

**АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ТРАНСПОРТНОГО
БУДІВНИЦТВА З ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ ВІД ВПЛИВУ КОРОЗІЇ**

**ANALYSIS OF THE TECHNICAL STATE OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES OF
TRANSPORTATION CONSTRUCTION FROM ROAD WATER PERFORMANCE PIPES FROM
THE INFLUENCE OF CORROSION**



Гаркуша Микола Васильович, кандадат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua, тел. +380966287905,

<https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>



Клименко Микола Іванович, Національний транспортний університет, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, тел. +380678975852,

<https://orcid.org/0000-0002-7967-5881>



Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,

<https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Анотація. Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб призначені для транспортування та відведення від транспортних споруд води. Одним із основних чинників, що впливає на довговічність дорожньої водопропускної труби є корозія металу самої труби.

Із збільшенням кількості гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на дорогах, особливе значення набувають питання забезпечення надійності і довговічності їх роботи в процесі експлуатації, так як має місце велика кількість деформацій, а також випадки повного руйнування труб під насипами.

Світовий досвід показує, що корозійні пошкодження є надзвичайно важливою проблемою і вимагають належної реакції на дуже ранній стадії розвитку.

У статті розглянуто характеристику найпоширеніших причин виникнення корозії дорожніх водопропускних труб.

Ключові слова: автомобільна дорога, гідротехнічні споруди, дорожній одяг, дорожня водопропускна труба, корозія, транспортна споруда.

Вступ. Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб виготовлені з металу є перспективними видами споруд, для зведення яких необхідно мінімум часу, матеріалів та витрат людської праці, маючи при цьому великі переваги з альтернативними конструкціями та нерідко застосовуються як малі та середні мости.

Однією з причин передчасного руйнування дорожньої водопропускної труби є корозія металу, а також відсутність сучасних підгодів аналізу та врахування корозійного пошкодження водопропускної труби на її подальшу надійність та довговічність.

Мета і методи. Аналіз технічного стану гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб від впливу корозії. В роботі наведено теоретичні методи дослідження впливу корозії металу дорожньої водопропускної труби.

Мета публікації полягає у аналізі існуючих причин та наслідків впливу корозії на дорожню водопропускну трубу.

Об'єктом дослідження є середовище проходження корозії металевих дорожніх водопропускних труб.

Загальні положення. У 1896 році в США Уотсон запатентував гофровану сталеву трубу та в тому ж році почалося масове виробництво конструкцій на американському континенті [1]. З часом великі перерізи водопропускних труб розділяли на елементи конструкції та з'єднували разом за допомогою гвинтових з'єднань. У наступні десятиліття ці елементи, будучи економними, міцними та довговічними сприяли швидкому збільшенню різноманіття застосування конструкцій із гофрованих труб в транспортному будівництві всього світу. У Європі ця технологія набула широкого застосування лише після Другої світової війни [1].

Однак, масове застосування в світі дорожніх водопропускних труб з металу розпочинається з середини 1950-х років, в цей час починають застосовувати труби різних форм – кола, горизонтальний та вертикальний еліпс, тощо.

В перших проектах термін експлуатації дорожніх водопропускних труб з металу становив близько 50 років, у літературі повідомляється, що більшість металевих водопропускних труб збереглися не більше 30 років до необхідності ремонту та модернізації, зокрема через корозію [2].

Перші рекомендації щодо розрахунку довговічності дорожніх водопропускних труб були розроблені в США (California Department of Transportation) в 1959 році [3]. Метод оцінював довговічність водопропускних труб з моменту введення в експлуатацію до моменту появи в ній першого наскрізного отвору від руйнування спричиненого корозією металу.

Розрахунок полягає в тому, що встановлюється період часу, протягом якого відбувається повне руйнування стінки металеві гофрованої труби корозією.

До 1970 року було проведено багато досліджень для вивчення різних аспектів корозії та стирання дорожніх водопропускних труб, проте лише в 1978 році було здійснено узагальнення отриманого досвіду стану дорожніх водопропускних труб виготовлених з металу [4].

Розробка та використання аналізу кінцевих елементів у 1970-х та 1980-х роках змінило характер оцінки довговічності дорожніх водопропускних труб, оскільки це дозволило розглянути геометричні характеристики, характеристики матеріалів труби, навантаження від ґрунту та транспортних засобів, а також враховувати особливості будівництва та експлуатації дорожніх водопропускних труб [2].

