

**ПІДХОДИ ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ З
МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОЗИЦІЇ ВПЛИВУ КОРОЗІЇ**

**APPROACHES FOR DETERMINING RELIABILITY OF CULVERTS OF METAL
CORRUGATED STRUCTURES FROM POSITION OF CORROSION INFLUENCE**



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

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

Анотація. Дорожні водопропускні труби з металевих гофрованих конструкцій все частіше застосовуються в транспортному будівництві України. Одним із основних чинників, що впливає на довговічність дорожньої водопропускної труби є корозія металу самої труби. Корозійні пошкодження є надзвичайно важливою проблемою і вимагають належної реакції на дуже ранній стадії розвитку. Пошкодження в більшості випадків незворотні, особливо коли вони відбуваються зі сторони ґрунту. Визначення довговічності також має враховувати витрати на технічне обслуговування, які необхідно враховувати у зв'язку з вартістю заміни конструкції.

У статті розглянуто вплив середовища на корозію дорожньої водопропускної труби з металевих гофрованих конструкцій та запропоновано підхід з визначення надійності та довговічності дорожньої водопропускної труби.

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

Вступ. Дорожні водопропускні труби з металевих гофрованих конструкцій є перспективними видами споруд, будівництво яких потребує мінімальних витрат часу, незначних витрат матеріалів, а, відповідно, і відносно невеликих фінансових ресурсів.

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 підходи визначення надійності дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій з позиції впливу корозії.

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

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

Актуальність проблеми. Незважаючи на те, що дорожні водопропускні труби були побудовані з використанням різних форм поперечного перерізу, однією з найпростіших і найпоширеніших форм є кругла труба. У цьому випадку дорожня водопропускна труба будується шляхом попереднього розміщення круглої труби на шарі підготовленої основи.

Основною частиною процесу проектування водопропускних конструкцій є вибір матеріалу труб. Одним з основних матеріалів, що дає можливість виготовляти дорожні водопропускні труби великого діаметру є метал. Найчастіше металеві водопропускні дорожні труби бувають з гофрованої сталеві труби (Corrugated Steel Pipe — CSP), що виготовляються з плоского прокату зі сталі з гофрованим покриттям та конструкційні пластинчасті гофровані сталеві труби (Structural Plate Corrugated Steel Pipe — SPCSP), що складаються зі сталевих листів, гофрованих, а потім вигнутих, SPCSP розроблені для збільшення прольотів [1, 2]. Запропоновані конструкції мають додаткові заходи із захисту від корозії у порівнянні зі стандартним покриттям HDG (Hot-Dip Galvanized) [3].

Наприклад, в 2013 році в місті Кенморі, Альберта (Канада) внаслідок тривалих сильних дощів сталася велика повінь та було зруйновано практично всі малі мости та водопропускні труби, було завдано збитків, щонайменше на 6 мільйонів канадських доларів (рис. 1). При аналізі та дослідженні водопропускних труб було виявлено недоліки з проектування, значною корозією окремих елементів, а також неефективність гасників енергії, в тому числі за рахунок гідравлічного стрибка, що спричинило руйнування [4].



Рисунок 1 – Результати повені в канадському місті Кенморі
Figure 1 – The results of the flood in the Canadian city of Canmore

Варто зазначити, втрата цілісності водопропускної труби може призвести до тимчасового або довготривалого закриття руху автомобільною дорогою, а також значних витрат відновлення або повну заміну дорожньої водопропускної труби. Крім того, повне обвалення водопропускної труби може спричинити велику загрозу безпеці автомобілістів. Саме така катастрофа сталася в штаті Нью-Йорк на автомобільній дорозі I-88 28 червня 2006 р. (рис. 2) [5], воронка на Оттава-руд 174 4 вересня 2012 р. (рис. 3)[6]. Катастрофічна аварія призвела до втрати життя та майна та збитків на мільйони доларів. Тому необхідна інформаційна система стану дорожніх водопропускних труб, своєчасне технічне обслуговування дорожніх водопропускних труб.



Рисунок 2 – Аварія на автомобільній дорозі I-88
Figure 2 – Accident on I-88



Рисунок 3 – Аварія на Оттава-роуд 174
Figure 3 – Accident at 174 Ottawa Road

Стан дорожніх водопропускних труб був критичний, що і стало причиною руйнування. Дефекти дорожньої водопропускної труби здатні спричинити катастрофу (рис. 4) [1, 7].



Рисунок 4 – Критичне пошкодження дорожньої водопропускної труби
Figure 4 – Critical damage of the road culvert

Вплив середовища на корозію дорожньої водопропускної труби з металевих гофрованих конструкцій

Металеві гофровані дорожні водопропускні труби були розроблені в кінці 19 століття і використовувалися як водопропускні труби ще в 1896 році [9]. Гофрована геометрія забезпечила трубі додаткову жорсткість і міцність без збільшення товщини стінки труби, як це було б необхідно при використанні звичайної труби того ж діаметру. Завдяки нижчій початковій вартості та відносній простоті монтажу гофрований метал незабаром витіснив бетон як кращий матеріал для будівництва водопропускних труб. Однак конструктивні наслідки використання цієї нової, відносно гнучкої труби

залишалися погано зрозумілими. У 1941 році Мерлін Спенглер розробив знамениту формулу Айови [10], яка забезпечила теоретичну основу для проектування заглиблених гнучких трубопроводів. Робота Спанглера в поєднанні з інфраструктурним бумом після Другої світової війни в 1950-х і 1960-х роках призвела до поширення гофрованих металевих труб по всьому світу. Незважаючи на те, що дорожні водопропускні труби забезпечили багато переваг у той час, їхня спадщина зараз представляє широко поширену проблему через погіршення якості металу труб.

Місцеві та регіональні умови навколишнього середовища впливають на довговічність водопропускних труб, а на хімічні умови території впливають ґрунти, рослинність, кількість опадів і дренажні характеристики даного вододілу [11]. Вони, у свою чергу, впливають на ступінь деградації конструкції, викликаної корозією та стиранням.

Корозія руйнує матеріал труби через хімічні реакції, повертаючи метал до його початкового стану оксидів або солей. Цей процес, як правило, впливає на металеві труби або металеву арматуру в бетонних трубах, хоча бетонні водопропускні труби також можуть зазнавати подібної реакції, якщо вони піддаються впливу сильнолужних ґрунтів або дуже суворих умов. Корозія може виникати як зсередини, так і зовні труби, або на обох поверхнях одночасно [12]. Електричний струм тече від металу в трубі, яка зазвичай служить і катодом, і анодом, через іони в навколишньому ґрунті або воді, які служать електролітом. Ступінь результуючої корозії пропорційний виробленому струму [13].

