванні зразків деформацією кручення. Позначення: експлуатація каналізаційних трубних конструкцій (в роках): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 1', 2', 3', 4' – (розчин ГТБ +5% NaCl)

Fig. 3. Curves of the dependence between the concentration of SRB bacteria in the solution and the fatigue resistance based on $N = 10^7$ cycles when testing samples by torsional deformation. Designation: operation of sewage pipe structures (in years): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 1', 2', 3', 4' – (HTB solution +5% NaCl)

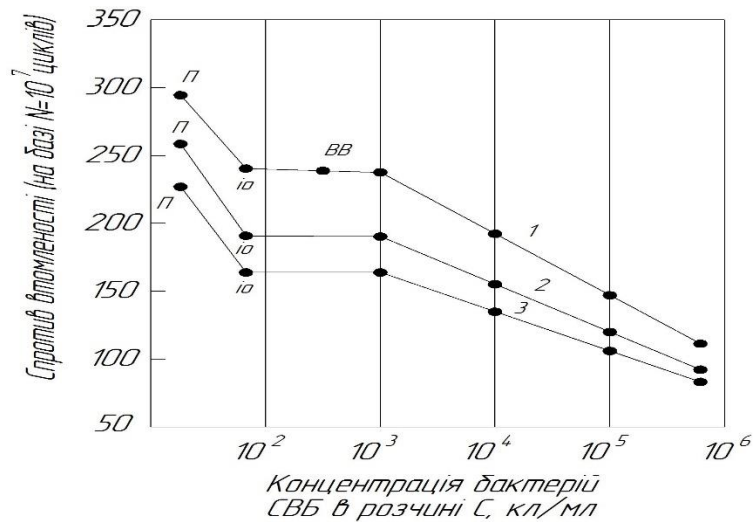


Рис. 4. Криві залежності між концентрацією бактерій СВБ в розчині і спротивом втомленості на базі $N = 10^7$ циклів, при експлуатації каналізаційних трубних конструкцій тривалістю 40 років. Позначення: 1 – згин при обертанні; 2 – осьове навантаження; 3 – кручення; BB – водопровідна вода; П – повітря; io – іонообмінні вода

Fig. 4. Curves of the dependence between the concentration of SVB bacteria in the solution and fatigue resistance based on $N = 10^7$ cycles, during the operation of sewage pipe structures lasting 40 years. Designation: 1 – bending during rotation; 2 – axial load; 3 – torsion; BB – supply water; П – air; io – ion exchange water

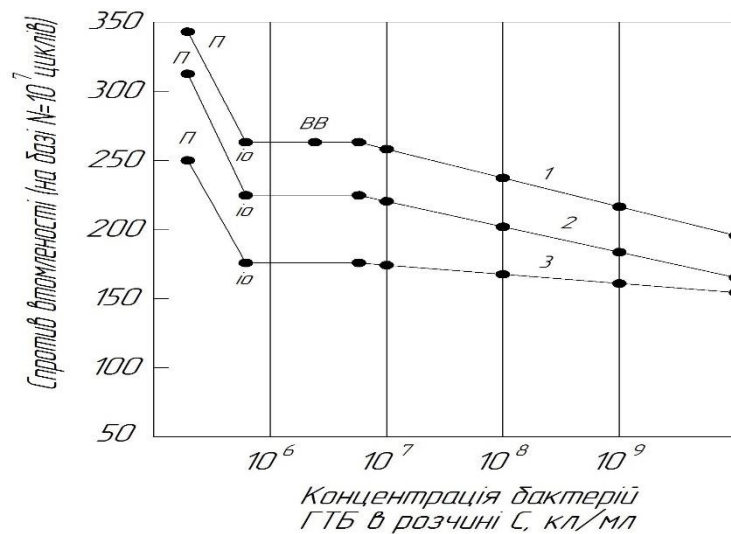


Рис. 5. Криві залежності між концентрацією бактерій ГТБ в розчині і спротивом втомленості на базі $N = 10^7$ циклів при експлуатації каналізаційних труб стокового відведення тривалістю 40 років. Позначення: 1 – згин при обертанні; 2 – осьове навантаження; 3 – кручення; BB – водопровідна вода; П – повітря; io – іонообмінні вода