Економічні розрахунки наслідків корозії дорожніх водопропускних труб свідчать, що вона є справжньою економічною та екологічною проблемою [5 – 7]. Дослідження проведені в 1949 році в США свідчать, що витрати на боротьбу та наслідки корозії еквівалентні 2,5 % ВВП США [5]. В 2016 році Національна асоціація інженерів з корозії (NACE) опублікувала документ про витрати на боротьбу з корозією та її наслідки, оцінивши, що у 2013 році світові витрати на корозію металу склали 2,5 трлн

доларів США, що еквівалентно 3,4 % світового ВВП. В роботі [8] зазначається, що використання методів боротьби з корозією може заощадити від 15 % до 35 % вартості конструкції.

Корозія металу, як і експлуатаційна міцність, має великий вплив на довговічність гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб.

Середовище походження корозії дорожньої водопропускної труби: вода, ґрунт, повітря (рисунок 1).

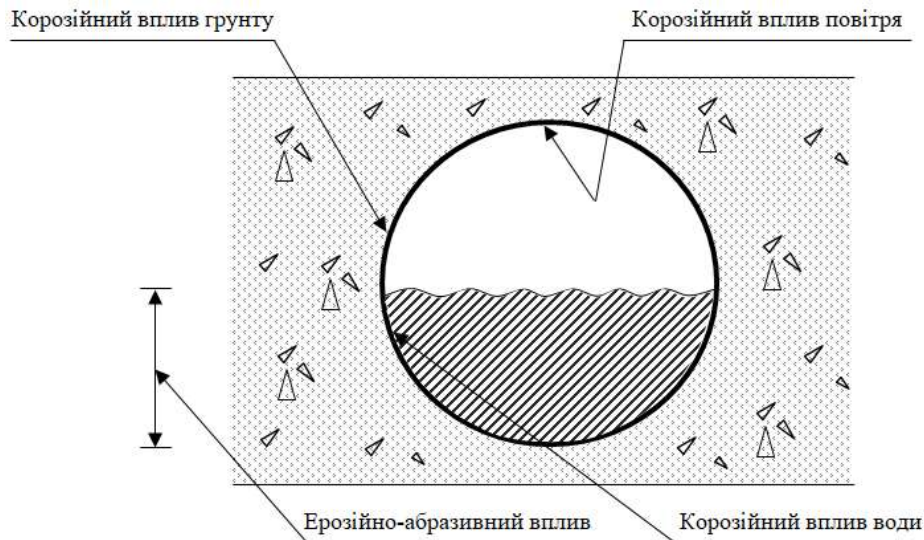


Рисунок 1 – Середовище походження корозії дорожньої водопропускної труби.
Figure 1 – Environment of origin of rod culvert corrosion.

На рисунку 2 наведено класифікацію типів корозії [1]. Корозія, що відноситься до дорожніх водопропускних труб позначено жирним шрифтом.



Рисунок 2 – Класифікація найбільш часто поширених видів корозії.
Figure 2 – Classification of the most common types of corrosion.

Серед основних причин передчасної корозії гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб [1]:

- відсутність належного захисту від корозії;
- відсутність належного захисту від стирання, що спричиняє пошкодження днища та бічних стінок конструкції матеріалом, що переноситься водою;
- інфільтрація води через шари ґрунту, особливо після зими, коли вода містить засоби для зимового утримання доріг;
- експлуатація водопропускних труб в агресивному середовищі, це пов'язано з тим, що дощова вода може містити велику кількість забруднень (сульфатів, хлоридів тощо), які посилюють корозійні процеси, крім того, забруднена вода проникає в шари насипу і змінює свої основні фізичні параметри (наприклад, зміна рН, питомий опір ґрунту, тощо).
- часті перепади температури, особливо в осінньо-зимовий період (до 0 °С і нижче/вище), що може спричинити просідання, як результат, біля сталевих конструкцій можуть з'явитися порожнини;
- пошкодження антикорозійного захисту при з'єднанні окремих елементів конструкції, це поширена причина, адже більшість монтажних робіт виконано динамометричними ключами з великим крутним моментом (до 400 Нм);

На рис. 3 зображено наслідки пошкоджень дорожніх водопропускних труб корозією, що можуть варіюватися від незначних до катастрофічних залежно від розміру, тип пошкодження, типу автомобільної дороги та навколишнього середовища [9].