Серйозність підземної корозії вивчалася в США на початку 1900-х років, хоча до того моменту вважалося, що така корозія завжди викликана блукаючими електричними струмами. Ранні випробування показали, що серйозна корозія може виникнути і без наявності блукаючого струму. Методи випробувань почали впроваджувати в 1928 році, коли Бюро стандартів опублікувало статтю К.Х. Логан заявив, що «випробування на корозію ґрунту показали, що потрібно враховувати структуру та хімічні властивості ґрунту, а також характер контакту між ґрунтом і трубою» [14].

Довговічність сталевих дорожніх водопропускних труб у ґрунті є функцією кількох взаємодіючих параметрів, що включають питомий опір ґрунту, кислотність (рН), вміст вологи, розчинні солі, вміст кисню (аерація) і бактеріальну активність [15, 16]. Однак усі процеси корозії передбачають перетікання струму з одного місця в інше (корозійний осередок). Таким чином, чим вищий питомий опір і/або нижча вологість ґрунту, тим більша довговічність.

Хоча виникнення корозії зазвичай є результатом впливу більш ніж одного фактора, стандарт Американської асоціації водопровідних споруд використовує питомий опір як ключове вимірювання для визначення того, чи потрібен додатковий захист від корозії [17 — 19].

Автор [18] зазначив, що питомий опір є, ймовірно, найкращим показником агресивності ґрунту.

У 1950-х роках Міністерство транспорту Каліфорнії обстежило понад 7000 водопропускних труб і розробило діаграму для прогнозування часу до першої перфорації водопропускних труб із гофрованої оцинкованої сталі на основі рН і питомого опору ґрунту [20].

В 1962 році Дж. Л. Бітон і Р. Ф. Стратфул [11] досліджували питомий опір ґрунту та рН ґрунту в залежності від кількості опадів і терміну служби гофрованих металевих водопропускних труб. Вони спостерігали, що в районах з великою кількістю опадів були високі значення питомого опору ґрунту, а рН ґрунту був менше ніж 7. У районах із низьким рівнем опадів були низькі значення питомого опору ґрунту, а рН ґрунту був більше ніж 7. Вони також відзначили, що вищий рН впливає на зниження корозії сталі, а у районах з дуже низькою кількістю опадів терміну служби оцинкованих труб

збільшується. Однак, виявлено, що сильний абразивний потік може видалити захисне покриття за один період, що значно зменшить термін служби водопропускної труби. Дж. Л. Бітон і Р. Ф. Стратфул прогнозували розрахунковий термін служби водопропускної труби цього типу від 10 до 100 років [11]

Дослідження, проведене Согрго Companies [15] у 1986 році, виявило, що довговічність із боку ґрунту, як правило, не є обмежуючим фактором при проектуванні сталевих дорожніх водопропускних труб. Однак для сталевих дорожніх водопропускних труб вміст вологи в ґрунті в першу чергу впливає на активність будь-яких присутніх іонів хлориду та прискорення корозії хлоридом. Дослідження показали, що ґрунт з вологістю нижче за 17,5 % не мають значного впливу на швидкість корозії цинкового покриття за рахунок присутності іонів хлориду. Виявлено, що більшість ґрунтів потрапляє в діапазон рН від 6 до 8, що є сприятливим для довговічності. Ґрунти с нижчим значення рН (кислі ґрунти), які зазвичай зустрічаються в районах з великою кількістю опадів, мають тенденцію бути більш корозійним.

Ґрунти з високим вмістом глини має тенденцію утримувати воду довше і тому є більш корозійними, ніж добре дренавані ґрунти. Ґрунтова волога також може містити різні розчинені тверді речовини, видалені з ґрунту, це може сприяти корозії через зниження питомого опору. І навпаки, багато хімічних речовин ґрунту утворюють нерозчинні карбонати або гідроксиди при зануреній у ґрунт металевій поверхні, це може зменшити корозію з боку ґрунту. Високий рівень хлоридів і сульфатів робить більш агресивним ґрунт [15].

На механізми руйнування впливають наявність вологи та характеристики ґрунту, включаючи тип, однорідність, щільність, вміст глини і мінералогії [21, 22]. Погіршення може статися в закопаних водопропускних трубах внаслідок корозії всередині та ерозійних пустот у оточуваному ґрунті.

Довговічність сталевих дорожніх водопропускних труб залежить від характеру пропуску води через трубу (постійний режим, тимчасовий), її заповнення. Важливим фактором може бути вплив розчинених газів. Збільшення рівня розчиненого кисню та вуглекислого газу може прискорити корозію. Найбільший важливий ефект вуглекислого газу у воді пов'язаний з його впливом на утворення захисних плівок карбонату кальцію, які часто утворюються на трубах поверхнях яких знаходиться у жорсткій воді. Розчинені солі можуть збільшити довговічність зменшуючи розчинність кисню, але можуть посилити корозію, якщо вони іонізуються та зменшують питомий опір.

Усі метали під час корозії утворюють певний тип продуктів корозії. Незалежно від того чи є вони захисними металевими покриттями, такими як алюміній або цинк, або базова сталь. Зазвичай продукт корозії, такий як оксид, зі значним стабільним накопичення призведе до зниження швидкості корозії.

На практиці продукт корозії утворюється через гальванічний елемент, може осідати в невеликих розривах у покритті та служать для придушення подальшої корозії так само, як плівки продуктів корозії захищають тверді поверхні. Таким чином, утворення окалини на металевих поверхнях є важливим фактором при використанні металів у воді, що здатні пришвидшувати розвиток корозії [14].

Багато державних установ США [23] встановлюють проектний термін служби (design service life — DSL) для будівництва інфраструктурних проектів. DSL для проектів доріг залежить від типу доріг, обсягів трафіку та майбутніх моделей зростання. Залежно від задіяного агентства, що будує, DSL доріг зазвичай коливається від 25 до 100 років.

Розрахунковий термін служби матеріалу (Estimated Material Service Life — EMSL) визначається як роки надійної служби з моменту встановлення до необхідності відновлення або заміни. EMSL труби залежить від матеріалу труби та умов навколишнього середовища.

В таблиці 1 наведено EMSL CSP з трьома різними системами покриття [24].