Fig. 5. Curves of the dependence between the concentration of GTB bacteria in the solution and the fatigue resistance based on $N = 10^7$ cycles during the operation of sewer pipes for waste disposal for 40 years. Designation: 1 – bending during rotation; 2 – axial load; 3 – torsion; BB – tap water; П – air; io – ion exchange water

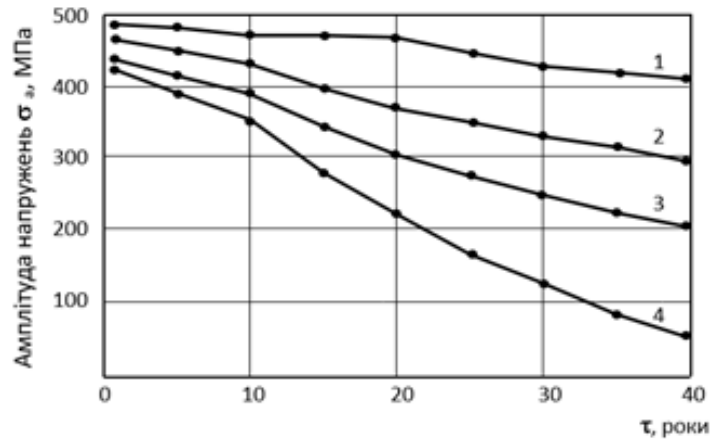


Рис. 6. Графіки залежності при випробуванні на деформацію згин зразків, вирізаних з арматури залізобетонних конструкцій каналізаційних споруд. Втомні випробування на базі $N = 10^7$ циклів. Позначення: 1 – випробування на повітрі; 2 – випробування в середовищі з 3% NaCl; 3 – випробування в середовищі з бактеріями ГТБ ($2,5 \cdot 10^6$ кл.); 4 – випробування в середовищі з бактеріями СВБ ($5 \cdot 10^7$ кл.). Арматура діаметром 32 мм, сталь марки 20ГС

Fig. 6. Graphs of dependence when testing for bending deformation of samples cut from reinforcement of reinforced concrete constructions of sewerage facilities. Fatigue tests based on $N = 10^7$ cycles. Designation: 1 – air test; 2 – test in an environment with 3% NaCl; 3 – test in an environment with HTB bacteria ($2.5 \cdot 10^6$ cells); 4 – test in an environment with bacteria of SRB ($5 \cdot 10^7$ cells). Armature with a diameter of 32 mm, steel grade 20GS

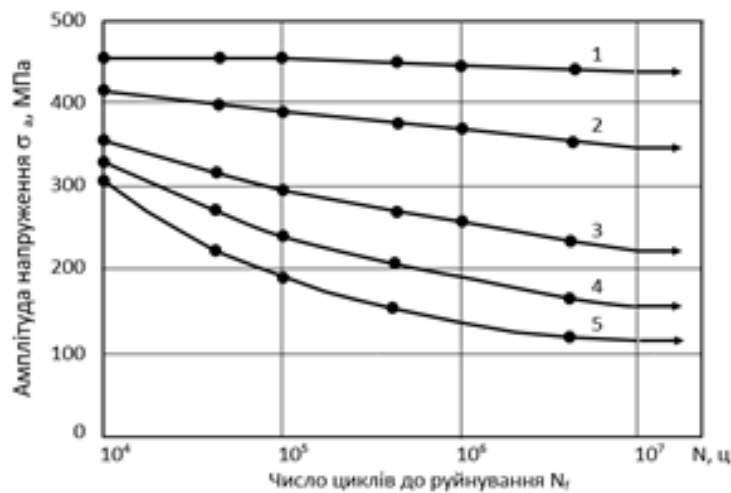


Рис. 7. Графіки залежності при випробуванні в середовищі соляної води (NaCl 3% = 30 г/л) на деформацію осьове навантаження, 20 Гц, зразків, вирізаних з арматури залізобетонних конструкцій на спорудах каналізаційних систем. Позначення терміну експлуатації залізобетонних конструкцій (в роках): 1 – 15; 2 – 25; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 50; арматура діаметром 32 мм, сталь марки 20ГС