а) тріщини дорожнього покриття б) просідання конструкції дорожнього одягу в) руйнування конструкції дорожнього одягу

Рисунок 3 – Типові наслідки корозії дорожньої водопропускної труби.

Figure 3 – Typical consequences of road culvert corrosion.

Первинна корозія. Первинна корозія водопропускної труби залежить від основних властивостей (фізичних, хімічних і механічних) металу з якого вона виготовлена [1].

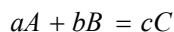
Заходи з запобігання утворення первинної корозії можна поділити на:

- проектування конструкції або її елементів таким чином, щоб забезпечити базову міцність;
- забезпечення належного захисту конструкції від агресивного середовища експлуатації.

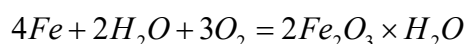
Основні фактори, що впливають на корозію металу:

- структура атомів, мікро- та макроскопічна неоднорідність, міцність на стиск і розтяг, циклічні втоми металу;
- середовище експлуатації, хімічні властивості, концентрація реакційноздатних речовин, вміст шкідливих речовин, бактерій, тиску, температури тощо;
- взаємодія метал-середовище, особливості кінетики окиснення та розкладання (розчинення) металів, кінетика відновлення в розчині, природа і розподіл продуктів корозії, можливість появи захисного покриття шару та його розкладання (розчинення).

Так, Бебен Д. запропонував виразити корозію у вигляді найпростішої хімічної реакції за формулою [10]:



де: А – метал, В – неметалевий матеріал, С – реакція продуктів, наприклад: $4Fe + 3O_2 = 2Fe_2O_3$, де продукт реакції може вважатися окислена форма металу або відновлена форма неметалу. Реакції такого типу, які вимагають присутності води або водних розчинів, називаються «сухими» корозійними реакціями, відповідна реакція у водних розчинах називається «мочною» корозійною реакцією і може бути виражена [10]:



Корозійний вплив ґрунту. При експлуатації дорожньої водопропускної труби ґрунт утворює корозійне середовище, корозія передбачає електрохімічний процес, у якому розчинення металу є анодною реакцією.

Швидкість корозії залежить головним чином від вмісту вологи та солей, а також від питомого опору ґрунту. Крім того, питомий опір ґрунту пов'язаний з його пористістю, концентрацією розчинених солей, мінерального складу, температури, а також з розміром форм зерен і їх взаємне розташування [1, 10 – 12]. Слід також зазначити, що рН ґрунту, хлориди, наявність сірки та азоту або вплив мікробіологічної активності впливає на корозію в ґрунтового середовищі. Крім того, якщо питомий опір ґрунту зменшується (через зволоження та засолення) можна очікувати, що агресивність ґрунту буде збільшуватися.

Неможливість оцінки стану конструкції з боку ґрунту є відносно великою проблемою в належному утриманні дорожніх водопропускних труб. Перші ознаки корозії можна не помітити вчасно, щоб зберегти конструкцію. Якщо корозія розвивається зі сторони ґрунту, результати впливу корозії на металеву дорожню водопропускну трубу можна побачити лише при розриванні конструкції (рис. 4) [2, 13].