Таблиця 1 – EMSL CSP з трьома різними системами покриття
Table 1 – EMSL CSP with three different coating systems

Розрахунковий термін служби матеріалу для CSP			
Матеріал покриття	Розрахунковий термін служби	Умови навколишнього середовища	Максимальний рівень стирання згідно з FHWA
Оцинкована труба	приблизно 50 років	6.0 < pH < 10.0 2000 < r < 10000 Ohm-cm Жорсткість води (> 50 ppm CaCO ₃)	Рівень 2
Алюмінізована тип 2 (ALT2)	не менше ніж 75 років	5,0 < pH < 9,0 r > 1500 Ohm-cm	Рівень 2
Полімерне покриття	не менше ніж 100 років	5,0 < pH < 9,0 r > 1500 Ohm-cm	Рівень 3
	не менше ніж 75 років	4,0 < pH < 9,0 r > 750 Ohm-cm	
	не менше ніж 50 років	3,0 < pH < 12,0 r > 250 Ohm-cm	

Варто зазначити, що метод оцінки терміну служби відрізняється для оцинкованих, в порівнянні з алюмінізованими CSP типу 2 або CSP з полімерним покриттям. Оцінка всіх трьох покриттів гарантує, що матеріали труб, зазначений для проекту, відповідатиме вимоги терміну служби.

Не обов'язково, щоб EMSL труби відповідав DSL проекту. Наприклад, тротуари, настили мостів та інші частини автомагістралі, як правило, замінюються або відновлюються кілька разів протягом терміну експлуатації цієї дороги. CSP можна відновити за допомогою ковзання, мощення або іншими методами. Зараз багато агенцій США завищують розмір первинної установки труби (діаметр отвору) для подальшої її реабілітації. Більшість установ регулярно перевіряють усі водопропускні труби, незалежно від матеріалу труби, щоб забезпечити своєчасне виявлення проблем.

Вибір матеріалу для водопропускної труби повинен враховувати економіку життєвого циклу, включаючи витрати на початкове встановлення, планову перевірку, технічне обслуговування та можливе відновлення.

Найпоширенішим первинним захистом металевих водопропускних дорожніх труб є: оцинковане, алюміноване (тип 2) та полімерне [25].

В Канадському кодексі проектування автомобільних мостів (Canadian Highway Bridge Design Code — CHBDC) описує різні методи визначення вомог до покриття та розрахунки втрат металу, але ці вказівки, в повній мірі, не враховують сучасні матеріали.

Наприклад, в Канаді оцінюють допуск на корозію, використовуючи підхід оцінки терміну служби матеріалу (Estimated Material Service Life — EMSL) для показників втрати металу, визначених в AASHTO та Рекомендації з довговічності Сполученого Королівства, та наведено в таблиці 2 [25 — 27].

За останні 70 років гофровані сталеві труби пройшли процес еволюції, результатом чого стали кращі матеріали з довшим терміном служби в складних умовах. Одним із цих матеріалів є алюмінізована сталь типу 2, яка використовується на тисячах об'єктів США з 1948 року. При встановленні в рекомендованому діапазоні навколишнього середовища мінімальний термін служби алюмінізованої сталі типу 2 CSP – 75 років.

Таблиця 2 – Параметри навколишнього середовища для оцинкованої сталі
Table 2 – Environmental parameters for galvanized steel

Показники	Країна (норми)		
	США / Канада	Великобританія	
	AASHTO	UK – не агресивне середовище	UK – агресивне середовище ¹
Питомий опір	> 3 000 Ом-см	> 3 000 Ом-см ²	2 000 - 8 000 Ом-см
pH	5 — 10	6 — 9	5 — 6
Хлориди	< 100 ppm	< 50 ppm	50 - 250 ppm
Сульфати	< 200 ppm	< 240 ppm	240 - 600 ppm
Органіка	< 1 wt%	< 1 wt%	—
Твердість ¹	> 80 ppm	> 80 ppm	> 80 ppm
Примітка: 1. Тільки для водних середовищ. 2. Для водних середовищ: 2 000 – 8 000 Ом-см.			

Покриття, розроблене на початку 1970-х років, являє собою полімерну плівку товщиною 10 міліметрів, яка ламінована поверх оцинкованої сталі. При встановленні в рекомендованих діапазонах навколишнього середовища це покриття матиме термін служби понад 100 років. Труба з полімерним покриттям може бути встановлена в більш важких умовах експлуатації, ніж залізобетонна труба, і має довший термін служби. Широкий досвід експлуатації (понад 35 років) даних видів труб не показують погіршення в їх роботі [23].

Оцинкування на металеву поверхню наноситься у відповідності до AASHTO M218 [28].

Алюмінізоване покриття застосовується згідно з AASHTO M 274 [29].

Полімерне ламіноване захисне покриття — це покриття з етиленакрилової кислоти (ethylene acrylic acid — EAA), яке термічно скріплене поверх оцинкованого шару з обох боків, що прикріплюється як хімічно, так і фізично, з мінімальною товщиною 250 мкм. Даний тип покриття вперше застосовано у Вісконсіні в 1974 році та отримав численні зміни в технології нанесення та матеріалу [25]. Покриття характеризується можливістю використовувати водопропускні труби у більш агресивних умовах навколишнього середовища з максимальною швидкістю потоку через конструкцію до 4,5 м/с.

Застосування покриття з термопластичного полімеру отримало переваги в порівнянні з ламінуванням, в першу чергу, через можливість застосування його до будь-яких форм гофри. На

металеву трубу наноситься порошкоподібний полімер, який в подальшому спікається в печах при певній температурі, що дає можливість покрити трубу з мінімальною товщиною 250 мкм [30].

Термін служби полімерних покриттів були попередньо визначені шляхом співвіднесення лабораторних випробувань із результатами польового обслуговування та залежить від середовище експлуатації металевої труби, наведено в таблиці 3 [26].

Найкращим методом оцінки терміну служби водопропускної труби на запропонованих ділянках є оцінка раніше встановленої труби. Перша значна польова оцінка встановлених водопропускних труб була проведена CALTRANS (California Department of Transportation) на початку 1960-х років. Дані, отримані в ході дослідження CALTRANS 7000 водпропускних труб, були використані для розробки діаграми для оцінки середнього терміну експлуатації оцинкованих труб. Ця цифра передбачає EMSL труби на основі втрати 25 відсотків сталі в трубі. Це дослідження оцінювало термін служби CSP на основі значень рН і питомого опору. Жорсткість води не вимірювалася в місцях водопропускних труб. Після оцінки CALTRANS багато штатів США та провінцій Канади провели подібні дослідження своїх водопропускних труб. Результати були широко поширені з варіаціями через переважання м'якої води, сильний снігопад або, можливо, інтенсивне використання дорожньої солі. Результати регіональних досліджень підкреслюють важливість використання місцевої інформації за її наявності.