Fig. 7. Graphs of the dependence during testing in a salt water environment (NaCl 3% = 30 g/l) on the deformation of the axial load, 20 Hz, of the samples cut from the reinforcement of reinforced concrete structures in the buildings of sewage systems. Designation of the service life of reinforced concrete structures (in years): 1 – 15; 2 – 25; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 50; fittings with a diameter of 32 mm, steel grade 20GS

Аналіз наведених на рис. 2-7 даних свідчить про те, що тривала втомленість сталевих і залізобетонних конструкцій різних каналізаційних споруд значно зменшується при досягненні 20 і більше років експлуатації, особливо в середовищі, яке містить бактерії СВБ, які в свою чергу спричиняють сильну корозійну ушкодженість основних трубних конструкцій для відведення стоків в порівнянні з іншими модельними середовищами (див. вищенаведені рисунки). Причому, звертає на себе увагу той факт, що зразки, які вирізані з металу із тривалим терміном експлуатації в гідротехнічно-каналізаційних умовах (більше 20 років), характеризуються низькою тривалою міцністю (рис.2-5). Дані рис.7 чітко засвідчили різке зниження спротиву металу втомленості в соляних розчинах, особливо після 10-20 років експлуатації сталевих арматурних стрижнів залізобетонних каналізаційних споруд. Це можна пояснити тим, що в процесі тривалої експлуатації металоконструкцій, а також в цілому каналізаційного устаткування відбувається деградація металу, спричинена наводненням, яке в свою чергу спричиняє його окрихчення і як, наслідок, крихке руйнування [18,19].

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що тривала втомленість (міцність) сталевих конструкцій каналізаційних підземних споруд значно зменшується при тривалій експлуатації (особливо при перевищенні терміну 20 років і більше) в хімічно-агресивних середовищах побутово-господарських стоків, що приводить часто до корозійно-механічних руйнувань.

2. Показано, що в процесі тривалого терміну експлуатації суттєво знижуються показники тривалої втоми арматурних сталевих стрижнів залізобетонних конструкцій, що спричиняє утворення тріщин в з'єднанні "арматура-бетон", яке приводить, як правило, до руйнувань залізобетонних труб та конструкцій в цілому.

ЛІТЕРАТУРА

1. **ДБН В.2.6-98:2009** Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 75 с.
2. **Гончаренко Д., Алейникова А.** Водопроводные сети г. Харькова и возможные пути повышения их эксплуатационной долговечности // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture, 2013. Vol. 15. № 6. 3-10.
3. **House of Commons.** Water: The Periodic Review 2004 and the Environmental Programme. 2004. London: The Stationery Office Limited, 2004. 163.
4. **Юрченко В.** Развитие научно-технологических основ эксплуатации сооружений канализации в условиях биохимического окисления неорганических соединений: Дис... д-ра техн. наук: 05.23.04. Харьков, 2006. 395.
5. **Sanchez-Silva M., Rosowsky D. V.** Biodeterioration of construction materials: State of the art and future challenges // Journal of Materials in Civil Engineering, 2008. 20(5), 352-365.
6. **Parker C.** Species of sulfur bacteria associated with the corrosion of concrete // Nature, 1947. 159(4039), 439 – 440.
7. **Parker C.** The corrosion of concrete // Austral. J. Exp. Biol. Med. Sci., 1945. 23(2), 81 – 98.
8. **Bielecki, R., & Schremmer, H.** Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen // Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, 1987. 275.
9. **Okada T., Hattori S.** Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel // Journal of Engineering Materials and Technology, 1985. 107(3), 235-239.
10. **Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Ус В. И., Ярош В. М.** Особенности конструирования биметаллических заготовок для производства арматурного профиля с коррозионно-стойким плакирующим слоем из стали 316L // Современная электрометаллургия. № 2(79). С. 9-14.
11. **Макаренко В.Д., Палий Р.В., Галиченко Е.Н. и др.** Физико-механические основы сероводородного коррозионного разрушения промышленных трубопроводов: монография // Челябинск, ЦНТИ. 2004. 411 с.
12. **Макаренко В. Д., Кузьменко О. Г., Кусков Ю. М. і др.** Корозійні руйнування

каналізаційних систем України // Київ: НУБіП України, 2021. 272 с.