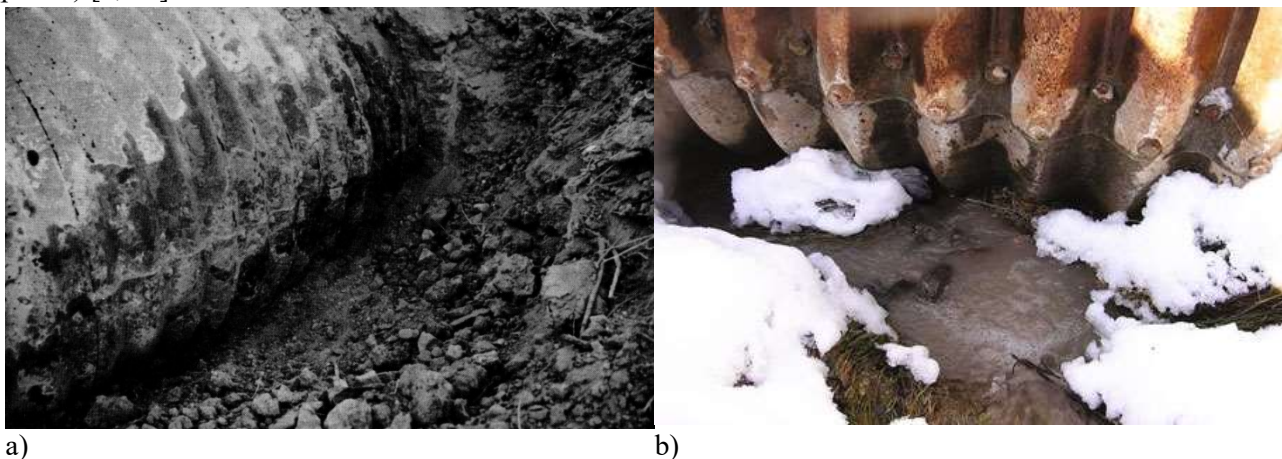


Рисунок 4 – Корозійний вплив ґрунту.
Figure 4 – Corrosive effect of soil.

В роботі [14] зазначено, що важкі органічні ґрунти можуть призвести до зростання анаеробних бактерій, які можуть знищити метал дорожньої водопропускної труби, так дослідження, проведене в штаті Вісконсін (США), виявило, що оцинкована сталь водопропускної труби, перевірена з 1972 року, була зруйнована на 31 % внаслідок дії анаеробних сульфатовідновлювальних бактерій.

В ДСТУ ISO 12944-2 [15] наведено корозійний вплив викликаний атмосферним повітрям, водою та ґрунтом.

Пришвидшення протікання корозії в дорожніх водопропускних трубах може бути виникло наступними факторами [1, 4, 16 – 18]:

- високий вміст вологи ґрунту;
- рН < 4,5 або > 8,0;
- питомий опір ґрунту < 30 Ом · м;
- наявність сульфідів, хлоридів і бактерій;
- високий ступінь аерації.

Слід підкреслити, що корозійна активність сталевих конструкцій у ґрунті зазвичай асоціюється з впливом більш ніж одного вищезгаданого факторів одночасно.

У гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб порожнечі можуть з'являтися навколо плям корозії через проникнення води та неправильне ущільнення засипки навколо металевої труби. У результаті порожнечі можуть поширюватися та мати значний вплив на загальну та локальну стійкість труби, а також може вподальшому вплинути на водопропускну спроможність самої труби. Якщо порожнечі досягають верхнього шару ґрунту, автомобільна дорога може бути пошкоджена, спричинивши руйнування конструкції.

Корозійний вплив повітря. Корозійний вплив повітря (атмосферна корозія) є найпоширенішим процесом руйнування металу (рис. 5) [19].

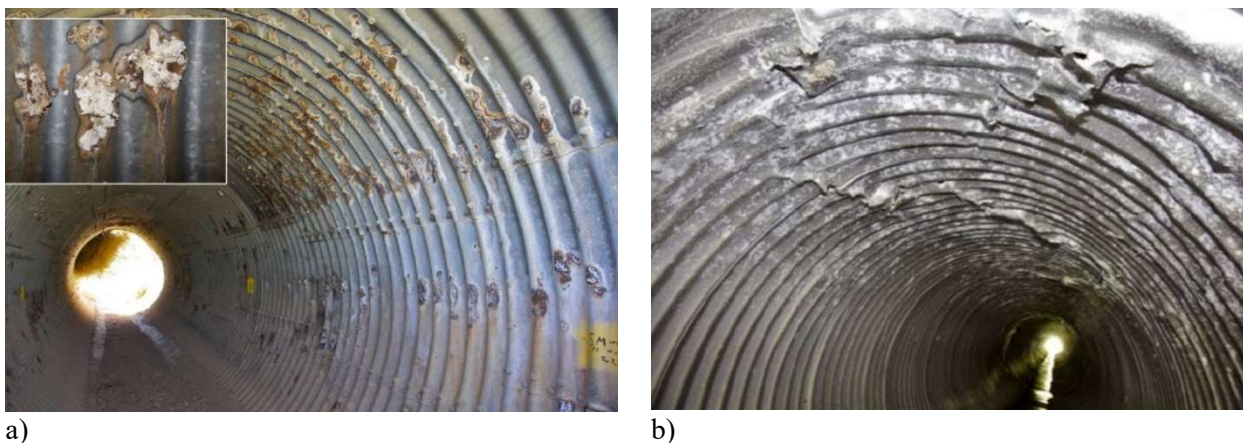


Рисунок 5 – Корозійний вплив повітря.

