УДК 669.586:621.791:669.14:620.193:620.184

№ держреєстрації 0125U001370
ІНВ. №

Товариство з обмеженою відповідальністю

«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80
Телефон / факс: +38(067) 760-49-71; mip@metinvestholding.com

ЗАТВЕРДЖЕНО

Ректор

_____ Олександр ПОВАЖНИЙ

березня 2025 р.

З В І Т

за результатами виконання науково-дослідної роботи за договором № 20257008

Дослідження структури та корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням»

Науковий керівник роботи,
д-р. техн. наук, професор _____ В.В. Кухар

Підготовку звіту завершено 13.03.2025 р.

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

Керівник роботи,
д-р. техн. наук, професор,
професор кафедри
металургії та організації виробництва В. В. Кухар

Виконавець,
д-р. техн. наук,
професор кафедри
матеріалознавства та прикладної механіки В. В. Пашинський

Виконавець,
канд. техн. наук,
доцент кафедри
матеріалознавства та прикладної механіки І. О. Бойко

РЕФЕРАТ

ЗВІТ про НДР: 89 с., 31 рис., 3 табл., 59 джерел, 3 дод.

Ключові слова: корозійна стійкість, зварні з'єднання, оцинковані профілі, лазерне зварювання, гнутозварний профіль, макроструктура, мікроструктура, прискорені корозійні випробування, антикорозійний захист, цинкове покриття, локальна корозія, експлуатаційні характеристики.

Мета роботи – Встановлення особливостей структури і корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням і обґрунтування можливість використання цієї технології виробництва з мінімальними додатковими витратами на обробку зони з'єднання після зварювання.

Завдання:

- Вибір методики прискореної оцінки корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням;

Проведення дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням в залежності від товщини металу, що зварюється;

- Проведення дослідження корозійної стійкості та можливості використання продукції, отриманої методом лазерного зварювання, при мінімальній додатковій обробці зони зварювання.

Об'єкт дослідження – зварні шви гнутозварних профілів з оцинкованої сталі, виготовлені методом лазерного зварювання.

Ці шви є ключовим елементом конструкційних профілів, які використовуються в будівництві, машинобудуванні та інших галузях промисловості. Вони піддаються дії агресивних середовищ (розчини NaCl та HCl), що може впливати на їхню корозійну стійкість та довговічність.

Предмет дослідження – корозійна стійкість зварних швів гнутозварних профілів з оцинкованої сталі, виготовлених методом лазерного зварювання, у різних агресивних середовищах (розчини NaCl та HCl).

Це включає: вплив концентрації та типу корозійного середовища на стан зварного шва та основного металу; особливості корозійних процесів у зоні термічного впливу; зміни мікроструктури зварних з'єднань після експозиції у корозійних розчинах; оцінку факторів, які можуть впливати на довговічність та надійність зварних швів (хімічний склад, наявність неметалевих включень, макро- та мікроструктура шва).

Результати та їх новизна: Результати випробувань корозійної стійкості зварних швів гнутозварних профілів з оцинкованої сталі, виконаних лазерним зварюванням, підтвердили їхню високу опірність дії агресивних середовищ. Встановлено, що після 72 годин експозиції в 5% розчині NaCl зміни поверхні шва відсутні, що свідчить про стійкість до помірної корозії. У 90% розчині NaCl спостерігаються локальні пошкодження цинкового покриття, однак корозійне руйнування шва не виявлено, що дозволяє оцінювати його стійкість як не нижчу, ніж у основного металу.

Вплив 10% HCl показав повне розчинення цинкового покриття та утворення темно-сірого шару оксидів на поверхні основного металу і шва. При цьому встановлено, що інтенсивність корозії шва не перевищує аналогічні показники для основного металу, що підтверджує однорідність матеріалу зони термічного впливу та відсутність мікрогальванічних пар, які могли б спричиняти локальне прискорене руйнування.

Мікроструктурний аналіз засвідчив, що лазерне зварювання забезпечує рівномірну дендритну структуру металу шва з відсутністю значного зростання зерна в зоні термічного впливу. Виявлено, що швидкість плавлення і кристалізації металу зменшує ризик формування неметалевих включень, які могли б стати ініціаторами корозійних процесів. Встановлено, що неметалеві включення в основному металі можуть спричиняти нестабільність зварного процесу через розбризкування та нерівномірне формування шва.

Отримані результати свідчать про те, що лазерне зварювання оцинкованих профілів забезпечує високу корозійну стійкість швів, а запропоновані технологічні заходи щодо контролю складу металу, підготовки кромок та параметрів зварювання можуть сприяти підвищенню довговічності конструкцій.

Наукова новизна:

- Виявлено, що зварний шов оцинкованих профілів, виконаний лазерним зварюванням, має корозійну стійкість на рівні з основним металом, що не відповідає типовим очікуванням щодо зварних з'єднань як потенційно вразливих до корозії зон.
- Встановлено взаємозв’язок між високошвидкісною кристалізацією металу при лазерному зварюванні та формуванням рівномірної мікроструктури шва без значних дефектів, що сприяє підвищенню його корозійної стійкості.
- Отримали підтвердження та подальший розвиток уявлення про те, що структурна однорідність металу шва, відсутність мікротріщин і рівномірний розподіл цинкового покриття мінімізують вплив агресивного середовища та знижують ризик утворення локальних осередків корозії.
- Уточнено механізми взаємодії хлоридного середовища з оцинкованими зварними профілями: встановлено, що локальні дефекти покриття можуть спричиняти поверхневі пошкодження, однак не призводять до прискореного руйнування металу шва.

Назва продукції – оцинковані гнутозварні профілі, зварені лазерним методом.

Опис продукції: Оцинковані гнутозварні профілі типорозмірів 45×45×2 мм, 40×60×1,2 мм, 80×60×2 мм, виготовлені методом лазерного зварювання, призначені для використання в будівельних конструкціях, що експлуатуються у середовищах з високим вмістом хлоридів. Профілі демонструють відсутність активної корозії після витримки протягом 72 годин у 5% розчині NaCl. За умов агресивнішого середовища (90% NaCl) на зварних швах утворюється лише поверхневий наліт, що не впливає на загальну міцність конструкції. Вплив 10% розчину HCl спричиняє руйнування цинкового покриття зі швидкістю 5-10 мкм/хв, проте сам зварний шов зберігає стійкість до корозії, порівнянну з основним металом. Гнутозварна конструкція профілів забезпечує рівномірний розподіл навантажень, а лазерне зварювання сприяє утворенню однорідної мікроструктури, що зменшує ризик локальної корозії. Оптимізація

технологічних параметрів дозволяє підвищити довговічність профілів без збільшення витрат матеріалу.

Інформація щодо впровадження: результати науково-дослідної роботи передані замовнику – ПП «ДАНВІС» за актом приймання-передачі від «12» березня 2025 року. Виконана робота задовольнила замовника. Результати роботи спрямовані на удосконалення практичної діяльності з розробки та планування виробництва гнутозварних профілів з оцинкованої сталі. Результати можуть бути корисними у навчальному процесі при викладанні на освітніх програмах за напрямами: **13** Механічна інженерія = **G** Інженерія, виробництво та будівництво, а саме **G10/136** Металургія, **G9/131** Прикладна механіка та **G8/132** «Матеріалознавство»

Рекомендації щодо використання – на підставі отриманих результатів.

Сфера застосування: металургія, матеріалознавство, будівництво, зварювання, виробництво армувальних та каркасних систем, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ, конструкції несучих елементів, науково-дослідна робота, освітні програми.

Соціально-економічна спрямованість: Робота спрямована на вирішення соціально-економічної та екологічної проблеми корозійного руйнування металевих конструкцій, що призводить до фінансових втрат, аварійності та екологічних наслідків. Дослідження корозійної стійкості оцинкованого покриття та зварних швів гнутозварних профілів сприяє підвищенню довговічності будівельних і промислових конструкцій, зниженню витрат на ремонт і експлуатацію. Металографічний аналіз корозії у швах дозволяє вдосконалити захисні методи, зменшити промислові відходи та забезпечити ефективне використання ресурсів відповідно до принципів сталого розвитку. Скорочення втрат металу сприяє зниженню викидів CO_2 та реалізації стратегій декарбонізації промисловості. Оптимізація антикорозійних рішень забезпечує економічну ефективність, безпеку та екологічну стійкість металевих конструкцій.

Умови одержання ЗВІТУ: доступ за запитом.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП……... 9

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СТАНДАРТІВ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З КОРОЗІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ ……..….. 10

Сучасні вітчизняні, міжнародні та закордонні стандарти з корозійних випробувань…….……... 10

Огляд вітчизняних та міжнародних стандартів……..…… 11

Огляд закордонних стандартів……. 16

Наукові дослідження і тенденції у сфері корозійної стійкості матеріалів……... 28

1.3 Стислий огляд комерційно доступних камер для пришвидшених випробувань на корозію…… 48

1.4 Висновки по розділу 1…….…… 53

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ….……..... 55

2.1 Дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 5-90% NaCl….. 55

2.2 Дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 10-90 %NaCl….. 56

2.2 Дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 10% HCl…….. 56

2.4 Підготовка зразків під металографічні дослідження……..……..... 58

2.5 Висновки по розділу 2……..….... 59

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ……...…… 60

3.1 Результати дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 5-90 %NaCl……. 60

Результати дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 10% 62

Дослідження мікроструктури зварних швів та зони термічного впливу…….……. 64

3.4 Висновки по розділу 3……..... 70

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ОЦИКОВАНИХ ПРОФІЛІВ…… 72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……...……....…… 75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……...…..……. 78
ДОДАТКИ……...…… 85
Додаток А. Протоколи визначення хімічного складу зварних профілів (труб)..... 85
Додаток Б. Акт приймання-передавання ……..……. 86
Додаток В. Технічний звіт....……. 87

ВСТУП

Корозійна стійкість металевих конструкцій є одним із ключових факторів їх довговічності та надійності. В умовах експлуатації у середовищах із високою вологістю та підвищеним вмістом агресивних сполук, зокрема хлоридів, виникає ризик передчасного руйнування металу, що може призводити до зниження несучої здатності конструкцій та зростання експлуатаційних витрат.

Оцинковані сталеві гнутозварні профілі широко застосовуються у будівельній та машинобудівній галузях завдяки поєднанню високої міцності та захисту від корозії. Однак технологія їх виготовлення, зокрема лазерне зварювання, створює термічно змінену зону, в якій можуть виникати мікроструктурні неоднорідності, що потенційно впливають на корозійну поведінку зварного шва. Традиційно вважається, що зварний шов є слабким місцем у захищених від корозії металевих виробах через можливу втрату цинкового покриття та утворення мікрогальванічних пар між швом і основним металом.

Враховуючи важливість корозійної стійкості для довговічності зварних профілів, дослідження поведінки їхніх зварних швів у різних агресивних середовищах є актуальним завданням. Визначення механізмів впливу хлоридних та кислотних середовищ на стан поверхні зварного шва та прилеглого металу дозволить удосконалити технологію виробництва та підвищити експлуатаційні характеристики профілів.

Дослідження виконане на замовлення **ПП «ДАНВІС»** і спрямоване на аналіз корозійної стійкості оцинкованих гнутозварних профілів у розчинах NaCl та HCl, що імітують реальні експлуатаційні умови. Отримані результати дозволяють уточнити закономірності корозійного руйнування та сформувати рекомендації щодо технологічних удосконалень у виробництві зварних профілів, що сприятиме підвищенню їхньої довговічності та конкурентоспроможності.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СТАНДАРТІВ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З КОРОЗІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Сучасні вітчизняні, міжнародні та закордонні стандарти з корозійних випробувань

Корозія металів – одна з головних проблем, що впливає на довговічність і надійність металевих конструкцій у різних сферах промисловості [1]. Щорічні втрати через корозійні пошкодження становлять значну частину світового ВВП, що зумовлює економічну доцільність впровадження ефективних методів захисту. Наприклад, Koch G. [2] каже про втрати на рівні 2,5 трильйона доларів США, що еквівалентно близько 3,4% світового ВВП, а Bender R. та ін. [3], вказують на 1,8 трильйона доларів США, що, згідно з їх даними, становить близько 3-4% світового ВВП. Не дивлячсись на деякі розбіжності в результатах, економічна доцільність впровадження ефективних методів захисту сталевих виробів від корозіє залишається актуальною задачею. Особливо це актуально для сталевих профілів, які широко використовуються у будівництві, машинобудуванні, транспортній інфраструктурі та інших галузях. Вплив атмосферних факторів, підвищеної вологості, хімічно агресивних середовищ призводить до швидкого руйнування сталі, що може викликати аварійні ситуації, підвищення витрат на ремонт і технічне обслуговування [4].

Захист сталевих профілів від корозії є важливим аспектом забезпечення їхньої експлуатаційної надійності та продовження терміну служби. Застосування різних методів, таких як цинкування, лакофарбові покриття, катодний захист та легування сталі антикорозійними елементами, дозволяє значно зменшити темпи корозійного руйнування [5–8]. Крім того, розвиток сучасних прискорених методів корозійних випробувань дає змогу прогнозувати довговічність матеріалів та оптимізувати технології їхнього захисту [9–11]. У зв’язку з глобальним трендом на екологічну безпеку, важливим є також розроблення екологічно чистих

та економічно ефективних засобів антикорозійного захисту, що сприятиме зменшенню промислових втрат і підвищенню безпеки інфраструктури.