Таблиця 3 – Параметри навколишнього середовища та розрахунковий термін експлуатації конструкцій з полімерним покриттям

Table 3 – Environmental parameters and estimated service life of structures with a polymer coating

Показники	Термін експлуатації		
	50	75	100
Питомий опір	> 100 Ом-см	> 750 Ом-см	1 500 Ом-см
рН	3 — 12	4 — 9	5 — 9

Метод прогнозування, розроблений оцінкою CALTRANS, залежав від того, чи перевищував рН 7,3. Там, де рН постійно був меншим за 7,3, кінцевий термін служби контролювався швидкістю корозії труби, причому швидкість корозії залежала від спільного впливу рН і питомого опору. Для ділянок з рН більше 7,3 контрольним фактором була корозія ґрунту. Ці останні місця, як правило, були в напівпустельних і пустельних районах з менш ніж 10 дюймами опадів на рік. У звіті CALTRANS зазначено, що принаймні 70 відсотків труб, як очікується, прослужать довше, ніж зазначено на діаграмі для розрахунку їх довговічності [23].

В роботі [25] було проведено ефективність застосування різних видів захисту металу, випробування проводилося на стійкість до впливу сольових туманів, за результатами дослідження можна сказати, що оцинкована покриття та алюмінізоване (тип 2) є найменш стійкими до корозії, зразки були видалені з камери випробувань після 3000 годин впливу через надмірну корозію, тоді як полімерний ламінат і термопластичний полімер залишилися в експозиційній камері протягом 3500 год (рис. 5).

До початку 2000-х років нормативна база для робіт з дорожніми водопропускними трубами з металу складалася з різних радянських нормативів. Подібних підходів з впливу корозії металу на довговічність, як в США та ЄС не було, навіть на сьогоднішній день в ВБН В.2.3-218-198 [32] даних

підходів визначення впливу корозії на довговічність немає при широкому будівництві дорожніх водопропускних труб з металу.

Автором [31] було запропоновано модель, що описує поширення корозійних пошкоджень. Пошкодження, викликані корозією (переважно точковою), можуть бути представлені за допомогою напівемпіричних моделей, що описуються за допомогою функції, що полягає в пошуку максимальної глибини пошкодження, це можна записати як:

$$u(t) = \beta_0 \delta_0 t^{\eta_0}, \quad (1)$$

$u(t)$ — глибина ураження CSP пропорційно часу (t),

η_0 — середня швидкість корозії CSP (пов'язана з пошкодженнями, викликаними пасивацією),

β_0 і δ_0 — річна швидкість корозії CSP залежно від агресивності води та засипки, відповідно.



Рисунок 5 – Оцінювання впливу корозії на захисне покриття

Figure 5 – Evaluation of the effect of corrosion on the protective coating

У більш тривалий проміжок часу, після появи продуктів корозії, швидкість процесу сповільнюється, оскільки іржа є природним фізичний бар'єром. Це означає, що процес корозії відбувається постійно постійний, якщо тільки не зміниться раптова структура матеріалу або хімічний склад ґрунтового середовища, що може вплинути на кінетику корозійних процесів.

Корозійні пошкодження зазвичай представлені математичною функцією з фізичним змістом. Але найвигідніше було б отримати модель пошкодження на основі фізичного явища корозії. У цьому розділі представлено модель локалізації корозійних ушкоджень металевих гофрованих конструкцій на основі наступних припущень [33]:

— у початковій фазі (при $t = 0$) корозійні пошкодження дорівнюють 0, а швидкість корозії – скінчена;

— протягом тривалого періоду часу швидкість корозії є постійною;

— корозійні пошкодження незворотні.

Виходячи з наступних припущень, глибину корозії $u(t + \Delta)$ у металевих гофрованих конструкцій можна виразити наступним чином:

$$u(t + \Delta) = u(t) + \Delta \frac{du(t)}{dt} + \frac{\Delta^2}{2!} \frac{d^2u(t)}{dt^2} + \frac{\Delta^3}{3!} \frac{d^3u(t)}{dt^3} + \dots + \frac{\Delta^{n-1}}{(n-1)!} \times \frac{d^{n-1}u(t)}{dt^{n-1}}. \quad (2)$$

Якщо компоненти рівняння (2), що містять вторинні або вищі похідні, не аналізуються, то рівняння (2) можна виразити у такому вигляді:

$$v_{mean} = \frac{u(t + \Delta) - u(t)}{\Delta}. \quad (3)$$

Рівняння (3) відповідає середньому коефіцієнту пошкодження v_{mean} , який має тенденцію досягати миттєвих значень $\frac{du(t)}{dt}$ при $\Delta \rightarrow 0$.

Участь окислення у виникненні корозійних ушкоджень металевих гофрованих конструкціях пов'язана з утворенням концентрацій кисню всередині сталевій конструкції, які є результатом відмінностей у складі ґрунту (неоднорідності) або деяких фізичних порушень під час утворення засипки (неакуратне ущільнення ґрунту). Це вказує на те, що здатність ґрунту до окислення та відновлення (окисно-відновний потенціал *Eredox*), доповнена вимірюваннями питомого опору ґрунту, рН та електричного потенціалу, відіграє важливу роль у оцінці корозійних пошкоджень металевих гофрованих конструкціях (МГК). Проте не варто нехтувати деяким впливом мікробіологічного фактора. Особливо це стосується насичених ґрунтів, де анаеробні бактерії, особливо SRB, завдають будівельних збитків [33].

Вплив мікробіологічної корозії на окислювально-відновний потенціал і на корозійні пошкодження металевих гофрованих конструкціях (МГК) є важливим питанням, оскільки на нього часто впливають як можливість аерації ґрунту, так і здатність ґрунту переносити електрони. Хорошим

прикладом є насичені ґрунти, що містять незначну кількість кисню та іонів заліза, де відбувається відносно швидка реакція відновлення електрохімічних іонів або сульфат-іонів.