Figure 5 – Corrosive effect of air.

За типом повітря і за механізмом процесу корозію можна виділити за наступними типами [1]:

- сухе повітря, де відбувається хімічна корозія;
- вологе повітря, де відбувається електрохімічна корозія з кисневою деполяризацією;
- вологе повітря, де пара конденсується на поверхні сталі, утворюючи в шар води.

Критичне значення відносного вологості, від якої спостерігається швидке збільшення швидкості корозії, становить при приблизно 75 % для чистого повітря і 60 – 75 % для забрудненого.

Більшість видів забруднюючих речовин, присутніх в повітрі, впливають на швидкість корозії [1]:

- частинки в повітрі (пил; пісок; вугільний пил; сажа; хімічні сполуки в формі частинок, розсіяних у повітрі - сульфат амонію та ін.)
- частинки рідини (туман, пара, насичена газами або хімічними сполуками);
- гази (вуглекислий газ, діоксид сірки, сірководень, хлористий водень, амоній, оксиди азоту та ін.);

Частинки в повітрі, коли вони осідають на сталевих конструкціях, можуть спричинити механічні руйнування захисного шару або утворення середовища конденсації вологи. Рідина забруднення та гази, розчинені у шарі води, що покриває сталеву конструкцію, збільшують конденсацію і агресивність електроліту.

Корозійний вплив води та ерозійно-абразивні пошкодження. Корозійний вплив води та ерозійно-абразивні пошкодження є найпоширенішими дефектами дорожніх водопропускних труб. Корозія металів у воді – це електрохімічний процес, під час якого метал розчиняється в результаті анодної реакції і відновлення кисню, розчиненого у воді як катодна реакція. Лише в надзвичайно кислій воді $\text{pH} < 4$ може відбуватися виділення водню, що може мати більше практичне значення. Склад води має вирішальне значення для формування захисних шарів на металевій поверхні, а захисні шари дуже часто мають великий вплив на швидкість корозії (рис. 6) [2].

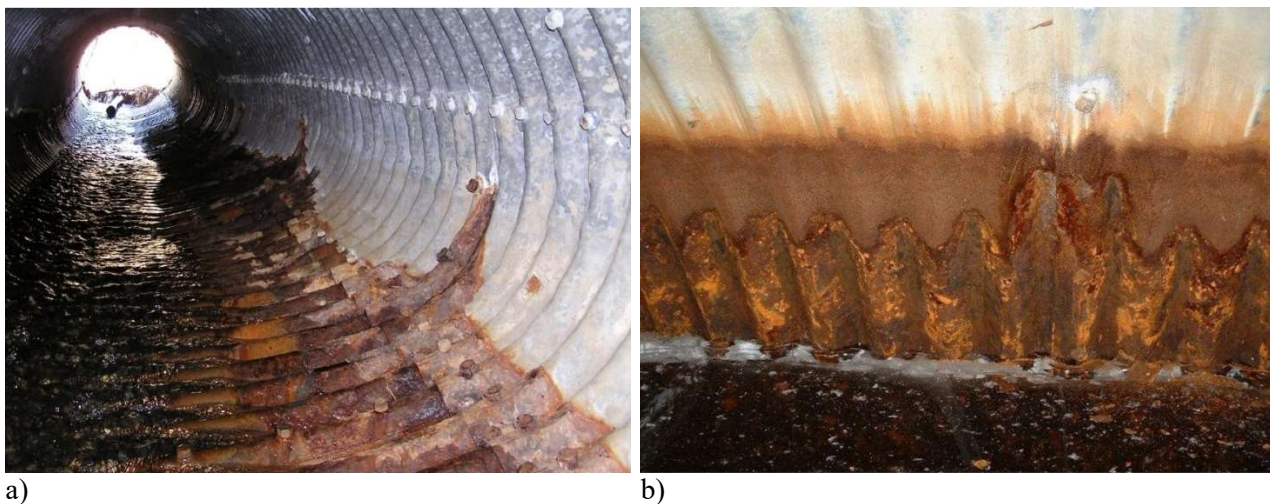


Рисунок 6 – Корозійний вплив води.
Figure 6 – Corrosive effect of water.