Корозійні випробування, зокрема випробування на прискорену корозію, є важливим інструментом для оцінки довговічності металевих матеріалів і ефективності антикорозійного захисту. Вони дозволяють моделювати реальні експлуатаційні умови у стислі терміни, що значно прискорює процес розробки та вдосконалення захисних покриттів і матеріалів. Завдяки таким методам можна швидко визначити стійкість металів до агресивних середовищ, оцінити ефективність різних видів захисту (наприклад, цинкування, полімерні покриття, інгібітори корозії) та виявити потенційні слабкі місця у конструкціях ще на етапі їхнього проектування.

Зростаючі вимоги до безпеки інженерних споруд, транспорту, енергетичних систем і промислового обладнання роблять корозійні випробування незамінними у сучасному матеріалознавстві [12]. Прискорені методи, такі як випробування в камерах соляного туману, циклічні випробування у змінних кліматичних умовах або електрохімічні тести, дозволяють прогнозувати поведінку матеріалу за роки експлуатації всього за кілька тижнів чи місяців [13]. Це дає змогу не лише зменшити витрати на довготривалі польові випробування, а й оперативно впроваджувати нові, більш ефективні технології захисту, що є критично важливим для галузей із високими вимогами до надійності матеріалів.

гляд вітчизняних та міжнародних стандартів

Перелік національних стандартів в сфері захисту металів від корозії наведено, наприклад, на онлайн-ресурсі [14]. Розглянемо деякі основні стандарти, які можуть бути використання при розробці методики випробувань.

ДСТУ ISO 7384:2022 *«Корозійні випробування в штучній атмосфері. Загальні вимоги»* [15] встановлює основні принципи проведення випробувань, але не містить конкретних параметрів, таких як температура, вологість чи склад

корозійного середовища. Це обмежує його практичну застосовність, оскільки для реальних випробувань необхідно звертатися до додаткових спеціалізованих стандартів. Перевагою документа є його узгодженість із міжнародним стандартом ISO 7384:1986, що забезпечує методологічну єдність досліджень. Однак, через відсутність чітких інструкцій щодо складу штучної атмосфери, стандарт залишається лише загальним керівництвом, а не практичним регламентом для лабораторних випробувань.

ДСТУ EN 1670:2014 *«Будівельна фурнітура. Стійкість до корозії. Вимоги та методи випробування»* [16] встановлює класифікацію будівельної фурнітури за корозійною стійкістю та визначає методи випробувань, зокрема випробування в сольовому тумані. Його перевагою є чітка градація виробів за п’ятьма класами корозійної стійкості, що спрощує вибір матеріалів для різних умов експлуатації. Стандарт фокусується на прискорених лабораторних випробуваннях без врахування кліматичних умов, таких як коливання температури чи вплив забрудненої атмосфери. Використання лише методу сольового туману може не відображати повної картини корозійної поведінки матеріалів. Таким чином, стандарт є корисним для оцінки базової корозійної стійкості будівельної фурнітури.

ДСТУ EN ISO 7539-11:2022 *«Корозія металів і сплавів. Випробування на корозію під напругою. Частина 11»* [17] встановлює настанови щодо оцінки стійкості металів і сплавів до водневої крихкості та водневого розтріскування. Його перевагою є комплексний підхід до аналізу механізмів руйнування під дією водню, що важливо для нафтогазової, хімічної та енергетичної галузей. Стандарт містить лише загальні рекомендації щодо випробувань і не встановлює жорстких параметрів тестування, що ускладнює порівняння результатів між лабораторіями. Важливо зазначити, що цей стандарт не призначений для оцінки корозійної стійкості гнутих оцинкованих профілів, що обмежує його застосування у будівельній сфері. Таким чином, хоча документ є корисним для вивчення впливу водню на метали, для оцінки довговічності конкретних конструкцій необхідні додаткові дослідження за іншими методиками.

ДСТУ EN ISO 14713-1:2022 *«Покриття цинкові. Настанови та рекомендації щодо захисту від корозії конструкцій із чавуну та сталі. Частина 1. Загальні принципи проектування та корозійної стійкості»* [18] визначає базові підходи до корозійного захисту оцинкованих конструкцій, включаючи гнуті оцинковані профілі. Стандарт містить загальні рекомендації щодо вибору типу цинкового покриття та його довговічності залежно від умов експлуатації, проте не враховує специфічні особливості тонкостінних гнутих профілів, такі як внутрішні напруження та можливі деформації при гарячому цинкуванні. Також він не містить чітких методик випробувань на корозійну стійкість, що обмежує його застосування для оцінки довговічності гнутих оцинкованих профілів у лабораторних умовах. Для випробувань на прискорену або звичайну корозію слід звертатися до інших стандартів, зокрема ISO 9227 (випробування в соляному тумані) або ISO 12944 (захист сталі від корозії). Таким чином, ДСТУ EN ISO 14713-1:2022 є корисним для загального проєктування та вибору антикорозійного захисту, але недостатньо деталізованим для безпосередніх випробувань корозійної стійкості оцинкованих профілів.

ДСТУ Б В.2.6-193:2013 *«Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування»* [19] встановлює основні принципи проєктування металевих конструкцій з урахуванням їх корозійної стійкості, включаючи гнуті оцинковані профілі. Документ містить вимоги щодо вибору матеріалів, конструктивних рішень та антикорозійного захисту залежно від умов експлуатації, проте має загальний характер і не враховує специфічні особливості тонкостінних профілів, зокрема можливі залишкові напруження після гнуття. Стандарт не містить методик випробувань на корозійну стійкість, що обмежує його застосування для оцінки довговічності оцинкованих профілів у лабораторних умовах. Для визначення корозійної стійкості матеріалів та покриттів необхідно використовувати додаткові стандарти, зокрема ISO 9227 (випробування в соляному тумані) або ISO 12944 (системи захисту сталі від корозії). Таким чином, стандарт є корисним для загального проєктування антикорозійного захисту металевих конструкцій, але не містить конкретних

методів для експериментальних досліджень корозійної стійкості оцинкованих профілів.

ДСТУ ISO 9227:2015 *«Випробування на корозію в штучних атмосферах. Випробування соляним туманом (ISO 9227:2012, IDT)»* [20] регламентує методику оцінки корозійної стійкості матеріалів у штучних умовах сольового туману, що є важливим для гнутих оцинкованих профілів. Він визначає основні параметри експерименту, зокрема концентрацію розчину натрій хлориду (50±5 г/л), температуру випробування (35±2°C) і рівень pH (6,5–7,2). Тривалість тестування не є строго регламентованою та може змінюватися залежно від вимог, але документ не містить окремих рекомендацій саме для оцинкованих профілів. Однак результати, отримані в умовах сольового туману, не завжди корелюють із реальною атмосферною корозією, що може призводити до неточностей у прогнозуванні довговічності покриттів. Цей метод корисний як порівняльний тест, але його застосування для оцінки довговічності гнутих оцинкованих профілів у реальних умовах потребує доповнення іншими випробуваннями.

ДСТУ ISO 12944-5:2019 *«Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 5. Захисні лакофарбові системи (ISO 12944-5:2018, IDT)»* [21] встановлює вимоги до вибору та застосування лакофарбових покриттів для антикорозійного захисту сталевих конструкцій, що може бути релевантним і для оцинкованих гнутих профілів. У ньому визначено класифікацію середовищ за корозійною агресивністю (від C1 до C5) та рекомендовані системи покриттів для кожної категорії. Описано також вимоги до матеріалів, товщини покриття та технологій нанесення, що безпосередньо впливає на довговічність захисту. Водночас стандарт не містить методик безпосередніх випробувань корозійної стійкості, таких як тестування в сольовому тумані за ISO 9227, що може вимагати додаткових досліджень. Крім того, він більше сфокусований на лакофарбових системах, тоді як оцинковані профілі можуть потребувати альтернативних підходів до захисту та випробувань.

П

о

р

.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз стандартів з точки зору випробувань на корозію гнутих зварних оцинкованих профілів

Параметр	ДСТУ ISO 7384:2022	ДСТУ EN 1670:2014	ДСТУ EN ISO 7539-11:2022	ДСТУ EN ISO 14713-1:2022	ДСТУ Б В.2.6-193:2013	ДСТУ ISO 9227:2015	ДСТУ ISO 12944-5:2019
Основне призначення	Загальні вимоги до випробувань у штучних атмосферах	Випробування корозійної стійкості будівельної фурнітури	Визначення стійкості металів до корозії під напругою	Загальні принципи проєктування оцинкованих конструкцій	Визначення вимог до антикорозійного захисту	Випробування корозійної стійкості у сольовому тумані	Визначення та класифікація антикорозійних лакофарбових покриттів
Наявність методик випробувань	Ні, лише загальні принципи	Так, випробування у сольовому тумані	Частково, рекомендації без жорстких параметрів	Ні, описує підходи, але не містить випробувань	Ні, регламентує лише вимоги до проєктування	Так, визначає параметри випробувань	Ні, містить рекомендації щодо вибору покриттів
Тип середовища випробувань	Загальні рекомендації для штучних атмосфер	Лабораторний сольовий туман	Водневе середовище	Атмосферна корозія (без чітких параметрів)	Не аналізує вплив середовища	Лабораторний сольовий туман	Атмосферна корозія (С1–С5)
Оцінка корозійної стійкості гнутих оцинкованих профілів	Відсутні конкретні вимоги	Не застосовується (лише фурнітура)	Не враховує оцинковку	Лише рекомендації щодо цинкування, без випробувань	Лише загальні вимоги	Дозволяє оцінити швидкість корозії в лабораторних умовах	Дозволяє прогнозувати довговічність покриттів у реальних умовах
Оцінка корозії зварного шва	Ні	Ні	Так, але лише для водневої крихкості	Ні	Ні	Можлива, але не є основною метою	Може бути оцінена через довговічність покриття
Застосування до прискорених випробувань	Ні, потребує інших стандартів	Так, використовується метод сольового туману	Частково, лише для водневого руйнування	Ні, потребує ISO 9227 або ISO 12944	Ні	Так, метод прискореного випробування	Ні, фокус на довготривалому захисті
Недоліки	Відсутність конкретних параметрів та методик	Фокус лише на будівельній фурнітурі	Не враховує атмосферну корозію	Відсутність методик випробувань	Відсутність механізмів оцінки корозії	Не завжди відображає реальну корозію в експлуатаційних умовах	Фокус на лакофарбових покриттях, без оцинковки

Таким чином, найкращим стандартом для прискорених випробувань корозійної стійкості гнутих зварних оцинкованих профілів є ДСТУ ISO 9227:2015, оскільки він чітко регламентує умови випробувань у сольовому тумані. ДСТУ ISO 12944-5:2019 є ключовим для оцінки довговічності лакофарбових покриттів, однак не містить методів для оцинкованих поверхонь і

зварних швів. ДСТУ EN ISO 7539-11:2022 підходить лише для вивчення водневого розтріскування, що є важливим для зварних швів, але не дозволяє оцінити корозію в атмосферних умовах. ДСТУ EN ISO 14713-1:2022 та ДСТУ Б В.2.6-193:2013 надають загальні рекомендації, але не містять методик випробувань. ДСТУ ISO 7384:2022 і ДСТУ EN 1670:2014 мають обмежене застосування: перший є занадто загальним, а другий – підходить лише для будівельної фурнітури. Жоден із стандартів не забезпечує комплексного підходу до випробувань зварних оцинкованих профілів, тому доцільно комбінувати ДСТУ ISO 9227:2015 для лабораторних випробувань із ДСТУ ISO 12944-5:2019 для оцінки довговічності покриттів та ДСТУ EN ISO 7539-11:2022 для аналізу поведінки зварних швів.

гляд закордонних стандартів

Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, корозійної активності та описує методи оцінки агресивності навколишнього середовища щодо металевих матеріалів. Основними параметрами, що визначають корозійне навантаження, є концентрація хлоридів (Cl^-) та діоксиду сірки (SO_2) у повітрі, а також середньорічна відносна вологість та температура.

Стандарт поділяє атмосферні середовища на шість класів корозійної агресивності:

– дуже низький рівень корозії (приміщення з контрольованою вологістю).

– низький рівень (сільськогосподарські райони, помірний клімат).

– середній рівень (промислові зони, прибережні райони з невисокою концентрацією солей).

– високий рівень (портові зони, міські райони з високим рівнем SO_2).

– дуже високий рівень (морські зони, промислові райони з інтенсивним забрудненням).

– екстремальні умови (прибережні промислові райони, субтропічний клімат із високою вологістю).

Стандарт містить методики оцінки швидкості корозії сталі, оцинкованої сталі, алюмінію та міді у різних середовищах, що дозволяє прогнозувати деградацію матеріалів. Однак ISO 9223:2012 не містить конкретних лабораторних методів випробувань, а лише визначає класифікаційні параметри корозійного середовища.

Для оцінки корозійної стійкості гнутих зварних оцинкованих профілів цей стандарт є корисним як довідковий документ для визначення середовища експлуатації, але він не передбачає методики лабораторних тестувань або прискореного старіння матеріалів.

ISO 9223:2012 не є випробувальним стандартом, а належить до класифікаційних документів, що допомагають оцінити корозійний вплив реального середовища на металоконструкції.