Отже, такі параметри навколишнього середовища, як рН, питомий опір ρ , окислювально-відновний потенціал E_{redox} , електричний потенціал V_e , необхідно розглядати як основні фактори, що викликають корозійні пошкодження ґрунтово-сталевих конструкцій. Отже, можна вивести наступну залежність, пов'язану з впливом середовища на даний тип споруд [33]:

$$v_{mean} = C_0 e^{[-(q1 \cdot pH + q2 \cdot \rho + q3 \cdot E_{redox} + q4 \cdot V_e)]}, \quad (4)$$

де C_0 — масштабний показник;

$q1-q4$ — константи, пов'язані з робочим середовищем конструкції.

Іншими важливими елементами, що впливають на появу корозійних пошкоджень на ґрунтових металоконструкціях, є сольові сполуки. Також хлориди і вологість, що містяться в ґрунтовому середовищі, впливають на його опір, тобто електричні властивості. Вплив температури також виражається в окисно-відновному потенціалі та електричному потенціалі. Отже, можна побудувати загальну модель з усіма елементами, але це вимагає врахування взаємозалежності окремих параметрів. Однак, з практичної точки зору, надмірне розширення моделі буде перешкоджати її використанню, тому були зроблені обмеження щодо її найважливіших елементів.

Утворення корозійних тріщин є однією з причин розвитку корозії [33]. Загалом, корозійне розтріскування під напруженням (Stress corrosion cracking — SCC) пов'язане з процесами розтріскування металів під дією двох факторів, тобто (i) сил статичного натягу та (ii) реакцій корозії, пов'язаних з дією електрохімічних факторів. Корозійне розтріскування нагадує звичайне механічне розтріскування металу, однак викликається більш складними причинами [33, 34].

Процес корозійного розтріскування металевих гофрованих конструкцій може поділятися на три основні фази, а саме [33]:

- початок розтріскування та початкове поширення тріщин (фаза i),
- стабільна фаза розвитку тріщин (ii фаза),
- збільшення швидкості розповсюдження тріщин або повного руйнування матеріалу конструкції (iii фаза).

Основним параметром, що визначає процес розтріскування, є показник інтенсивності K і критичне значення концентрації напружень K_{crit} , при якому відбувається корозійне розтріскування [35].

Існує багато механізмів, що описують процес корозійного розтріскування. Однак загалом його можна розділити на дві категорії, тобто анодні та катодні механізми. Анодні механізми містять, вплив появи гальванічних елементів всередині металевої конструкції через наявність різних фаз і забруднень. Тоді як катодний механізм оброблений від виділення водню супутнє корозійне розтріскування, яке скоріше не спостерігається в металевих гофрованих конструкціях.

Ініціювання корозійного розтріскування інженерних конструкцій дуже часто супроводжується появою локальної корозії (часто виникає в перемичках ґрунт-сталь, наприклад, біля з'єднань сталевих листів). У багатьох випадках корозійне розтріскування і локальна корозія відбуваються одночасно. Зазвичай, однак, місцеві прогнози корозії свідчать про наявність корозійної тріщини. Корозійне розтріскування починається в нижній точці від локальної корозії. В основному це результат діяльності,

так званої, виїмки, яка в даному випадку є пітингом. Насічка викликає збільшення локальних напружень, крім того, вплив агресивного середовища посилює появу корозійної тріщини. Пітинги зазвичай виникають у місцях неоднорідності поверхні та сторонніх відкладень. Перехід з місцевої корозії в корозійне розтріскування в основному залежать від: (і) геометричних умов, (іі) форми пітингу, (ііі) рівня напруг та швидкості їх зміни [33, 34, 36]

Максимальну швидкість поширення корозійно-механічної тріщини можна визначити за допомогою суперпозиційної моделі, припускаючи лінійне підсумовування елементарних ефектів:

$$\frac{da}{dN_e} = \frac{da}{dN_m} + \frac{da}{dN_{CF}}, \quad (5)$$

де: $\frac{da}{dN_e}$ — загальна швидкість поширення тріщини в даному середовищі;

$\frac{da}{dN_m}$ — швидкість механічного (втомного) розтріскування;

$\frac{da}{dN_{CF}}$ — швидкість поширення тріщини в результаті взаємодії втомного навантаження та

впливу навколишнє середовище [37].

Таким чином, швидкість розповсюдження корозійно-втомних тріщин у металевих гофрованих конструкціях повністю визначається швидкістю втомного розтріскування та впливом агресивного середовища.

Оцінка стану дорожньої водопропускної труби. Дорожня водопропускна труба піддається внутрішньому та зовнішньому руйнуванню внаслідок дії кислоти, сміття, старіння, лугів, стирання, ерозія та впливу транспортних засобів. Чим довше ці фактори впливають на дорожню водопропускну трубу, тим більше погіршується її стан. Оцінка стану як процесу узагальнено в наступні кроки [5]:

1. Вимірювання ступеня пошкодження/зношення.
2. Визначення вплив цього пошкодження/погіршення на стан об'єкта.
3. Встановлення шкали параметрів, що описують стан об'єкта в цілому.
4. Порівняння наявні пошкодження/погіршення з попередніми записами оцінки стану.

В США [5] згідно з AASHTO використовують оцінку стану споруди, яка описується від трьох до п'яти класів умов. В той час згідно з посібника каналізацій [8] розроблено державну систему з п'ятьма умовами та вважається більш досконалою та поширенішою у використанні. Згідно неї існують наступні стани:

Стан 1: (Відмінний). Немає проявів активної корозії конструкції з будь-якими вимірними втратами на перерізі. Цей стан відноситься до стану труби, де немає видимого погіршення. Час, протягом якого труба перебуває в цьому стані багато в чому залежить від застосованого покриття труби. Оскільки видимих ознак руйнування труб, не рекомендується жодних дій.

Стан 2: (Добре). Мінімальна ймовірність руйнування в короткостроковій перспективі, але ймовірність подальшого погіршення. Середня втрата зрізу менше або дорівнює 10 % товщини.

Рекомендації щодо ремонту водопропускних труб FHWA (1995) і державні DOT не підкреслили важливість очищення та фарбування на такому ранньому етапі термін служби [5].

Стан 3: (Задовільний). Обвалення найближчим часом мало ймовірно, але ймовірно подальше погіршення, включно з розбуханням поверхні виточки. Втрата перетину внаслідок активної корозії піддається вимірюванню, але не впливає на міцність або справність конструкції. Середня втрата профілю становить від 10 % до 30 % товщини. Зношені водопропускні труби можна відновити за умови, що зношена труба може забезпечити необхідну міцність конструкції протягом терміну служби, що залишився. Однак це може бути нерентабельним варіант у довгостроковій перспективі.