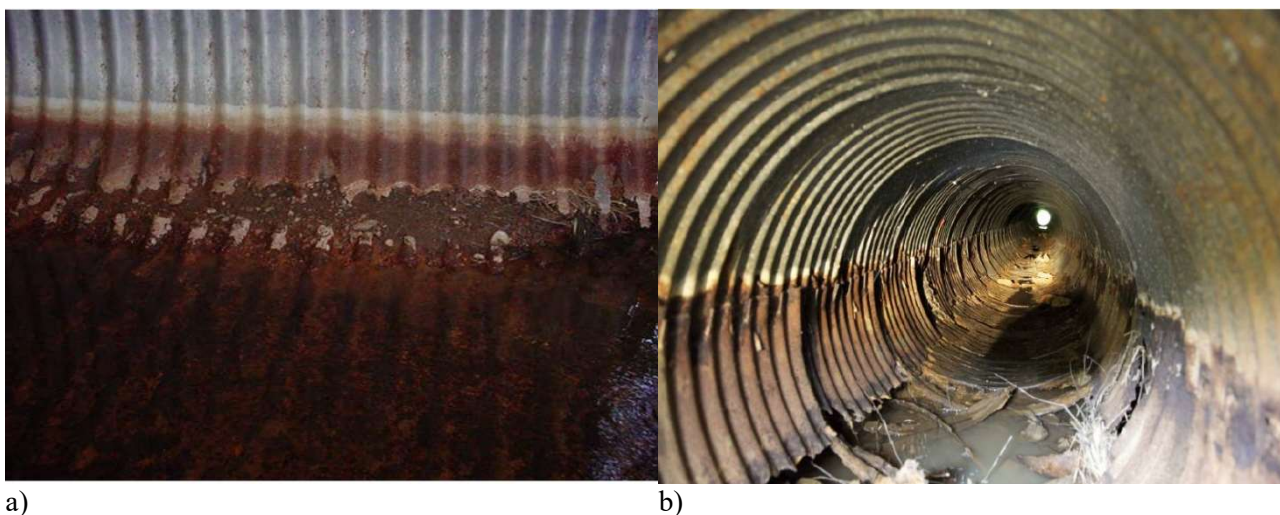


Рисунок 7 – Ерозійно-абразивні пошкодження.
Figure 7 – Erosion-abrasion damages.

Ерозійно-абразивні пошкодження є найпоширенішою причиною втрати довговічності водопропускних металевих труб, особливо там, де вода тече швидко (рис. 7) [2, 19]. Тертя прискорює корозію металу, тому наступні фази стирання необхідно використовувати при роботі конструкцій [1]:

- нестираємі: відсутність пошкоджень дна і стінок конструкцій, води швидкість потоку низька;
- низька абразивність: невеликі пошкодження дна та стінок конструкції піском, а швидкість течії води не перевищує 1,5 м/с;

– середня абразивність: середні пошкодження дна та стінок конструкції, засипана піском і гравієм, швидкість течії води коливається від 1,5 м/с до 4,5 м/с;

– висока абразивність: значні пошкодження дна та стінок конструкції засипана піском, гравієм та галькою, швидкість течії води перевищує 4,5 м/с (наявність постійної течії води).

Стираючі матеріали, такі як каміння, щєбінь, галька і пісок, можуть спричинити механічні пошкодження (знос) металу та їх захист від корозії. Проблема залежить від типу стирання/ерозії, частоти появи абразивного матеріалу у руслі водотоку, швидкість потоку та тип захисту. Абразивні речовини можуть спричинити втрату міцності, зменшення водопропускної спроможності.

Можна констатувати, що цинкове покриття легко руйнується при абразивному впливі водного потоку на нього і тому забезпечити надійний захист дорожньої водопропускних труб можна лише за умови відсутності абразивного впливу водного потоку або якщо рівень абразивної дії дуже низький.

Висновки та рекомендації.

Із збільшенням кількості гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на дорогах, особливе значення набувають питання забезпечення надійності і довговічності їх роботи в процесі експлуатації, так як має місце велика кількість деформацій, а також випадки повного руйнування труб під насипами як існуючих автомобільних доріг, так і доріг, які будуються.