] є найстарішим і найпоширенішим стандартом для випробувань на корозійну стійкість у штучному сольовому тумані. Методика передбачає створення контрольованого корозійного середовища шляхом розпилення 5% розчину NaCl у випробувальній камері (огляд камер наведено у параграфі 1.3). Розчин подається через спеціальні атомізатори (розпилювачі) за допомогою стисненого повітря, що дозволяє утворювати дрібнодисперсний сольовий туман. Температура камери підтримується на рівні 35 ± 2 °C, а pH розчину повинен бути в межах 6,5–7,2. Конструкція випробувальної установки включає антикорозійні матеріали, такі як пластик або скло, щоб уникнути стороннього впливу на результати тестів. Зразки розташовуються під кутом 15–30° до горизонталі таким чином, щоб не допускати конденсації крапель розчину на їхніх поверхнях. Важливою характеристикою тесту є його безперервний режим роботи: зразки перебувають у камері під дією туману без жодних перерв, що моделює агресивне корозійне середовище. Тривалість випробувань може варіюватися від 24 до 1000 годин залежно від досліджуваного матеріалу та вимог замовника.

Основний недолік ASTM B117-19 полягає в тому, що він не імітує реальні умови експлуатації, оскільки випробування проходять у стабільному середовищі без змін вологості, температури та механічного навантаження. Це обмежує його застосовність для прогнозування довговічності гнутих зварних оцинкованих профілів у реальних умовах експлуатації. Стандарт є корисним для перевірки однорідності та якості цинкового покриття, проте не дає повної картини щодо поведінки зварного шва, де можуть виникати локальні анодні та катодні зони, що значно прискорюють корозійні процеси.

Цей стандарт належить до **прискорених випробувань на корозію**, оскільки забезпечує статичне середовище без змінних факторів, які могли б прискорювати процеси деградації матеріалів.

] є модифікованою версією стандарту ASTM B117-19 і включає п’ять різних методик випробувань, що додають додаткові цикли, наближуючи тестування до реальних умов експлуатації.

Основні режими випробувань включають:

– чергування розпилення 0,35% NaCl + 0,05% H2SO4 з сухою фазою за температури 35°C. Використовується для полімерних та металевих покриттів, що застосовуються в агресивних середовищах.

– тестування в кислотовмісному сольовому тумані (NaCl + $CuCl_2$) при температурі 49°C, що широко застосовується для алюмінієвих сплавів та декоративних покриттів.

– випробування із впливом сірчистого газу (SO_2), що імітує промислові середовища з високим рівнем забруднення.

– періодичне зрошення слабким електролітним розчином із чергуванням висушування, що підходить для оцінки автомобільних покриттів.

– базовий сольовий туман із додаванням циклів висушування.

На відміну від ASTM B117-19, цей стандарт забезпечує реалістичніші умови випробувань, які краще імітують процеси корозії в природному середовищі. Це дозволяє краще оцінити довговічність зварних гнутих

оцинкованих профілів, зокрема в місцях механічного пошкодження покриття або на зварних швах.

Цей стандарт належить до **прискорених випробувань на корозію**, оскільки включає циклічні впливи, що змінюють інтенсивність корозійного процесу.

] є військовим стандартом США для випробувань матеріалів і компонентів в умовах соляного туману. Він використовується для оцінки корозійної стійкості електронних компонентів, металевих покриттів та інших конструкцій, що експлуатуються в агресивних морських і промислових середовищах.

Методика випробувань аналогічна до ASTM B117-19 і передбачає безперервне розпилення 5% розчину NaCl при температурі 35 ± 2°C. Основна відмінність полягає у жорсткіших вимогах до процедур очищення та оцінки зразків. Випробування проводяться у встановлених часових інтервалах (24, 48, 96, 240 годин), після чого визначають ступінь корозії, виявляють дефекти покриття та оцінюють його однорідність.

Цей метод використовується для виявлення прихованих дефектів у захисних покриттях, особливо на зварних швах, де можуть утворюватися локальні анодні та катодні зони, що підсилюють електрохімічну корозію. Він особливо ефективний для оцінки суцільності цинкового покриття та його здатності захищати основний метал у разі механічного пошкодження.

належить до прискорених випробувань на корозію, оскільки застосовується для швидкої перевірки стійкості матеріалів у контрольованих агресивних середовищах.

26] є військовим стандартом США, що визначає методику випробувань матеріалів і обладнання на стійкість до корозії у сольовій атмосфері. Стандарт використовується для оцінки впливу морського середовища, високої вологості та аерозолів, що містять хлориди, на металеві деталі, електроніку, лакофарбові покриття та конструкційні матеріали.

Процедура випробувань включає три основні етапи:

тап експозиції – зразки розміщують у камері, де протягом 24–96 годин безперервно розпилюють 5% розчин NaCl при температурі 35 ± 2°C.

тап відновлення – після експозиції зразки зберігають у нормальних умовах вологості протягом 24 годин для аналізу поведінки корозійних продуктів.

цінка результатів – візуальний огляд, вимірювання масових втрат та оцінка дефектів покриття.

На відміну від ASTM B117-19, цей стандарт включає етап відновлення, що дозволяє краще оцінити реальну поведінку матеріалів після впливу агресивного середовища. Метод застосовується для перевірки герметичності корпусів електронних пристроїв, стійкості захисних покриттів і конструкцій, що піддаються впливу морської води та вологих умов.

Для гнутих зварних оцинкованих профілів MIL-STD-810H, Method 509.7 дозволяє оцінити корозійну стійкість покриття, можливість утворення локальних корозійних вогнищ у зварних з’єднаннях, а також виявити порушення цілісності цинкового шару.

Цей стандарт належить до **прискорених випробувань на корозію**, оскільки включає етапи змінних умов, які впливають на динаміку розвитку корозійних процесів.

[27] є військовим стандартом США для випробувань електронних компонентів на стійкість до корозії в умовах сольової атмосфери. Він використовується для перевірки герметичності корпусів, стійкості з’єднань, захисних покриттів і приладів, що експлуатуються у морських або промислових умовах.

Основні параметри випробувань:

- Розпилення 5% розчину NaCl у контрольованому середовищі.
- Температура випробувань: 35 ± 2°C.
- Час експозиції: 48, 96 або 240 годин, залежно від вимог.
- Аналіз дефектів після впливу – оцінка пошкодження покриттів, наявність точкової корозії, перевірка електричних характеристик компонентів.

Методика MIL-STD-883K схожа з ASTM B117-19, але доповнюється жорсткішими вимогами до контролю електричних параметрів після тестування.

Для оцінки корозійної стійкості гнутих зварних оцинкованих профілів стандарт може бути застосований для аналізу зварних швів, особливо у випадках, коли оцинковані конструкції містять електронні складові або контактують з чутливими елементами.

Цей стандарт належить до **прискорених випробувань на корозію**, оскільки передбачає контрольоване корозійне навантаження у визначених умовах.

Environmental testing – Part 2-52: Tests – Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium chloride матеріалів у циклічному сольовому тумані.

На відміну від традиційного методу безперервного впливу сольового туману (ASTM B117-19), цей стандарт передбачає випробування з чергуванням фаз:

аза розпилення – зразки піддаються впливу сольового туману (NaCl 5%) при температурі 35°C.

аза конденсації – після розпилення зразки перебувають у середовищі з високою вологістю (>95%) при підвищеній температурі.

аза висихання – зразки витримуються у сухому середовищі, що дозволяє відтворити природний процес зміни погодних умов.

Залежно від категорії захисту, випробування можуть тривати від 2 до 28 циклів.

Ця методика є більш реалістичною, оскільки враховує циклічність природних процесів корозії. Для зварних гнутих оцинкованих профілів IEC 60068-2-52:2017 є особливо корисним, оскільки дозволяє оцінити деградацію покриття в місцях механічних пошкоджень і на зварних швах.

належить до прискорених випробувань на корозію, оскільки включає циклічний вплив середовища, що пришвидшує корозійні процеси.

] описує методи оцінки деградації захисних покриттів після випробувань у корозійному середовищі.

Стандарт використовується для оцінки якості адгезії, стійкості до відшарування та рівня пошкодження захисних покриттів після впливу сольового туману, вологого середовища або інших корозійних факторів. Методика включає:

- Візуальну оцінку пошкоджень відповідно до рейтингової шкали ASTM.
- Вимірювання відшарування покриття на зразках із подряпинами або механічними пошкодженнями.
- Аналіз впливу корозійного середовища на фарбові покриття після визначеного часу випробувань.

ASTM D1654-08 є корисним для оцінки захисних властивостей покриттів на гнутих зварних оцинкованих профілях, оскільки дозволяє аналізувати ефективність захисту на різних ділянках, включаючи зварні шви та механічні пошкодження.

Цей стандарт належить до **випробувань на корозію**, оскільки оцінює ефективність покриттів у реальних умовах, але він **не є стандартом прискорених випробувань**, оскільки не передбачає змінних факторів впливу.

[30] є керівництвом щодо лабораторних випробувань металів методом занурення у контрольовані корозійні середовища. Він використовується для оцінки швидкості корозії металів і сплавів, визначення стійкості захисних покриттів та аналізу механізмів корозійного руйнування.

Методика випробувань передбачає занурення зразків у рідке середовище з контрольованими параметрами. Основні види корозійних середовищ:

- **Розчини мінеральних кислот (HCl, H_2SO_4, HNO_3)** – для оцінки стійкості матеріалів у сильно кислих умовах (наприклад, хімічна промисловість, очисні споруди).
- **Розчини органічних кислот (оцтова, лимонна кислота)** – для дослідження корозії в харчовій та фармацевтичній промисловості.
- **Лужні розчини (NaOH, KOH)** – для тестування матеріалів, що контактують із високими pH середовищами.

- **Хлоридні розчини (NaCl, $CaCl_2$, морська вода)** – для моделювання корозії в морському середовищі або у сольових ваннах.
- **Спеціалізовані середовища (розчини $FeCl_3$, NH_4Cl)** – для аналізу точкової корозії та корозії щілинного типу.

Основні параметри тестування:

- **Температура випробувань** – зазвичай у діапазоні від 20°C до 80°C, залежно від реальних умов експлуатації.
- **Час експозиції** – від кількох годин до кількох місяців для аналізу довготривалих ефектів корозії.
- **Перемішування розчину** – може бути статичним або з перемішуванням для відтворення турбулентності потоку.
- **Оцінка корозійних пошкоджень** – визначення втрати маси, глибини корозійного руйнування, аналіз корозійних продуктів.

Застосування для зварних гнутих оцинкованих профілів

Цей стандарт є корисним для оцінки довговічності цинкового покриття та поведінки зварних швів в агресивних середовищах, особливо при контакті зі слабкими кислотами або хлоридними розчинами. Однак метод занурення не враховує реальних атмосферних умов, циклічних змін температури та механічних навантажень, що може впливати на реальну корозійну поведінку матеріалів.

належить до випробувань на корозію, оскільки забезпечує оцінку корозійної стійкості матеріалів у контрольованих середовищах, але **не є прискореним методом**, оскільки не включає змінні умови впливу.

Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Part 2: Water покриттів до впливу рідких середовищ шляхом повного або часткового занурення зразків у тестову рідину.

Методика випробувань та параметри тестування: згідно з ISO 2812-2, зразки з покриттям занурюють у випробувальну рідину за визначених умов, після

чого оцінюють ступінь пошкодження покриття та можливі зміни його фізико-хімічних властивостей. Основні параметри тестування включають:

- **Тип рідкого середовища** – стандарт передбачає використання води або водних розчинів (наприклад, морської води, слабких кислот або лугів), але не регламентує тестування у висококонцентрованих агресивних середовищах.
- **Температура занурення** – зазвичай 23 ± 2°C або 40 ± 2°C, проте допускаються інші значення залежно від експлуатаційних умов.
- **Час експозиції** – може варіюватися від 24 годин до кількох тижнів залежно від специфікації матеріалу.
- **Методи оцінки** – після випробувань визначають зміну кольору, блиску, наявність здуттів, тріщин, відшарування, розм'якшення або утворення пухирців.

Застосування для зварних гнутих оцинкованих профілів**:** ISO 2812-2:2018 є корисним для оцінки поведінки лакофарбових покриттів у контакті з водою або слабкими водними розчинами, однак він має суттєві обмеження для аналізу корозії металів, особливо оцинкованих профілів. У стандарті не розглядається вплив електрохімічної корозії та механічних напружень, що можуть виникати у зварних швах або в місцях пошкодження покриття.

Методика не моделює природні атмосферні умови та не враховує змінні фактори, такі як вологість, УФ-випромінювання чи термоциклічні навантаження, які є важливими для реальної експлуатації металоконструкцій. Тому цей стандарт може бути використаний лише як додатковий тест для первинної оцінки адгезії та водостійкості покриттів, але не для повної оцінки довговічності оцинкованих зварних профілів.

належить до випробувань на корозію, оскільки оцінює вплив рідких середовищ на покриття, але **не є прискореним методом**, оскільки тестові умови є статичними та не враховують циклічних змін впливу.

Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking in Hydrogen Sulfide (H_2S) Environments» [32] встановлює методику випробувань на корозійну

стійкість металів у водних середовищах, що містять сірководень (H_2S). Цей стандарт використовується для оцінки стійкості матеріалів до сульфідного розтріскування під напругою (SSC – Sulfide Stress Cracking), що є серйозною проблемою для металевих конструкцій у нафтовій, газовій та хімічній промисловості.