Стан 4: (Погано) Корозія розвинута, з ймовірним колапсом в осяжному майбутньому. Водопропускна труба демонструє важкість аналіз гарантійних втрат секції для визначення впливу на кінцеву міцність та/або експлуатаційну придатність структура. Середня втрата профілю перевищує 30 % товщини профілю. За цієї умови перспективними вважаються державні методи відновлення труб на місці.

Стан 5: (Дуже поганий) Зруйнований або крах неминучий. На цьому етапі труба не може бути відремонтована чи відновлена. Єдиний Рішення полягає в заміні новою водопропускною трубою шляхом земляних або безтраншейних технологій. Деякі з безтраншейних технологій включають ковзання труб і розрив труб.

Підходи з визначення надійності та довговічності

Надійністю водопропускної труби можна вважати ймовірність того, що вона буде працювати протягом певного періоду часу, наприклад, проектний термін служби, за його проектних умов без відмов [5]. Розподіл Вейбулла широко використовується в моделюванні надійності, оскільки інші розподіли, наприклад, експоненціальний, Релея та нормальний, є окремими випадками розподілу Вейбулла. Його розподіл часу до відмови $f(t)$ подано як:

$$f(t) = (\gamma / \theta) t^{\gamma-1} e^{-(t^\gamma) / \theta} \quad (6)$$

де θ і γ характерний ресурс і параметри форми розподілу відповідно.

Функція рівня небезпеки (або частоти відмов) $h(t)$ для розподілу Вейбулла визначається як:

$$h(t) = (\gamma / \theta) t^{\gamma-1} \quad (7)$$

Коли $\gamma > 1$, коефіцієнт ризику є монотонно зростаючою функцією без верхньої межі, яка описує область «знос», тобто вищий стан із малим залишковим терміном служби. Коефіцієнт небезпеки стає постійним для $\gamma = 1$, що характерно для розрахункового ресурсу. Коли $\gamma < 1$, рівень небезпеки становить монотонно спадна функція, яка описує ранню область інтенсивності відмов. Ці невдачі є звичайними виробничими дефектами або неправильними встановленнями та без врахування досвіду.

Надійність $R(t)$ для розподілу Вейбулла визначається як:

$$R(t) = e^{-(t^\gamma) / \theta} \quad (8)$$

І кумулятивна функція розподілу відмови $F(t)$, яка є доповненням до $R(t)$, визначається як:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-(t/\theta)^\theta} \quad (9)$$

Гнучкість моделі Вейбулла дозволяє описати частоту відмов багатьох даних, цей підхід можна застосувати для оцінки залишкового терміну служби кількох типів водопропускних труби [38, 39].

Можна показати, що характеристика параметра ресурсу, θ дорівнює $(td)^\gamma / \ln$. Отже, рівняння 7 можна змінити:

$$R(t) = e^{[-(t/t_d)^\gamma \ln(2)]} \quad (10)$$

У цьому дослідженні передбачається, що водопропускна труба вийшла з ладу, коли її надійність знизилася до 5%, а її вік досяг 150 % очікуваного проектного терміну служби.

В роботі [40] наведено визначення терміна служби в залежності від рН і питомого опору ґрунту, загалом термін служби (SL) можна виразити як:

$$SL = M_t \cdot SL_b + C(\text{Coating}) \quad (11)$$

де M_t — коефіцієнт множення для врахування змін у дорожній водопропускній трубі;
 SL_b — базовий термін служби, визначений за графіком питомий опір-рН-термін служби;
 C — константа, що є функцією типу покриття.

Діаграма питомий опір-рН-термін служби наведена в роботі [40]. Діагональні лінії, що відповідають різним лініям рН, виводяться з рівняння [20]:

$$SL_b = 17.24 \cdot [\log R - \log(2160 - 2490 \cdot \log R)] \quad (12)$$

де R — питомий опір ґрунту, Ом·см.

Для значень рН більше 7,3 рівняння терміну служби має вигляд [20, 41]:

$$SL_b = 1.84 \cdot R^{0.41} \quad (13)$$

Для визначення загального ризику відмови дорожньої водопропускної труби з металевих гофроваих конструкцій від впливу корозії можна застосувати вираз:

$$P_w = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_i) \quad (14)$$

P_1 — первинна корозія, внаслідок недоліків самої водопропускної труби, неналежного антикорозійного захисту;

P_2 — корозійний вплив ґрунту (питомий опір, рН, хлориди, сульфати, органіка, твердість тощо);

P_3 — корозійний вплив повітря (атмосферна корозія);

P_4 — корозійний вплив води та ерозійно-абразивні пошкодження.

Висновки та рекомендації.

У деяких країнах, наприклад США, Канаді чи Швеції середній термін служби дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій вважається 50 років. Однак тип і інтенсивність навантаження, забруднення навколишнього середовища, вид перешкоди, а також економічність можуть бути підставою для продовження або скорочення терміну служби. У Польщі необхідний термін служби для металевих гофрованих конструкціях становить 100 років (як у випадку типових мостів), у Великобританії навіть 120 років [33]. Багато факторів мають великий вплив на довговічність металевих гофрованих конструкціях, зокрема корозійно-абразивні процеси, експлуатаційна міцність, вибір матеріалів (грунт і сталь), пошкодження болтових з'єднань, втрата стабільності, правильне проектування, належне обслуговування, стійкість до умов місцевого середовища, напр. забруднення повітря або засоби для утримання доріг взимку.

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

В роботі наведено коротку характеристику впливу середовища на корозію дорожньої водопропускної труби з металевих гофрованих конструкцій, а також підходів визначення її довговічності.

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

Перелік посилань

1. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проблем забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації. Дороги і мости. Київ, 2022. Вип. 25. С. 190 – 202. DOI:<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190>
2. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз технічного стану гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб від впливу корозії. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Київ, 2022. Вип. 111. С. 164–173. (Фахове видання) DOI:10.33744/0365-8171-2022-111-164-173
3. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada.
4. Гаркуша М.В. Вплив пошкоджених гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на навколишнє середовище. Збірник матеріалів містить тези учасників V Міжнародній науково-технічній конференції «Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг», що проводилася 11-13 жовтня 2023 року на базі Національного університету «Львівська політехніка» у місті Львові. С. 82 — 83.
5. Jay N. Meegoda, Thomas M. Juliano and Chi Tang (2009) Culvert Information Management System – Demonstration Project New Jersey Institute of Technology Newark, NJ 07102. P. 51
6. BMROSS (2012). City of Ottawa Ottawa Road 174 at Jeanne D'Arc Pipe Collapse Root Cause Analysis Report. 2012. P.37
7. Dr. David Boyajian, Dr. Sarni Maalouf, Dr. Tadeh Zirkian, and CSUN Student Researchers (2019). California Corrugated Steel Pipe (CSP) Culvert Service Life. California Department of Transportation. P.99.
8. Sewerage Rehabilitation Manual. WRc Publications, 2001. P. 688.