Світовий досвід показує, що корозійні пошкодження є надзвичайно важливою проблемою і вимагають належної реакції на дуже ранній стадії розвитку.

В роботі наведено коротку характеристику найпоширенішим причинам виникнення корозії дорожніх водопропускних труб. Одним із методів підвищення довговічності дорожніх водопропускних труб є застосування сучасних матеріалів та технологій для їх виготовлення.

На даний час, відсутня методика оцінки довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб від ступеня розвитку корозії, тому дане питання є актуальним та потребує детального вивчення.

Перелік посилань

1. Damian Beben (2020). *Soil-Steel Bridges*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2020. P. 214. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8>.

2. El-Taher M (2009) The effect of wall and backfill soil deterioration on corrugated metal culvert stability. PhD thesis [online]. Queen's Univ Kingston, Ontario, Canada.

3. Service life of culverts. NCHRT. Synthesis of Highway Practice 474 / Transportation Research Board of the National Academies. – Washington, 2015. – 145 p.

4. Molinas A, Mommandi A (2009) Development of new corrosion/abrasion guidelines for selection of culvert pipe materials. Colorado Department of Transportation, Denver

5. Arriba-Rodriguez L-d, Villanueva-Balsera J, Ortega-Fernandez F, Rodriguez-Perez F. Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review. *Metals*. 2018; 8(5):334. <https://doi.org/10.3390/met8050334>

6. Ferreira, C.A.M.; Ponciano, J.A.; Vaitsman, D.S.; Pérez, V. Evaluation of the corrosivity of the soil through its chemical composition. *Sci. Total Environ*. 2007, 388, 250–255.

7. Shi, Y.; Yang, B.; Liaw, P.K. Corrosion-Resistant High-Entropy Alloys: A Review. *Metals* 2017, 7, 43.

8. Koch, G.; Varney, J.; Thompson, N.; Moghissi, O.; Gould, M.; Payer, J. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study; National Association of Corrosion Engineers (NACE) International: Houston, TX, USA, 2016.

9. Piratla, K.R.; Jin, H.; Yazdekhasti, S. A Failure Risk-Based Culvert Renewal Prioritization Framework. *Infrastructures* 2019, 4, 43. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4030043>

10. Beben D (2014) Backfill corrosivity around corrugated steel plate culverts. *J Perform Constr Facil* 29(6).
11. Abu-Hassanein ZS, Benson CH, Boltz LR (1996) Electrical resistivity of compacted clays. *J Geotech Eng* 122(5):397–406.
12. Samouelian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand A, Richard G (2005) Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res* 83:173–193.
13. Beaton, J. L., Stratfull, R F (1959) Corrosion of corrugated metal culverts in California. *Highway Research Board Bulletin*, № 223. P.1-13.
14. Patenaude, Robert (1984), Bacterial Corrosion of Steel Culvert Pipe in Wisconsin, *Transportation Research Record* 1001, pp 66-69.
15. ДСТУ ISO 12944-2:2019 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 2. Класифікація середовищ (ISO 12944-2:2017, IDT).
16. Cunat P.J. (2001) Corrosion resistance of stainless steels in soils and in concrete. The plenary days of the committee on the study of pipe corrosion and protection. Ceacor, Biarritz. www.euro-inox.org
17. Hepfner J.J. (2001) Statewide corrosivity study on corrugated steel culvert pipe. Report No FHWA/MT-01-001/8148. U.S. Department of Transportation/Federal Highway Administration, The State of Montana
18. Gassman S.L. (2005) Specifications for culvert pipe used in SCDOT highway applications. S Carolina Dep Transport Fed Highw Adm Univ S Carolina, Columbia.
19. Design Criteria for Rehabilitation of Circular Corrugated Metal Culverts., Transport and Main Roads, September 2013.

**ANALYSIS OF THE TECHNICAL STATE OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES OF
TRANSPORTATION CONSTRUCTION FROM ROAD WATER PERFORMANCE PIPES FROM
THE INFLUENCE OF CORROSION**

Harkusha Mykola V., Candidate of Technical Sciences, National Transport University, Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua, +380966287905, <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

Klymenko Mykola I., National Transport University, Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, +380678975852, <https://orcid.org/0000-0002-7967-5881>

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Summary. Hydrotechnical structures of transport construction from road culverts are designed for transporting and diverting water from transport structures. One of the main factors affecting the durability of a road culvert is corrosion of the metal of the pipe itself.