Методика випробувань та параметри тестування: випробування передбачають занурення металевих зразків у водні розчини, насичені H_2S, при контрольованих параметрах:

- **Концентрація H_2S** – визначає агресивність середовища.
- **Температура випробувань** – зазвичай у межах 25–90°C, що відповідає реальним умовам експлуатації.
- **pH середовища** – підтримується у контрольованому діапазоні, оскільки зниження pH сприяє інтенсифікації корозійних процесів.
- **Час експозиції** – може варіюватися від 96 до 720 годин залежно від досліджуваного матеріалу.
- **Напружений стан зразків** – тестування може проводитися на зразках, що зазнають механічного навантаження, для моделювання реальних умов роботи матеріалу під напругою.

Оцінка результатів включає виявлення мікротріщин, втрат маси, зміни механічних властивостей та ступеня деградації захисних покриттів.

Застосування для зварних гнутих оцинкованих профілів: цей стандарт не є оптимальним для прямої оцінки корозійної стійкості гнутих зварних оцинкованих профілів, оскільки він розроблений переважно для матеріалів, що використовуються в середовищах з високим вмістом H_2S (наприклад, трубопроводи, резервуари, нафтові та газові установки). Однак він може бути корисним для оцінки корозійної поведінки зварних швів, особливо якщо оцинковані профілі експлуатуються в сірководневих або сульфатних середовищах. У таких випадках оцінка SSC може допомогти визначити ризики утворення тріщин у зварних з’єднаннях та зони термічного впливу (HAZ).

Основним обмеженням стандарту є його вузька спеціалізація на H_2S-корозії, тоді як для оцінки стійкості оцинкованих профілів у більш типових середовищах (морська вода, промислові аерозолі) потрібні додаткові методики. **належить до випробувань на корозію**, оскільки оцінює вплив агресивних середовищ на метали, але **не є прискореним методом**, оскільки не моделює змінні кліматичні умови та не враховує комбіновані впливи механічного та корозійного навантаження.

Аналіз зазначених стандартів та їх систематизація наведені у табл. 1.2.

Таким чином, аналіз стандартів випробувань на корозію показує, що для оцінки довговічності зварних гнутих оцинкованих профілів найкраще підходять методики, які враховують змінні фактори впливу, зокрема циклічність корозійного середовища, наявність механічних пошкоджень покриття та локальну корозію в зоні зварного шва. До таких методів належать ASTM G85-19, MIL-STD-810H, IEC 60068-2-52 та ASTM G31-21. Вони дають можливість досліджувати корозійні процеси в умовах, максимально наближених до реальних.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз стандартів з точки зору випробувань на корозію гнутих зварних оцинкованих профілів

Стандарт	Тип випробувань	Основний метод	Умови тестування	Призначення	Прискорений метод	Застосування до зварних гнутих оцинкованих профілів	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ISO 9223:2012	Класифікація середовищ	Оцінка корозійної агресивності атмосфери	Концентрація Cl^-, SO_2, вологість, температура	Визначення класу корозійної активності	✗ Ні	⚠ Частково (визначає середовище експлуатації, але не передбачає лабораторних випробувань)	Допомагає оцінити рівень корозійного впливу в реальних умовах	Не містить методики випробувань, не враховує корозію швів
ASTM B117-19	Прискорені корозійні випробування	Сольовий туман (5% NaCl)	35°C, pH 6,5–7,2, безперервний туман	Оцінка корозійної стійкості металів і покриттів	✓ Так	⚠ Частково (оцінює цинкове покриття, але не поведінку шва)	Простий, широко використовуваний метод	Не імітує реальні змінні умови експлуатації
ASTM G85-19	Модифіковані корозійні випробування	Циклічний сольовий туман	Вологість, сушка, кисле середовище	Більш реалістична імітація	✓ Так	✓ Так, дозволяє оцінити корозію швів	Враховує змінні впливи, наближені до реальних умов	Складніші процедури, вимагає

Стандарт	Тип випробувань	Основний метод	Умови тестування	Призначення	Прискорений метод	Застосування до зварних гнутих оцинкованих профілів	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
				корозійних процесів				спеціального обладнання
MIL-STD-202G, Method 101E	Військові корозійні випробування	Сольовий туман (5% NaCl)	35°C, строгий контроль чистоти зразків	Електронні компоненти, металеві покриття	✅ Так	⚠ Обмежено (оцінює цинкове покриття, але не шви)	Висока точність контролю	Обмежене застосування для металоконструкцій
MIL-STD-810H, Method 509.7	Корозійні випробування з відновленням	Сольовий туман + фаза відновлення	35°C, 24–96 год туману + 24 год відновлення	Оцінка довговічності покриттів	✅ Так	✅ Так, дозволяє оцінити деградацію швів	Враховує процес відновлення матеріалу після корозійного впливу	Триваліші випробування
MIL-STD-883K, Method 1009.8	Корозійні випробування для електроніки	Сольовий туман (5% NaCl)	35°C, 48–240 годин	Оцінка електронних компонентів	✅ Так	❌ Ні, не застосовується до металоконструкцій	Враховує вплив корозії на електропровідність	Не оцінює корозію металевих швів
IEC 60068-2-52:2017	Циклічні корозійні випробування	Чергування сольового туману, вологи та висушування	35°C, змінні цикли	Оцінка автомобільних і морських матеріалів	✅ Так	✅ Так, оцінює поведінку зварних швів у змінних умовах	Найбільш реалістичний метод	Вимагає складного обладнання
ASTM D1654-08	Оцінка покриттів після корозії	Візуальна оцінка, вимірювання адгезії	Тестування після корозійного впливу	Аналіз захисних покриттів	❌ Ні	⚠ Частково (аналізує покриття, але не корозію металу чи швів)	Оцінює ефективність фарб та покриттів	Не враховує корозію металевих з'єднань
ASTM G31-21	Корозія в рідкому середовищі	Занурення у корозійні розчини	Вода, кислоти, луги, хлориди	Оцінка швидкості корозії металів	❌ Ні	✅ Так, може використовуватися для тестування швів	Простий метод, не вимагає складного обладнання	Не враховує змінні умови експлуатації
ISO 2812-2:2018	Стійкість покриттів до рідин	Занурення у воду або водні розчини	23–40°C, 24 год – кілька тижнів	Лакофарбові покриття	❌ Ні	⚠ Частково (аналізує тільки покриття, а не метал)	Визначає водостійкість покриттів	Не оцінює металеву корозію
NACE TM0172-2015	Корозія у середовищах з H_2S	Занурення в сульфідні розчини	25–90°C, контроль pH, 96–720 годин	Нафтогазова, хімічна промисловість	❌ Ні	⚠ Обмежено (тільки для сульфідних середовищ)	Аналізує корозійне розтріскування	Не підходить для стандартних оцинкованих конструкцій

Водночас традиційні випробування у камерах сольового туману (ASTM однак не дозволяють коректно відтворювати поведінку металу у місцях механічного пошкодження або зварних з'єднаннях. Деякі методи, такі як ASTM D1654-08 та ISO 2812-2:2018, фокусуються лише на поведінці захисних покриттів і не оцінюють вплив корозії на сам метал.

На основі цих висновків можна розробляти методики прискореного випробування корозійної стійкості, орієнтуючись на модифіковані методи, що імітують комбіновані впливи. Одним із таких підходів є використання часткового занурення зразків у соляні ванни з контрольованим випаровуванням, що дасть змогу оцінити поведінку матеріалу у перехідних зонах між середовищами. Такі випробування можуть стати економічно ефективною альтернативою камерам сольового туману, дозволяючи відтворювати реалістичні умови експлуатації та отримувати дані для прогнозування довговічності зварних оцинкованих профілів.

Наукові дослідження і тенденції у сфері корозійної стійкості матеріалів

Корозія металів є однією з найважливіших проблем сучасного матеріалознавства та інженерії, що впливає на довговічність конструкцій у будівництві, транспорті, енергетиці та промисловості, і, як показано в роботах [1, 3, 5], її дослідження охоплює як вивчення механізмів руйнування матеріалів, так і розробку методів їх захисту та прогнозування поведінки в агресивних середовищах.

Похмурським В. І. [1] розглянуто корозійно-механічне руйнування металів із врахуванням особливостей зварних з’єднань. Наведено результати електрохімічного тестування оцинкованої сталі у хлоридних розчинах (5% NaCl, 0,1M Na_2SO_4), що виявили значне зміщення електродного потенціалу в зварних швах у бік анодного розчинення. Використано методику гравіметричного аналізу для визначення швидкості втрати маси металу в процесі корозії. Показано, що на ділянках, де захисний шар цинку було втрачено під час зварювання, відбувається локальне прискорене руйнування основного металу, що підтверджено аналізом топографії поверхні після експозиції. Також досліджено ефективність додаткових методів захисту, зокрема пасивації хроматними розчинами та використання бар’єрних полімерних покриттів, що забезпечують кращий захист у середовищах з високим вмістом хлоридів.

У статті Bender R. та ін. [3] досліджено вплив навколишнього середовища на корозійні процеси, зокрема атмосферну корозію, що відбувається під впливом вологи, температури та забруднюючих газів (SO_2, NO_x, Cl^-). Використано методи прискореного тестування у змінних умовах вологості та температури (цикли 35–55°C, 90–100% вологості (RH)) для моделювання реальних експлуатаційних умов. Дослідження показало, що традиційні захисні системи, такі як гаряче цинкування, мають обмежену ефективність у морських та промислових умовах, оскільки хлориди та сульфіди значно прискорюють деградацію цинкового покриття. Наведено результати тестування композиційних покриттів (Zn-Al-Mg), які демонструють кращу стійкість у соляних аерозолях. Також розглянуто механізм самовідновлення оксидних захисних шарів, що критично важливо для довговічності оцинкованих конструкцій із пошкодженим покриттям.

У роботі Manu K. C. Та ін. [5] проведено всебічний аналіз механізмів корозії сталевих конструкцій, включаючи рівномірну корозію, точкову корозію, корозійне розтріскування під напругою, гальванічну корозію та ін. (див. рис. 1.1).

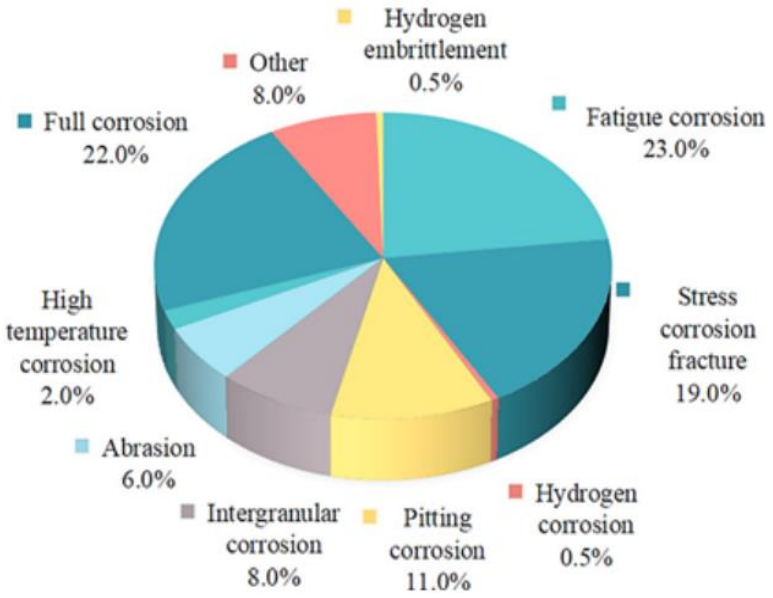


Рисунок 1.1 – Пропорції розповсюдженості різних форм корозії [5]

Досліджено вплив захисних покриттів, зокрема цинкових і полімерних, на довговічність металів у різних середовищах. Особлива увага приділена поведінці сталі в умовах підвищеної вологості, що моделювалося шляхом експозиції

зразків у камерах зі штучним кліматом. Використано метод сольового туману (5% NaCl, 35°C, експозиція 240–1000 годин) та метод занурення у корозійні розчини (0,1M HCl, 0,5M H_2SO_4) для оцінки швидкості корозійного руйнування. Досліджено адгезійні властивості покриттів та їхню ефективність після механічного пошкодження, зокрема в зварних з'єднаннях. Показано, що втрата цинкового шару в зоні зварювання значно прискорює локальну корозію сталі, утворюючи анодні зони у місцях дефектів покриття.

У дослідженні Feng Z. Та ін. [33] оцінено прискорені корозійні випробування покритих алюмінієвих сплавів AA7075-T6 з використанням гальванічних з'єднань. Випробування проводили у камері сольового туману за стандартом ASTM B117 та в розчинах 5% NaCl при кімнатній температурі. Досліджувались два типи кріплень: з нержавіючої сталі SS316 та титанових сплавів Ti-6Al-4V, що дозволило оцінити вплив гальванічної корозії на деградацію покриття. Методика включала вимірювання гальванічного струму за допомогою амперметра нульового опору (ZRA) протягом 3 тижнів експозиції. Встановлено, що SS316-елементи створювали значно вищий катодний струм, що спричиняло інтенсивніший корозійний процес у порівнянні з титановими сплавами.