9. Corrugated Steel Pipe Institute. (2009). Handbook of steel drainage & highway construction products. (2nd Canadian ed.). Canada: American Iron and Steel Institute.
10. Spangler, M. G. (1941). The structural design of flexible pipe culverts. Iowa Engineering Experiment Station. Bulletin 153
11. Beaton, J., & Stratfull, R. (1962). Field Test for Estimating Service Life of Corrugated Metal Pipe Culverts. Highway Research Board Proceedings, Vol. 41.
12. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). Highway drainage guidelines. (4th ed.). Washington, D.C.
13. Gabriel, L. H., Moran, E. T. (1998) Service Life of Drainage Pipe. Transportation Research Board, Washington, D.C.
14. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils—Past, present, and future. In Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume (pp. 95-111): ASTM International.
15. Modern Sewer Design (1995) American Iron and Steel Institute; 3rd edition. P. 306.
16. Maher, M., Hebel, G., & Fuggle, A. (2015). Service Life of Culverts. Transportation Research Board, Washington, D.C. Retrieved from <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172633.aspx>
17. Beben, D. (2014). Backfill corrosivity around corrugated steel plate culverts. Journal of Performance of Constructed Facilities, 29(6).
18. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils—Past, present, and future. In Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume (pp. 95-111): ASTM International.
19. California Department of Transportation (Caltrans), Caltrans Supplement to FHWA Culvert Repair Practices Manual, Design Information Bulletin No. 83-03, Caltrans, Sacramento, 2013
20. California Department of Transportation, Division of Construction (CalTrans). (1978). Method for Estimating the Service Life of Steel Culverts: California Test 643. Sacramento, CA.
21. Bradford, S. A. (2000). The practical handbook of corrosion control in soils.
22. Hepfner, J. J. (2001). Statewide corrosivity study on corrugated steel culvert pipe.
23. NCSPA Corrugated Steel Pipe Design Manual (2008) National Corrugated Steel Pipe Association 14070 Proton Road Suite 100 LB 9 Dallas, TX 75244. P 637.
24. Corrugated Pipe Durability Guidelines, FHWA Technical Advisory T 5040,12, October 1979, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 20590, 9 pp.
25. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada.
26. Corrugated Steel Pipe Institute. Canadian Performance Guideline for Structural Plate Corrugated Steel Pipe and Deep Corrugated Structural Plate Structures. Technical Bulletin. Issue Thirteen: October 24, 2011. Cambridge, Ontario.
27. Ault, P. White Paper: Performance Guideline for Buried Steel Structures. Elzly Technology Corporation, 2012. Ocean City, New Jersey.
28. AASHTO M 218 Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized), for Corrugated Steel Pipe
29. AASHTO M 274 Standard Specification for Steel Sheet, Aluminum-Coated (Type 2), for Corrugated Steel Pipe
30. Berry, I. Uniquely Engineered Coating for Storm Sewers and Culverts. Warner Custom Coating. Presentation, 2012. Guelph, Ontario

31. Alamilla JL, Espinosa-Medina MA, Sosa E (2009) Modelling steel corrosion damage in soil environment. *Corros Sci* 51:2628–2638
32. ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування.
33. 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>
34. Jones RH, Ricker RE (2017) Mechanisms of stress-corrosion cracking. In: Jones RH (ed) *Stresscorrosion cracking: materials performance and evaluation*, 2nd edn. ASTM International, Materials Park DOI:<https://doi.org/10.31399/asm.tb.sccmpe2.9781627082662>
35. Orlikowski J (2008) Corrosive cracking. In: Darowicki K (ed) *Corrosion processes*. Gdansk University of Technology Publisher, Gdansk.
36. Buck O, Ranjan R (1986) Evaluation of a crack-tip-opening displacement model under stresscorrosion conditions, In: Jones RH, Geberich WW(eds) *Modelling environmental effects on crack growth processes*. The Metallurgical Society;
37. Stachowiak A, Zwierzycki W (2007) Predicting the propagation rate of corrosion-fatigue cracks. *Op Probl* 4:233–240.
38. Elsayed A. Elsayed, “ReliabilityEngineering”, AddisonWesleyLongman, Inc. Reading, MA, 1996, pp. 20-26
39. Burn, L.S., Eiswirth, M. DeSilva, D., and Davis, P., “Condition Monitoring and its Role in Asset Planning”, *Pipes Wagga Wagga* 2001, Australia)
40. Molinas, A., & Mommandi, A. (2009). Development of New Corrosion/Abrasion Guidelines for Selection of Culvert Pipe Materials. P. 122.
41. Kaplan, E.L. and Meier, P. (1958) Non parametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53, 457-481. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1958.10501452>

APPROACHES FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF ROAD WATER PIPES FROM METAL CORRUGATED STRUCTURES FROM THE POSITION OF THE INFLUENCE OF CORROSION

Mykola Harkusha, 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>

Summary. Road culverts made of metal corrugated structures are increasingly used in the transport construction of Ukraine. One of the main factors affecting the durability of a road culvert is corrosion of the metal of the pipe itself. Corrosion damage is an extremely important problem and requires an appropriate response at a very early stage of development. In most cases, damage is irreversible, especially when it occurs from the soil side. The determination of durability must also take into account maintenance costs, which must be considered in relation to the cost of replacing the structure.

The article considered the influence of the environment on the corrosion of a road culvert made of metal corrugated structures and proposed an approach for determining the reliability and durability of a road culvert.