With the increase in the number of hydraulic engineering structures of transport construction from road culverts on roads, the issue of ensuring the reliability and durability of their operation during operation becomes of particular importance, as there is a large number of deformations, as well as cases of complete destruction of pipes under embankments.

World experience shows that corrosion damage is an extremely important problem and requires an appropriate response at a very early stage of development.

The article considered the characteristics of the most common causes of corrosion of road culverts.

Key words: highway, hydrotechnical structures, pavement, culvert, corrosion, transport structure.

References

1. Damian Beben (2020). *Soil-Steel Bridges*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2020. P. 214. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8>. [in English].

2. El-Taher M (2009) The effect of wall and backfill soil deterioration on corrugated metal culvert stability. PhD thesis [online]. Queen's Univ Kingston, Ontario, Canada. [in English].
3. Service life of culverts. NCHRT. Synthesis of Highway Practice 474 / Transportation Research Board of the National Academies. – Washington, 2015. – 145 p. [in English].
4. Molinas A, Mommandi A (2009) Development of new corrosion/abrasion guidelines for selection of culvert pipe materials. Colorado Department of Transportation, Denver.[in English].
5. Arriba-Rodriguez L-d, Villanueva-Balsera J, Ortega-Fernandez F, Rodriguez-Perez F. Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review. *Metals*. 2018; 8(5):334. <https://doi.org/10.3390/met8050334>. [in English].
6. Ferreira, C.A.M.; Ponciano, J.A.; Vaitsman, D.S.; Pérez, V. Evaluation of the corrosivity of the soil through its chemical composition. *Sci. Total Environ*. 2007, 388, 250–255. [in English].
7. Shi, Y.; Yang, B.; Liaw, P.K. Corrosion-Resistant High-Entropy Alloys: A Review. *Metals* 2017, 7, 43. [in English].
8. Koch, G.; Varney, J.; Thompson, N.; Moghissi, O.; Gould, M.; Payer, J. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study; National Association of Corrosion Engineers (NACE) International: Houston, TX, USA, 2016. [in English].
9. Piratla, K.R.; Jin, H.; Yazdekhashti, S. A Failure Risk-Based Culvert Renewal Prioritization Framework. *Infrastructures* 2019, 4, 43. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4030043>. [in English].
10. Beben D (2014) Backfill corrosivity around corrugated steel plate culverts. *J Perform Constr Facil* 29(6). [in English].
11. Abu-Hassanein ZS, Benson CH, Boltz LR (1996) Electrical resistivity of compacted clays. *J Geotech Eng* 122(5):397–406. [in English].
12. Samouelian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand A, Richard G (2005) Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res* 83:173–193. [in English].
13. Beaton, J. L., Stratfull, R F (1959) Corrosion of corrugated metal culverts in California. Highway Research Board Bulletin, № 223. P.1-13. [in English].
14. Patenaude, Robert (1984), Bacterial Corrosion of Steel Culvert Pipe in Wisconsin, Transportation Research Record 1001, pp 66-69. [in English].
15. DSTU ISO 12944-2:2019 Farby ta lakiy. Zakhyst vid koroziyi stalevykh konstruktsiy zakhysnymy lakofarbovymy systemamy. Chastyna 2. Klasyfikatsiya seredovyshch (ISO 12944-2:2017, IDT). [in Ukrainian].
16. Cunat P.J. (2001) Corrosion resistance of stainless steels in soils and in concrete. The plenary days of the committee on the study of pipe corrosion and protection. Ceacor, Biarritz. www.euro-inox.org. [in English].
17. Hefpner J.J. (2001) Statewide corrosivity study on corrugated steel culvert pipe. Report No FHWA/MT-01-001/8148. U.S. Department of Transportation/Federal Highway Administration, The State of Montana
18. Gassman S.L. (2005) Specifications for culvert pipe used in SCDOT highway applications. S Carolina Dep Transport Fed Highw Adm Univ S Carolina, Columbia. [in English].
19. Design Criteria for Rehabilitation of Circular Corrugated Metal Culverts., Transport and Main Roads, September 2013. [in English].