Для аналізу пошкоджень покриття використовували оптичну профілометрію (Veeco Contour GT-K), що дозволило оцінити глибину та об'єм корозійних уражень. Було встановлено, що експозиція в ASTM B117 призводила до сильнішого корозійного ураження у порівнянні з зануренням у 5% NaCl, що пояснюється підвищеною температурою (35°C) і доступністю кисню в камері туману. Для оцінки деградації покриттів застосовано два підходи: вимірювання загальної втрати маси (через інтегрування гальванічного заряду за законом Фарадея) та топографічний аналіз кородованих ділянок. Виявлено, що зразки з SS316-елементами втрачали масу швидше (коефіцієнт прискорення корозії становив 45 без фінішного покриття і 25 з топкоутом), тоді як титанові кріплення забезпечували меншу електрохімічну активність (коефіцієнти 12 і 7 відповідно).

Окрім того, аналізували вплив двох систем покриттів: одна містила хроматний епоксидний ґрунт (MIL-PRF-23377), а друга – фосфатно-адгезійний праймер із збагаченим на Pr покриттям. Встановлено, що перша система краще протидіє локальній корозії, зокрема в зоні пошкодженого покриття (свідомо нанесені подряпини глибиною 400 мкм). Важливим висновком є те, що топкоут незначно впливає на рівень гальванічної корозії, що підкреслює ключову роль ґрунтових покриттів у захисті алюмінієвих сплавів.

Отримані результати підтверджують ефективність методики ASTM B117 для швидкого оцінювання довговічності захисних покриттів, зокрема в умовах інтенсивного гальванічного впливу. Це дослідження [33] є корисним для вибору оптимальних систем покриттів для зварних оцинкованих профілів, оскільки подібні процеси можуть розвиватися на місцях втрати цинку при зварюванні.

Сучасні дослідження в галузі прискорених корозійних випробувань металів [34–43] спрямовані на аналіз впливу складу сплавів, методів обробки та експлуатаційних умов на корозійну стійкість, що дозволяє оцінювати довговічність матеріалів у реальних та лабораторних середовищах, а також вдосконалювати методи захисту та прогнозування деградації конструкцій.»

У статті Нарівського О. Е. та ін. [34] досліджено корозійну поведінку аустенітних сталей (AISI 304, 08Х18Н10, AISI 321, 12Х18Н10Т) у водних середовищах з концентрацією хлоридів 350–600 мг/л при pH 4–8. Використано методи потенціодинамічної поляризації та електрохімічного імпедансного спектроскопічного аналізу. Встановлено, що критична температура пітінгування зростає зі збільшенням pH середовища та концентрації хрому в сталі. Максимальна корозійна швидкість зафіксована при 500 мг/л Cl^- у кислому середовищі (pH 4). Одержані дані дозволяють прогнозувати корозійну стійкість теплообмінних пластин, що працюють у реальних умовах.

У роботі Воденнікова С. А. та ін. [35] запропоновано методику прискорених випробувань корозії багатофазних металоконструкцій з використанням електрохімічних тестів. Дослідження проведено в модельних розчинах 0,1М NaCl, 0,01М H_2SO_4 при 40°С. Вимірювання швидкості корозії

проводилося за допомогою техніки лінійної поляризації та гравіметричного аналізу. Виявлено, що зони гетерогенності металу (зварні шви, ділянки після термічної обробки) кородують швидше на 25–30% порівняно з основним металом. Методика рекомендована для оцінки довговічності металоконструкцій у реальних умовах експлуатації.

використовував методики прискорених випробувань корозії металів, зокрема сольовий туман (ASTM B117), випробування в ацетатному сольовому тумані з додаванням міді (Copper-Accelerated Acetic Acid Salt Spray, CASS, ASTM B368), тестування у 100% вологості (ASTM D2247) та модифіковані циклічні методи (рис. 1.2) при 35°C з 5% розчином NaCl та pH 6,5–7,2, а тривалість варіювалася від 48 до 2000 год. CASS-тест передбачав додавання 0,25 г/л $CuCl_2$ до 5% NaCl при підвищеній температурі (49°C), що значно пришвидшувало корозійні процеси. Дослідження показало, що методи, засновані на постійному контакті з агресивним середовищем, зокрема ASTM B117, забезпечують високу відтворюваність результатів, проте можуть не враховувати зміну вологісного режиму, яка є характерною для реальних умов експлуатації. Було встановлено, що циклічні методи, які включають чергування фаз змочування та висушування, а також вплив газоподібних агентів (SO_2), краще імітують природні процеси корозії, проте вимагають складнішого контролю параметрів та довшого часу тестування.

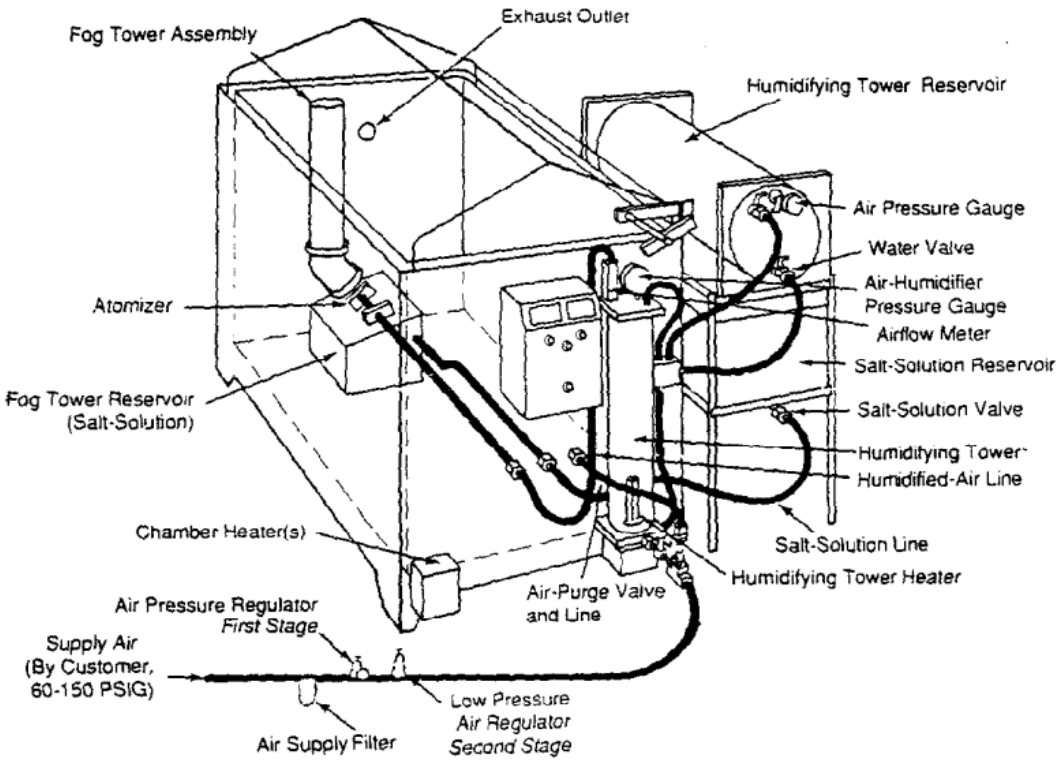


Рисунок 1.2 – Ескіз випробувальної камери сольового туману

Montoya P. та ін. [37] провели дослідження прискорених корозійних випробувань атмосферостійких сталей з використанням циклічних методів «Cebelcor», «Kesternich» і «Prohesion». Дослідження охоплювало два типи сталей – атмосферостійку (ASTM A242 Type 1) та вуглецеву, які піддавалися як природному старінню в атмосфері Мадрида протягом 3 років, так і лабораторним випробуванням. Метод «Cebelcor» включав занурення у розчин Na_2SO_4 (10^{-4} M) на 30 хвилин, потім сушіння при 40°C протягом 60 хвилин (630 циклів). Метод «Kesternich» полягав у 8-годинному впливі атмосфери з 0,2 л SO_2 при 42°C і 100% вологості, після чого слідувало 16 годин висушування (90 циклів). Метод «Prohesion» передбачав чергування 1-годинного розпилення розчину $(NH_4)_2SO_4$ (0,35%) та NaCl (0,05%) із сушінням при 35°C (1080 циклів). Виявлено, що метод «Prohesion» найбільш точно імітує морську атмосферу, тоді як «Kesternich» ефективний для промислових умов. Спектроскопічний аналіз (XRD, FTIR, SEM, EIS) підтвердив різницю в утворенні іржі: найбільш захисний шар сформувався

після тесту «Kesternich», а найбільш агресивне середовище було створене

Та ін. [38] дослідили кореляцію між прискореними корозійними випробуваннями та атмосферною корозією для трьох типів сталей: низьковуглецевої сталі (SPHC), вуглецевої сталі (SS400) і атмосферостійкої сталі (A588). Прискорені корозійні випробування проводилися в камері сольового туману згідно з ASTM B117-97, де зразки встановлювали під кутом 30° до розпилювача, а температура варіювалася в діапазоні 288–308 K при відносній вологості 99%. Для моделювання атмосферної корозії також проводили тести в камері з контрольованою температурою та вологістю (RH = 60%). Використовувалися змінні потоки осадження Cl^- (0, 100, 2500 мг/м²·доба), які визначали за методом «мокрої свічки» відповідно до ISO 9225. Оцінку корозійної активності проводили за допомогою екстраполяції Тафеля в електроліті (0,1 M NaCl + 0,1 M Na_2SO_4) з використанням триелектродної комірки (робочий електрод – зразок сталі, допоміжний електрод – платина, порівняльний електрод – Ag/AgCl). Встановлено, що зростання концентрації Cl^- значно прискорює корозію, зменшуючи енергію активації процесу, а атмосферостійка сталь A588 демонструє найнижчу швидкість корозії через утворення захисного оксидного шару.

Та Thickett D. [39] дослідили нову методику прискореного корозійного тестування, яка дозволяє одночасно оцінювати поведінку трьох металів (срібло, мідь, свинець) у контрольованих умовах. Було розроблено вдосконалений метод, що усуває недоліки попередньої методики Green & Thickett (1995), зокрема проблему забруднення свинцевих зразків та складність очищення тестових контейнерів. Випробування проводилися в герметичних скляних трубках із силіконовими пробками, зразки металів фіксувалися у вертикальному положенні для уникнення контакту з конденсатом, що могло викликати аномальну корозію. Температура експерименту становила 60°C, а тривалість – 28 діб. Було підтверджено високу відтворюваність тестів: результати нової методики мали 91% збігу для срібла, 96% для міді та 98% для свинцю у порівнянні зі

стандартними тестами. Внесені вдосконалення дозволяють підвищити точність оцінки корозійної стійкості матеріалів та зменшити варіативність між лабораторіями.

Та ін. [40] провели дослідження порівняння змодельованих та експериментальних прискорених корозійних випробувань на сталі, використовуючи Dynamic Electrolyte Film Corrosion (DEFC) модель. Було змодельовано чотири різні випробування: VDA 233-102, GMW 14872, Volvo Act 1 (STD 423-0014) та Volvo Act 2 (VCS 1027,1449). У моделі враховувалася динамічна товщина електролітної плівки, її вплив на швидкість корозії та електрохімічні параметри процесу. Експериментальні дані отримували за допомогою електричного опору (ER) сенсорів, встановлених у кліматичних камерах. Встановлено, що для циклічних тестів із значними змінами вологості та температури (VDA 233-102, GMW 14872) модель добре прогнозує глибину корозійного ураження, тоді як у менш динамічних тестах (Volvo Act 2) спостерігалися розбіжності через накопичення продуктів корозії. Це підтверджує, що для точного моделювання атмосферної корозії необхідно враховувати гігроскопічність корозійних продуктів та їх вплив на процес деградації металу.

У сучасних дослідженнях корозії залізобетонних конструкцій, які наведені, наприклад, в роботах [41–48], велика увага приділяється методам прискореного випробування, що дозволяють моделювати процеси деградації арматури та бетону у скорочені строки. Однак, відсутність єдиних стандартів у проведенні таких випробувань призводить до значних розбіжностей у результатах, що ускладнює їхнє застосування для прогнозування довговічності конструкцій у реальних умовах експлуатації. Нижче розглянуто зазначені роботи, що описують основні підходи до прискорених випробувань на корозію, їхня ефективність, обмеження та відповідність природним процесам корозійного руйнування.

Austin S.A. та ін. [41] досліджували електрохімічну поведінку залізобетонних конструкцій під час прискорених корозійних випробувань із використанням методу накладеного струму (рис. 1.3). Для цього виготовили

бетонні призми з характеристичною міцністю 20, 35 і 50 Мпа та товщиною захисного шару 16, 25 і 40 мм, у які закладали арматуру діаметром 12, 16 або 20 мм. Корозію індукували анодним струмом щільністю 100 мкА/см² протягом 3–17 днів, а процес контролювали методом акустичної емісії (АЕ). Виявлено, що електрохімічна поляризація підвищує потенціал сталі вище рівня пасивації, що впливає на механізм корозії. Було встановлено, що метод АЕ ефективно визначає початок корозії, а модифікований вираз закону Фарадея дозволяє точніше розрахувати масові втрати металу, враховуючи локальний характер хлоридної корозії. Однак результати показали значні відмінності між штучно індукованою та природною корозією, що обмежує застосування методу накладеного струму для реальних конструкцій.