Key words: road, hydraulic structures, road clothing, road culvert, corrosion, transport structure

References

1. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analiz problem zabezpechennya nadiynosti ta dovhovichnosti hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnikh vodopropus-knykh trub v umovakh ekspluatatsiyi. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2022. Vyp. 25. S. 190 – 202. DOI:<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190>
2. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analiz tekhnichnoho stanu hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnikh vodopropusknykh trub vid vplyvu koroziyi. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhny ebudivnytstva*. Kyiv, 2022. Vyp. 111. S. 164–173. (Fakhove vydannya) DOI:10.33744/0365-8171-2022-111-164-173
3. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). *Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate*. Atlantic Industries, Canada.
4. Harkusha M.V. Vplyv poskodzhenykh hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnikh vodopropusknykh trub na navkolyshnye seredovyshe. *Zbirnyk materialiv mistyt' tezy uchasnykiv V Mizhnarodniy naukovy-tekhnichniy konferentsiyi «Vodopostachannya ta vodovidvedennya: proektuvannya, budova, ekspluatatsiya, monitorynh», shcho provodylasya 11-13 zhovtnya 2023 roku na bazi Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika» u misti L'vovi*. S. 82 — 83.
5. Jay N. Meegoda, Thomas M. Juliano and Chi Tang (2009) *Culvert Information Management System – Demonstration Project* New Jersey Institute of Technology Newark, NJ 07102. P. 51
6. BMROSS (2012). *City of Ottawa Ottawa Road 174 at Jeanne D'Arc Pipe Collapse Root Cause Analysis Report*. 2012. P.37
7. Dr. David Boyajian, Dr. Sarni Maalouf, Dr. Tadeh Zirakian, and CSUN Student Researchers (2019). *California Corrugated Steel Pipe (CSP) Culvert Service Life*. California Department of Transportation. P.99.
8. *Sewerage Rehabilitation Manual*. WRc Publications, 2001. P. 688.
9. *Corrugated Steel Pipe Institute*. (2009). *Handbook of steel drainage & highway construction products*. (2nd Canadian ed.). Canada: American Iron and Steel Institute.
10. Spangler, M. G. (1941). *The structural design of flexible pipe culverts*. Iowa Engineering Experiment Station. Bulletin 153
11. Beaton, J., & Stratfull, R. (1962). *Field Test for Estimating Service Life of Corrugated Metal Pipe Culverts*. Highway Research Board Proceedings, Vol. 41.
12. *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. (2007). *Highway drainage guidelines*. (4th ed.). Washington, D.C.
13. Gabriel, L. H., Moran, E. T. (1998) *Service Life of Drainage Pipe*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
14. Chaker, V. (1990). *Corrosion testing in soils—Past, present, and future*. In *Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume* (pp. 95-111): ASTM International.
15. *Modern Sewer Design* (1995) American Iron and Steel Institute; 3rd edition. P. 306.
16. Maher, M., Hebler, G., & Fuggle, A. (2015). *Service Life of Culverts*. Transportation Research Board, Washington, D.C. Retrieved from <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172633.aspx>
17. Beben, D. (2014). *Backfill corrosivity around corrugated steel plate culverts*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6).

18. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils—Past, present, and future. In *Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume* (pp. 95-111): ASTM International.
19. California Department of Transportation (Caltrans), *Caltrans Supplement to FHWA Culvert Repair Practices Manual, Design Information Bulletin No. 83-03*, Caltrans, Sacramento, 2013
20. California Department of Transportation, Division of Construction (CalTrans). (1978). *Method for Estimating the Service Life of Steel Culverts: California Test 643*. Sacramento, CA.
21. Bradford, S. A. (2000). *The practical handbook of corrosion control in soils*.
22. Hefner, J. J. (2001). *Statewide corrosivity study on corrugated steel culvert pipe*.
23. *NCSPA Corrugated Steel Pipe Design Manual (2008)* National Corrugated Steel Pipe Association 14070 Proton Road Suite 100 LB 9 Dallas, TX 75244. P 637.
24. *Corrugated Pipe Durability Guidelines*, FHWA Technical Advisory T 5040,12, October 1979, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 20590, 9 pp.
25. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). *Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate*. Atlantic Industries, Canada.
26. *Corrugated Steel Pipe Institute. Canadian Performance Guideline for Structural Plate Corrugated Steel Pipe and Deep Corrugated Structural Plate Structures. Technical Bulletin. Issue Thirteen: October 24, 2011*. Cambridge, Ontario.
27. Ault, P. *White Paper: Performance Guideline for Buried Steel Structures*. Elzly Technology Corporation, 2012. Ocean City, New Jersey.
28. *AASHTO M 218 Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized), for Corrugated Steel Pipe*
29. *AASHTO M 274 Standard Specification for Steel Sheet, Aluminum-Coated (Type 2), for Corrugated Steel Pipe*
30. Berry, I. *Uniquely Engineered Coating for Storm Sewers and Culverts*. Warner Custom Coating. Presentation, 2012. Guelph, Ontario
31. Alamilla JL, Espinosa-Medina MA, Sosa E (2009) *Modelling steel corrosion damage in soil environment*. *Corros Sci* 51:2628–2638
32. ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування.
33. 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>
34. Jones RH, Ricker RE (2017) *Mechanisms of stress-corrosion cracking*. In: Jones RH (ed) *Stresscorrosion cracking: materials performance and evaluation*, 2nd edn. ASTM International, Materials Park DOI:<https://doi.org/10.31399/asm.tb.sccmpe2.9781627082662>
35. Orlikowski J (2008) *Corrosive cracking*. In: Darowicki K (ed) *Corrosion processes*. Gdansk University of Technology Publisher, Gdansk.
36. Buck O, Ranjan R (1986) *Evaluation of a crack-tip-opening displacement model under stresscorrosion conditions*, In: Jones RH, Geberich WW(eds) *Modelling environmental effects on crack growth processes*. The Metallurgical Society;
37. Stachowiak A, Zwierzycki W (2007) *Predicting the propagation rate of corrosion-fatigue cracks*. *Op Probl* 4:233–240.
38. Elsayed A. Elsayed, “*ReliabilityEngineering*”, AddisonWesleyLongman, Inc. Reading, MA, 1996, pp. 20-26

39. Burn, L.S., Eiswirth, M. DeSilva, D., and Davis, P., “Condition Monitoring and its Role in Asset Planning”, Pipes Wagga Wagga 2001, Australia)

40. Molinas, A., & Mommandi, A. (2009). Development of New Corrosion/Abrasion Guidelines for Selection of Culvert Pipe Materials. P. 122.

41. Kaplan, E.L. and Meier, P. (1958) Non parametric Estimation from Incomplete Observations. Journal of the American Statistical Association, 53, 457-481.
<http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1958.10501452>

Дата надходження до редакції 28.11.2023.