REFERENCES

1. **Ministry of Regional Development of Ukraine (2011)**. DBN V.2.6-98:2009 Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Substantive provisions. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26677 [in Ukrainian]
2. **Goncharenko, D., & Aleynikova, A. (2013)**. Water supply networks of the city of Kharkiv and possible ways to increase their operational durability. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 15(6). 3-10. [in Russian]
3. **House of Commons (2004)**. *Water: The Periodic Review 2004 and the Environmental Programme*. Retrieved from <https://publications.parliament.uk/pa/cm200304/cmselect/cmenvaud/416/416.pdf>
4. **Yurchenko, V. (2006)**. *Development of the scientific and technological foundations of the operation of constructed sewers in the conditions of biochemical oxidation of inorganic compounds* (Doctoral thesis. Kharkiv, Ukraine). [in Russian]
5. **Sanchez-Silva, M., Rosowsky, D. V. (2008)**. Biodeterioration of construction materials: State of the art and future challenges. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(5), 352-365. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:5\(352\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:5(352))
6. **Parker, C. (1947)**. Species of sulfur bacteria associated with the corrosion of concrete. *Nature*, 159(4039). 439-440. <https://doi.org/10.1038/159439b0>
7. **Parker, C. (1945)**. The corrosion of concrete. *Austral. J. Exp. Biol. Med. Sci.*, 23(2). 81-98. <https://doi.org/10.1038/icb.1945.13>
8. **Bielecki, R., & Schremmer, H. (1987)**. *Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen*. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig.
9. **Okada T., Hattori S. (1985)**. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 107(3), 235-239. <https://doi.org/10.1115/1.3225809>
10. **Medovar, L. B., Saenko, V. Ya., Us, V. I., & Yarosh, V. M. (2005)**. Features of designing bimetallic blanks for the production of reinforcing profiles with a corrosion-resistant cladding layer of steel 316L. *Modern Electrometallurgy*, 2(79), 9-14. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/95212> [in Russian]
11. **Makarenko, V. D., Paly, R. V., Halychenko, E. N. et al. (2004)**. *Physico-mechanical foundations of hydrogen sulfide corrosion destruction of industrial pipelines: monograph*. Chelyabinsk, Central Technical University. [in Russian]
12. **Makarenko, V. D., Kuzmenko, O. G., Kuskov, Yu. M. et al. (2021)**. *Corrosive destruction of sewerage systems of Ukraine*. Kyiv: NUBiP. [in Ukrainian]

Study of the influence of a corrosive environment on long-term fatigue of steel sewer structures

Valery Makarenko, Olga Voytovych, Yulia Makarenko, Volodymyr Gots,
Volodymyr Savenko, Oleksii Vladimirov, Oleksii Stogniy, Volodymyr Azutov

Abstract. In the work, experimental studies of long-term fatigue (strength) of steel structures of sewerage underground structures were carried out. It was established that the long-term fatigue (strength) of steel structures of sewerage underground structures significantly decreases during long-term operation (especially when exceeding the term of 20 years or more) in chemically aggressive environments domestic and economic waste, which often leads to corrosion and mechanical destruction. It is shown that in the course of a long period of operation, the indicators of long-term fatigue of reinforcing steel rods of reinforced concrete structures are significantly reduced, which causes the formation of cracks in the "reinforcement-concrete" connection, which leads, as a rule, to the destruction of reinforced concrete pipes and structures in general.

Key words: crack resistance, deformation, fluidity, strength limit, viscosity.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2023