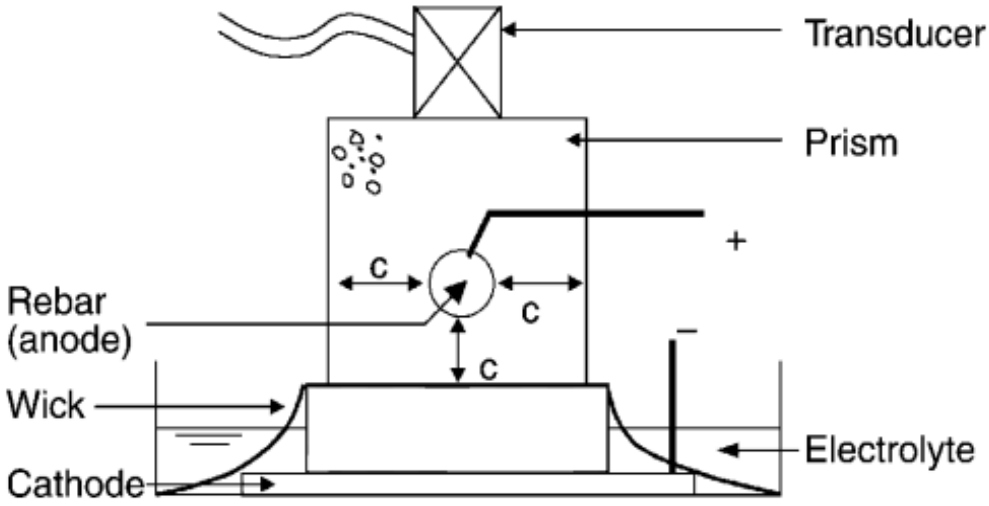
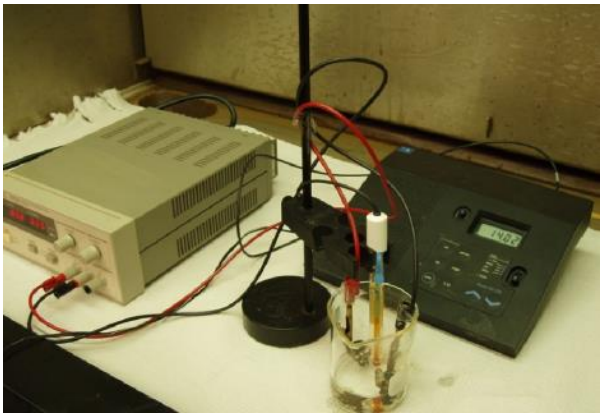


Рисунок 1.3 – Комірка для випробувань на прискорену електрохімічну корозію бетону, армованого сталлю [41]

Та ін. [42] досліджували два методи прискореного випробування корозії залізобетонних балок: гальваностатичний метод та штучний кліматичний вплив. Було виготовлено три групи зразків: першу піддавали корозії у середовищі з відносною вологістю 95% і температурою 50°C, другу – методом накладеного струму зі щільністю 200 мкА/см² протягом 72 годин, а третя залишалася контрольним зразком без корозії. Досліджено зміну несучої здатності балок при

однаковій ширині тріщин, спричинених корозією арматури. Встановлено, що поверхнева структура кородованої арматури значно відрізняється: гальваностатичний метод призводить до рівномірного зносу, тоді як штучний клімат викликає локалізовану корозію, подібну до природної. Виявлено, що корозія знижує міцність балок на 15-30% залежно від методу впливу. Це підкреслює необхідність адаптації прискорених випробувань до конкретних типів конструкцій. Для оцинкованих зварних профілів доцільним було б розроблення методики з періодичним зануренням у корозійні розчини та чергуванням сухих і вологих фаз.

Та ін. [43] досліджували точність закону Фарадея у визначенні масових втрат сталі під час прискорених корозійних випробувань із використанням накладеного струму (рис. 1.4). Експерименти проводилися як у бетоні, так і в розчині, змінюючи концентрацію хлоридів (від 0 до 1000 мМ), рівень pH (13.49–13.95) та щільність струму (від 1.7×10^{-3} А/см² до 0.14 А/см²). Виявлено, що за низької концентрації хлоридів значна частина струму витрачається на побічні реакції, а не на окислення сталі, що спричиняє значні похибки у розрахунках за законом Фарадея (до 70%). Для зразків у бетоні застосовували куби розміром 51×51×51 мм, а випробування тривали від 8 годин до 2 діб залежно від інтенсивності струму. Отримані результати вкотре підтверджують необхідність адаптації методів прискореної корозії до конкретних типів конструкцій. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування впливу занурення у розчин, періодичного висихання та гальванічних ефектів.



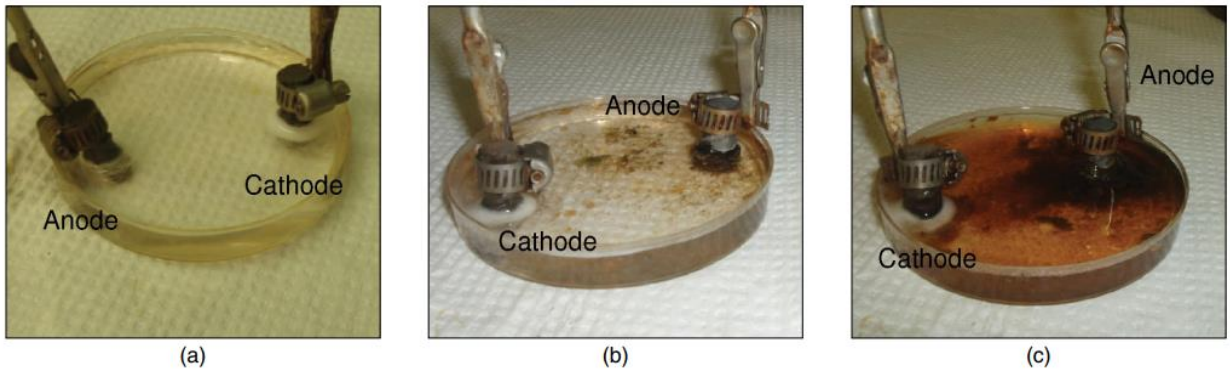


Рисунок 1.4 – Набір для випробувань на електрохімічну корозії з зануренням зразків та результати з використанням 0% (a), 1,5% (b) та 3% (c) NaCl [43]

Та ін. [44] розглянули різні методи прискореного випробування корозії залізобетонних зразків та спробували запропонувати стандартизовану методику. Автори встановили, що занурення зразків у 3–5% розчини NaCl або додавання хлоридів у бетон не відтворюють природний процес деградації. Дослідження показало, що процес корозії пришвидшується за рахунок електрохімічного методу із щільністю струму від 3 до 10 400 мкА/см², що дозволяє досягти ефекту, еквівалентного 10–1000 років природної корозії. При цьому результати таких випробувань часто переоцінюють реальний рівень пошкоджень конструкцій. Автори рекомендують використовувати методику із вибірковим нанесенням хлоридів на поверхню зразків та дозволяти їм висихати між циклами корозії, що більш точно імітує реальні умови. Важливим висновком є те, що рівномірна корозія, спричинена повним зануренням м, значно відрізняється від локалізованої деградації, яка відбувається у реальних конструкціях. Запропоновані методи вказують на необхідність адаптації під конкретні матеріали, включно з

оцинкованими зварними профілями. Для таких конструкцій актуальним буде врахування не лише впливу хлоридів, а й гальванічних ефектів та циклічного змочування й висихання.

Та ін. [45] дослідили ефективність різних методів прискорених корозійних випробувань у автомобільній промисловості, зосередившись на косметичній корозії оцинкованої та неоцинкованої сталі. Автори порівняли польові випробування, що тривають 2–8 років, із циклічними корозійними тестами, які включають чергування фаз забруднення, змочування та висихання. Було встановлено, що результати значною мірою залежать від концентрації солі, зокрема рівень корозії варіювався залежно від навантаження NaCl від 0.5 до 5.0 г/м². Також досліджено поведінку матеріалів у щілинній та відкритій конфігурації, що впливає на механізм утворення оксидних плівок. Порівняльний аналіз показав, що стандартні нейтральні сольові випробування погано корелюють із реальними умовами експлуатації. Автори підкреслили необхідність адаптації методів до конкретних матеріалів і умов експлуатації. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування циклічного змочування, впливу механічних пошкоджень покриття та зміни pH середовища.

Antunes R.A. та ін. [46] дослідили корозійні продукти, що утворюються на вуглецевій сталі під час природного атмосферного впливу та прискорених корозійних випробувань. Зразки експонували у міському та промисловому середовищі протягом 1, 2, 3, 6 та 9 місяців за стандартом ASTM G50-76. Для прискорених випробувань використовували два методи: Test A – змінні цикли туману та сушіння (Prohesion-тест) при температурі 35 градусів Цельсія, а Test B – стандартне випробування в сольовому тумані (Salt Spray Test) за ASTM B117, чергуючи 7 днів у сольовому середовищі та 7 днів під впливом ультрафіолетового випромінювання типу A (UV-A) з конденсацією вологи. Корозійні продукти аналізували методами рентгенівської дифракції, спектроскопії Рамана та мессбауерівської спектроскопії. Основними фазами були лепідокрокіт, гетит та магнетит, причому Prohesion-тест краще відтворював природну корозію, ніж Salt Spray Test, який спричиняв надмірне утворення акажаніту. Це підкреслює

важливість вибору методики випробувань залежно від матеріалу. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування гальванічних ефектів, нерівномірного розподілу корозійних продуктів та впливу циклічного змочування.

Та ін. [47] дослідили застосування методу накладеного струму для прискорення корозії арматури в бетоні, а також альтернативні підходи. Було розглянуто різні експериментальні схеми для зразків малого та великого розміру, де застосовували постійний струм у діапазоні 1.74–3.00 мА/см². Випробування проводили у хлоридвмісному розчині за температури 40°C, а тривалість експериментів варіювалася від декількох днів до тижнів. Було визначено, що корозія, викликана накладеним струмом, часто призводить до рівномірного пошкодження поверхні арматури, що відрізняється від природного локалізованого руйнування. Запропоновано модифікацію закону Фарадея для кращої відповідності теоретичних і фактичних втрат маси металу. Розглянуто альтернативні методи, включаючи кліматичні камери з циклічним змочуванням NaCl-розчином (5%) та сушінням інфрачервоним випромінюванням. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування локальних дефектів покриття, гальванічних ефектів і специфіки періодичного занурення у корозійне середовище.

Papadopoulos M.P. та ін. [48] дослідили корозію відкритої арматури, її механічну деградацію та кореляцію між природною та прискореною корозією. Було зібрано 98 зразків арматури з 64 будівель віком до 96 років у прибережній зоні Греції, для яких проводили вимірювання втрат маси та випробування на розтяг. Прискорені випробування виконували в камері сольового туману (ASTM B117) з використанням розчину NaCl (5%) при температурі 35 градусів Цельсія. Визначено, що прискорена корозія у сольовому тумані відбувається 74–79 разів швидше, ніж природна. Проте характер пошкоджень відрізняється: природна корозія спричиняє локальні дефекти, тоді як прискорена – рівномірне стоншення перерізу. Випробування на розтяг показали зниження пластичності арматури, хоча межа міцності змінювалася менш виражено. Було виконано металографічний аналіз, який підтвердив комбінацію рівномірної та ямкової

корозії, причому максимальна глибина корозійних ям після 90 днів випробувань досягала 240 мкм. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування нерівномірного розподілу корозійних продуктів, механічних напружень та комбінованого впливу сольового туману й періодичного змочування.

У сучасних дослідженнях захисту металевих конструкцій від корозії значна увага приділяється органічним покриттям та фарбам, які забезпечують бар'єрну, пасивуючу та інгібуючу дію. Випробування таких покриттів проводяться в умовах прискореної корозії, що дозволяє оцінити їхню ефективність у скорочені строки та визначити оптимальні композиції для використання в агресивних середовищах. Нижче розглянуто роботи [49–51], які аналізують методи випробування лакофарбових покриттів, їхню стійкість до корозії, вплив зовнішніх факторів та можливості вдосконалення технологій захисту металів.

Simpson C.H. та ін. [49] дослідили застосування циклічного корозійного та кліматичного тестування для оцінки довговічності лакофарбових покриттів на сталі. Випробовували три промислові системи покриттів: епоксидну, акрилову латексну та алкідну, нанесені на холоднокатаний сталь після піскоструминної обробки. Товщина сухої плівки становила 38–50 мкм, зразки мали розміри 8×16 см та витримувалися у трьох режимах: сольовий туман (ASTM B117), циклічна корозія з поперемінним зволоженням і сушінням у розчині $(NH_4)_2SO_4$/NaCl (0.35% і 0.05% відповідно) та комбіноване випробування з впливом ультрафіолетового випромінювання UV-A (340 нм) при 60°C та конденсацією вологи при 50°C. Експозиція тривала 2000 годин (рис. 1.5). Найкращу кореляцію з реальними умовами (27 місяців морської експозиції у Флориді) показав комбінований тест, тоді як сольовий туман дав завищену оцінку деградації. Було встановлено, що циклічне змочування і висихання значно впливає на утворення пухирів та розшарування покриття. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування впливу електроліту, механічних пошкоджень покриття та ефектів гальванічної корозії.

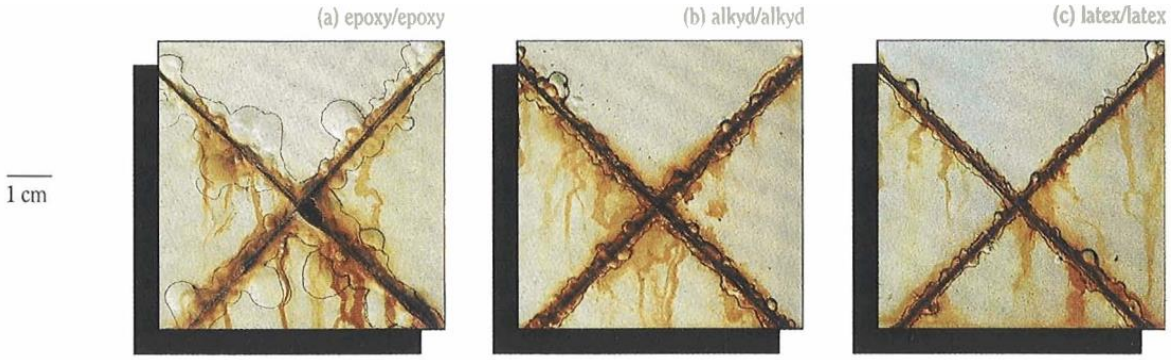


Рисунок 1.5 – Області панелей під час комбінованого випробування на корозію/атмосферні впливи (2000 годин) [49]

Павленко В. М. та ін. [50] дослідили методи випробувань лакофарбових покриттів на стійкість до корозії, застосовуваних у автомобільній промисловості. Розглянуто три основні підходи: випробування у нейтральному сольовому тумані (ASTM B117), випробування у сольовому тумані з оцтовою кислотою (CASS-тест) та циклічне корозійне випробування. Тестування проводили у камерах (рис. 1.6) з використанням 5%-го розчину натрію хлориду (NaCl) та контрольованою температурою 35–50°C.

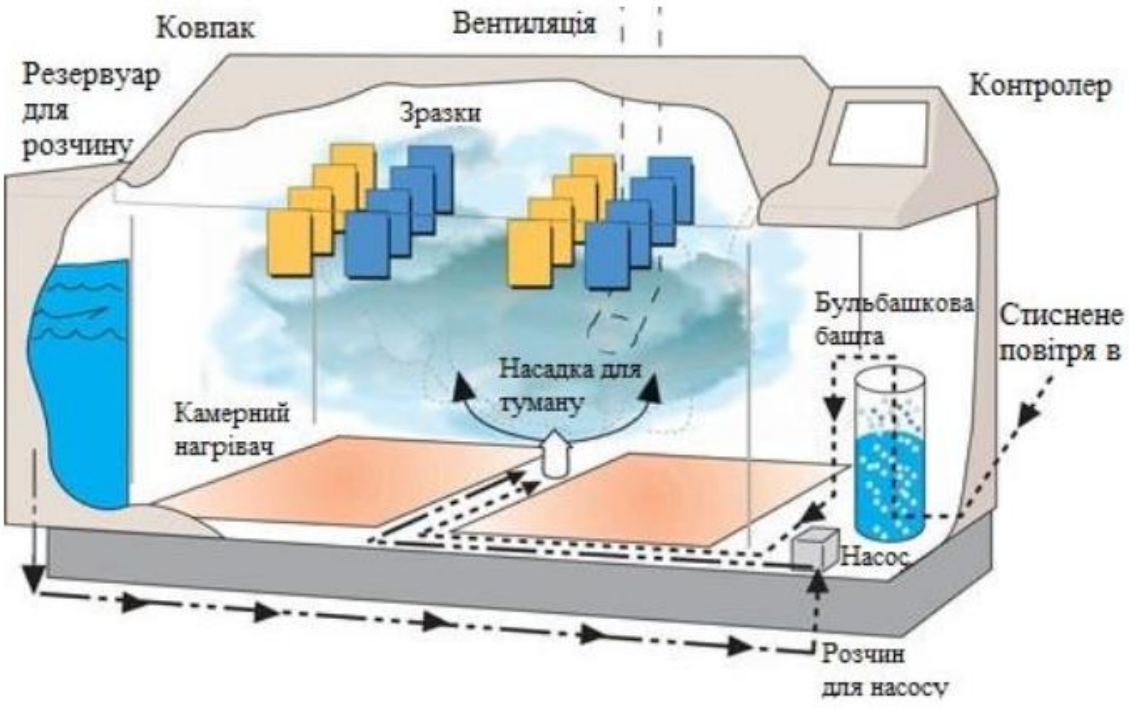


Рисунок 1.6 – Типова камера сольового туману [50]

Тривалість експозиції коливалася від 24 до 1000 годин, залежно від досліджуваного матеріалу. У CASS-тесті застосовували хлористу мідь (1 г на 4 л розчину), що прискорювало корозійні процеси. Для оцінки глибини корозії використовували мікроскоп із нескінченним фокусом, скануючу електронну мікроскопію (SEM) та рентгенівську дифракцію (XRD). Виявлено, що циклічні випробування найкраще відтворюють природні умови корозії, тоді як сольовий туман може давати завищені оцінки деградації. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування специфіки покриття, його механічних пошкоджень та впливу періодичного висихання.

Aljibori H.S. та ін. [51] провели огляд останніх досягнень у сфері антикорозійних покриттів, включаючи органічні, неорганічні та металеві системи. Досліджено механізми захисту, зокрема бар'єрний ефект, катодний захист і самовідновлювані покриття (рис. 1.7).

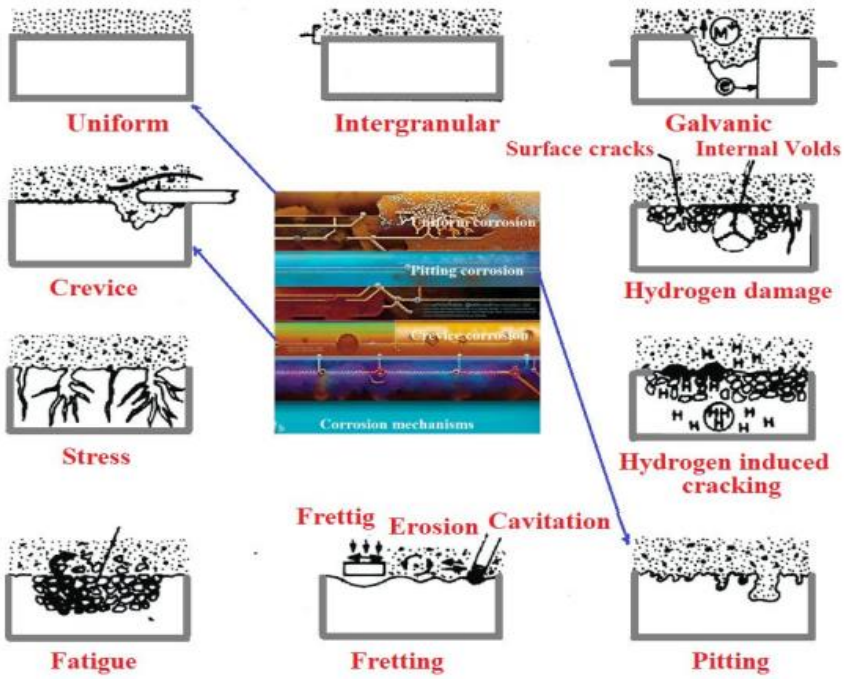


Рисунок 1.7 – Механізми корозії та стратегії захисту [51]

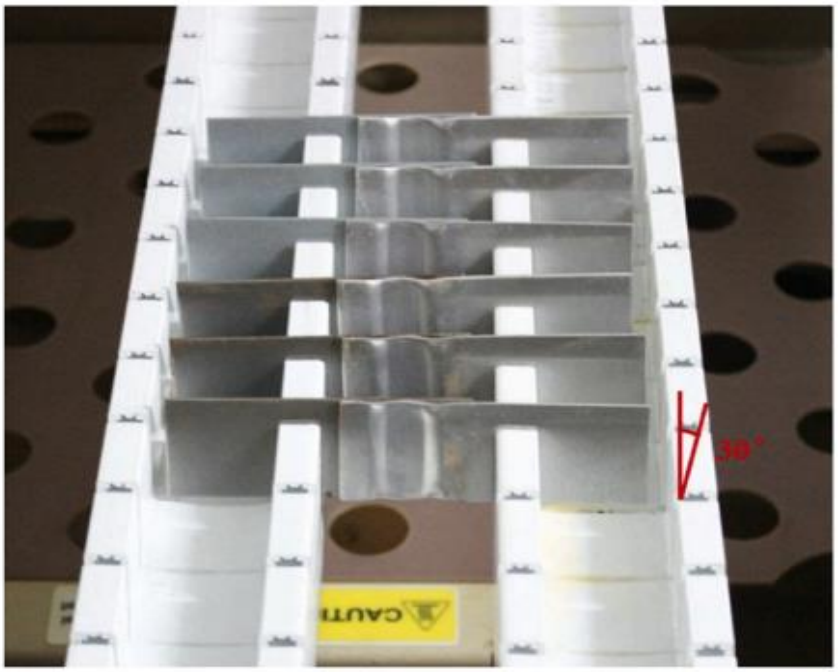
Особливу увагу приділено впливу наночастинок оксидів металів (SiO_2, TiO_2, ZnO, Al_2O_3), які покращують адгезію та знижують проникність вологи. Для оцінки стійкості покриттів застосовували експрес-методи: випробування у

сольовому тумані (ASTM B117) з використанням 5% NaCl при температурі 35°C (до 3000 годин), а також циклічні випробування із чергуванням змочування, сушіння та ультрафіолетового опромінення (UV-A, 340 нм) при 50°C. Досліджено гібридні полімерні покриття, які демонструють до 60% вищу стійкість до корозії порівняно з традиційними органічними системами. Використання електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) підтвердило, що поліуретанові покриття з додаванням графену мають опір поляризації понад 10^9 Ом·см² після 1000 годин експозиції. Виявлено, що багатошарові системи з ґрунтовками на основі епоксидних смол та активних інгібіторів забезпечують максимальний захист у промислових і морських умовах. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування адгезії покриття, впливу гальванічних процесів та циклічного механічного навантаження.

У сучасних дослідженнях оцинкованої сталі значна увага приділяється вивченню її поведінки в умовах прискореної корозії, що є важливим для автомобільної, будівельної та суднобудівної промисловості. Методи випробувань включають сольовий туман, циклічну корозію та електрохімічні тести, що дозволяють оцінити довговічність покриттів, їхній вплив на зварні з’єднання та ефективність у різних кліматичних умовах. Нижче розглянуто роботи [52–55], які аналізують механізми корозії оцинкованої сталі, результати випробувань та можливості вдосконалення методик захисту.

Та ін. [52] дослідили поведінку оцинкованої сталі в умовах автомобільної експлуатації та прискорених корозійних випробувань. Було розглянуто корозію сталевих листів з покриттям Zn та Zn-сплавами у реальних умовах (Європа, Таїланд) та в лабораторних тестах. Випробування проводили з використанням сольового туману (ASTM B117) та циклічних корозійних тестів (JASO M609, SAE J2334, VDA 621-415). Досліджено поведінку зразків із різною товщиною покриття: оцинкована сталь (64–100 г/м²), гальванізована ZnNi (27–34 г/м²), гальванізована GA (43–51 г/м²) та електрооцинкована сталь (18–68 г/м²). Встановлено, що корозія сталі в автомобільних деталях протікає у 80 разів швидше, ніж корозія цинкового покриття. Аналіз глибини корозії показав, що при

150 циклах JASO M609 ZnNi і GA забезпечували ефективний захист, а при 120 циклах SAE J2334 найкращим варіантом було покриття GI 100 г/м². Запропоновано індекс корозійної перфорації PCI, який дозволяє порівнювати результати різних методів випробувань. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування впливу різних товщин покриття, типу експозиції (суцільне або локальне зволоження) та періодичного механічного навантаження. Та ін. [53] дослідили корозійну поведінку та механізм руйнування електромагнітно-зварних з'єднань між оцинкованою сталлю (HC340LAD + Z100) та алюмінієвим сплавом (AA3003). Для оцінки корозійної стійкості використовували випробування в нейтральному сольовому тумані (ASTM B117) у камері Q-FOG CCT-1100 (рис. 1.8), де зразки піддавалися впливу 5% розчину натрію хлориду (pH 6.5–7.2) при температурі 35°C протягом 48–576 годин.



Test parameters of NSS for MPW joints.

Testing method	NSS test
Concentration of NaCl solution	5 %
pH value of NaCl solution	6.5~7.2
Average sedimentation rate of salt spray	1.5 mL/h±0.5 mL/h
Temperature	35 °C ± 2 °C
Test cycle (ageing time)	48 h; 96 h; 192 h; 384 h; 576 h

Рисунок 1.8 – Схема розташування зразків для випробування у нейтральному сольовому тумані (NSS) [53]

Крім того, проводили електрохімічні тести з вимірюванням відкритого потенціалу контуру (OCP) і поляризаційних кривих, використовуючи триелектродну схему (електрод порівняння – насичений каломельний, робочий електрод – зварні з'єднання, допоміжний – платиновий). Дослідження показало, що після 48 годин корозії міцність з'єднання знизилася на 20%, а після 576 годин – повністю деградувала. Зварні шви оцинкованої сталі руйнувалися через проникнення хлорид-іонів у місці дугоподібного зварного шва, тоді як для незахищеної сталі основним механізмом була гальванічна корозія, що викликала інтенсивну втрату маси алюмінію. Поляризаційні дослідження підтвердили, що швидкість корозії для з'єднань з оцинкованою сталлю була нижчою (8.95×10^{-6} А/см²) порівняно з незахищеною сталлю (1.46×10^{-5} А/см²), що вказує на певний позитивний ефект цинку. Для оцинкованих зварних профілів важливим буде врахування неоднорідності корозійного руйнування та захисних властивостей цинкового шару у поєднанні з механічним напруженням.

Sinha A.K. та ін. [54] дослідили можливість розробки альтернативного матеріалу, стійкого до корозії, який би зберігав властивості оцинкованої сталі та був більш придатним для лазерного зварювання. Основна проблема оцинкованої сталі при лазерному зварюванні – значна різниця температур плавлення між залізом (1538°C) та цинком (906°C), що спричиняє утворення бризок та оксидів цинку. Було запропоновано використання хрому (12–18%) та магнію (1–2%) у складі сплаву, що покращує корозійну стійкість та одночасно зменшує утворення дефектів при зварюванні. Для оцінки стійкості матеріалу проведено випробування у камері сольового туману (ASTM B117) за температури 35°C та вологості 95% протягом 1000 годин, а також електрохімічні тести (відкритий потенціал корозії та поляризаційні криві). Виявлено, що запропонований матеріал демонструє швидкість корозії 0.86 мм/рік, що на 40% нижче, ніж у традиційної оцинкованої сталі (1.42 мм/рік). Лазерне зварювання нового матеріалу при потужності 3.2 кВт, швидкості 25 мм/с та подачі аргону зі швидкістю 15 л/хв дало рівномірніший шов із зменшеною кількістю пір на **55%**. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде дослідження нових сплавів

з покращеною зварюваністю та корозійною стійкістю, особливо в умовах періодичного зволоження та механічних навантажень.

Та ін. [55] дослідили корозійну втому з'єднаних матеріалів у прискорених корозійних випробуваннях та розробили новий пристрій для одночасного навантаження зразків у корозійному середовищі. Дослідження виконували на зразках із холоднокатаної сталі, гарячеоцинкованої сталі та алюмінію, які з'єднували точковим зварюванням, клейовим з'єднанням, механічним обтиском або їх комбінацією. Випробування проводили у камері циклічної корозії (VDA 233-102) з поперемінним впливом сольового туману (5% NaCl), підвищеної вологості (95%) та сушіння при 60°C, із загальною тривалістю до 1000 годин. Одночасно частина зразків зазнавала втомного навантаження з частотою 0.25–0.5 Гц. Виявлено, що одночасний вплив корозії та механічного навантаження значно пришвидшує деградацію клейових з'єднань, тоді як точкове зварювання демонструвало вищу стійкість. Максимальне зниження міцності на втомне руйнування спостерігалось у зразків з клейовим з'єднанням при 0.25 Гц, де міцність зменшилася на 35%. Зварні з'єднання зберегли свої характеристики навіть після 1000 годин випробувань. Для оцинкованих зварних профілів актуальним буде врахування комбінованого впливу механічного напруження, корозійного середовища та термічних циклів.

Таким чином, проведений огляд стану питання підтвердив важливість поєднання лабораторних випробувань та реальних польових умов для точного прогнозування довговічності матеріалів. Виявлено, що комбіновані методики прискорених випробувань, зокрема з чергуванням змочування, сушіння та механічного навантаження, краще імітують реальні умови експлуатації. Для оцинкованих зварних профілів особливо важливим є врахування впливу гальванічної корозії, механічних пошкоджень покриття та періодичних змін вологості.

Стислий огляд комерційно доступних камер для пришвидшених випробувань на корозію

У сучасних дослідженнях корозійної стійкості металів та захисних покриттів широко використовуються спеціалізовані корозійні камери, які дозволяють проводити випробування в контрольованих умовах, що імітують природні або прискорені процеси деградації матеріалів. Існує кілька основних типів таких камер, які відрізняються за принципами роботи, випробувальними середовищами та можливостями програмування тестів.

Основні типи корозійних камер наведені нижче.

амери традиційного сольового туману (NSS, ASTM B117, ISO 9227)

Приклад: CORROSIONBOX (COFOMEGRA, Італія), рис. 1.9.

а б

Рисунок 1.9 – Камери Corrosionbox (CO.FO.ME.GRA): вертикальні (а) та горизонтальні (б) [56]

- Призначена для стандартного нейтрального сольового туману (NSS) за

- Використовує 5% NaCl розчин при температурі 35°C з безперервним розпиленням.

- Дозволяє проводити довготривалі випробування на корозійну стійкість матеріалів.
- Конструкція з поліпропілену, що запобігає впливу агресивного середовища на саму камеру.

2. Камери циклічної корозії (CCT, ASTM G85, VDA 621-415)

Приклад: TQC Sheen C&W Cyclic Corrosion Cabinet (Велика Британія), рис. 1.10.

Р

и

- Підтримує різні режими випробувань: сольовий туман, високу вологість (98% RH), цикли сушіння та зміну температури (до 70°C).
- Дозволяє програмувати послідовність тестів для імітації реальних умов експлуатації конструкцій.
- Використовується в автомобільній, аерокосмічній та військовій промисловості.

амери з прискореним випробуванням в агресивних середовищах (CASS, SO_2, Kesternich test) .

Приклад: Ascott Kesternich Chamber (Велика Британія), рис. 1.11.

0

–

Рисунок 1.

- Імітує вплив промислової атмосфери (кислотні дощі, викиди SO_2).
- Використовує газову дозуючу систему з точним регулюванням концентрації діоксиду сірки.
- Температурний режим до 50°C, підтримка конденсаційної вологи для агресивних випробувань.

омплексні лабораторні системи (Salt Spray + UV + Температурні цикли)

Приклад: LISUN YWX/Q-010 (Китай), рис. 1.12.

Рисунок

- Поєднує сольовий туман, ультрафіолетове старіння, циклічні температурні режими.
- Дозволяє проводити комбіновані випробування, що імітують природні кліматичні умови.
- Підтримує стандарти ASTM B117, ISO 9227, IEC 60068-2-52.

орівняльний аналіз (бенчмаркінг)

Порівняльний аналіз комерційно доступних корозійних камер наведений у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз комерційно доступних корозійних камер для корозійних випробувань

Параметр				
Країна-виробник	Італія	Велика Британія	Велика Британія	Китай
Тип випробувань	NSS (нейтральний сольовий туман)	Циклічна корозія	$_2$, промислове середовище	Комплексні випробування
Температурний діапазон		20–70°C	до 50°C	10–90°C
Вологість	95–98% RH		Конденсаційна	30–98% RH
Додаткові функції		Програмовані цикли	Автоматичне дозування SO_2	UV-старіння, кліматичні зміни
Основна сфера застосування	Метали, покриття	Авто, авіа, промисловість	Антикорозійні покриття	Лабораторні дослідження
Відповідність стандартам				

Такий аналіз дозволяє визначити найкращий вибір для конкретних досліджень та галузей застосування. Висновки щодо використання для НДР:

– підходить для довготривалих випробувань захисних покриттів і металів в умовах стандартного сольового туману. Може використовуватися як базова установка для оцінки корозійної стійкості.

– універсальна камера для моделювання реальних умов експлуатації, з можливістю циклічних випробувань. Рекомендована для автомобільної та промислової галузі.

– найбільш ефективна для оцінки впливу SO_2 та конденсаційної вологи. Рекомендована для досліджень у зонах високого промислового забруднення.

– оптимальний варіант для комплексних досліджень, що поєднують корозію, UV-старіння, температурні цикли. Підходить для матеріалознавчих досліджень та розробки нових покриттів.

Таким чином, для науково-дослідних робіт (НДР) доцільно обирати камери з можливістю програмування циклів та мультифункціональні установки. Наприклад, **LISUN YWX/Q-010** є оптимальним вибором для досліджень покриттів і конструкцій у змінних умовах, тоді як **TQC Sheen CCT** дозволяє імітувати реальні сценарії експлуатації, що є особливо цінним для прогнозування довговічності матеріалів.

З економічної точки зору, вибір корозійної камери має базуватися не лише на її технічних можливостях, а й на вартості експлуатації, наявності витратних матеріалів та простоті обслуговування. Для підприємств, що виконують серійні випробування, доцільним є придбання камер із стандартизованими методиками (наприклад, **CORROSIONBOX NSS**), що забезпечують високу відтворюваність результатів.

Натомість, при роботі з одиничними замовленнями або нестандартними зразками може бути економічно виправданим розроблення власних методик випробувань із використанням доступного обладнання. Наприклад, адаптація існуючих камер під специфічні експериментальні умови (додавання додаткових контрольованих параметрів, зміна складу середовища тощо) дозволить підвищити точність та практичну цінність отриманих результатів без необхідності значних капіталовкладень у спеціалізоване обладнання.

1.4 Висновки по розділу 1

Встановлено актуальність корозійних випробувань, оскільки корозія металів є однією з головних проблем сучасного матеріалознавства. Це спричиняє значні економічні втрати (до 3-4% світового ВВП) та знижує експлуатаційну надійність конструкцій. Визначено, що розробка методів випробувань та ефективних антикорозійних захистів є критично важливою для промисловості, транспорту, енергетики та будівництва.

Проаналізовано сучасні стандарти корозійних випробувань, що дозволило визначити їхню ефективність для оцінки довговічності матеріалів. Встановлено, що метод ASTM B117 залишається найпоширенішим для випробувань у сольовому тумані, проте він не завжди корелює з природними умовами. Доведено, що циклічні методи випробувань (ASTM G85, IEC 60068-2-52, MIL-STD-810H) краще відтворюють змінні кліматичні умови та є доцільними для визначення реальної корозійної стійкості матеріалів.

Визначено основні тенденції у наукових дослідженнях, що допомогло сформувати комплексний підхід до оцінки корозійної стійкості. Дослідження підтвердили, що найбільше корозійне руйнування спостерігається у місцях механічних пошкоджень покриття та у зварних швах. Встановлено, що застосування циклічних тестів, які включають змінну вологість, механічні навантаження та сольові розчини, дозволяє отримати найбільш достовірні результати.

Проведено порівняльний аналіз комерційно доступних корозійних камер, що дозволило визначити їхню функціональність та сферу застосування:
– *CORROSIONBOX (Італія)* – базова камера для випробувань у сольовому тумані за ASTM B117, ефективна для серійних тестувань захисних покриттів.
– *TQC Sheen CCT (Велика Британія)* – мультифункціональна установка з можливістю циклічних випробувань, що дозволяє імітувати реальні сценарії експлуатації.
– *Ascott Kesternich (Велика Британія)* – камера для випробувань у промисловому середовищі з впливом SO_2 та конденсаційної вологи.
– *LISUN YWX/Q-010 (Китай)* – комплексна система для лабораторних

досліджень, що поєднує корозійні випробування, UV-старіння та температурні цикли.

Сформульовано рекомендації для науково-дослідних робіт, що дозволило визначити оптимальні підходи до вибору випробувального обладнання. Встановлено, що:

– Для досліджень у змінних умовах доцільно використовувати камери з можливістю програмування циклів, зокрема LISUN YWX/Q-010 та TQC Sheen

– Для серійних випробувань покриттів доцільно застосовувати стандартизовані установки, наприклад CORROSIONBOX NSS.

– У випадку нестандартних зразків економічно виправданим є розроблення власних методик випробувань із використанням доступного обладнання, що дозволяє зменшити витрати без втрати точності експерименту.

Доведено доцільність поєднання лабораторних випробувань із моделями прогнозування корозійної стійкості, що дозволяє оптимізувати методи захисту матеріалів та збільшити довговічність конструкцій.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 5-90% NaCl

Для дослідження корозійної стійкості зварних швів гнутозварних профілів з оцинкованої сталі, що вироблені за допомогою лазерного зварювання, було запропоновано використати корозійне середовище, яке представляє собою 5 % хлориду натрію в воді. Для цього зразки труб різних діаметрів занурювалися на 1/3 довжини в ванну з реактивом (рис. 2.1). Температура середовища складає 35-37 °С (градусів Цельсія). Час витримки в розчині – 72 години.

Рисунок 2.1 – Ванна зі зразками (розчин 5% NaCl)

Кожні 12 годин проводилась доливка води до фіксованого рівня.

Після витримки зразки виймалися з ванни, промивалися чистою водою, а далі етиловим спиртом і просушувалися на повітрі.

Далі з труби вирізалася сторона зі зварним швом і передавалася на стереомікроскопічні дослідження стану поверхні зварних швів.

2.2 Дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 10-90 % NaCl

Для підсилення корозійної дії хлориду натрію концентрацію поступово збільшували до 90 % NaCl (рис. 2.2) шляхом природнього випаровування води. Температура середовища 35-37 °С (градусів Цельсія). Час витримки – 72 години.

Рисунок 2.2 – Ванна зі зразками (розчин 90% NaCl)

Після витримки зразки виймалися з ванни, промивалися водою, далі етиловим спиртом і просушувалися.

Далі з труби вирізалася сторона зі зварним швом і передавалася на стереомікроскопічні дослідження стану поверхні зварних швів.

2.3 Дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині 10%HCl

Для перевірки корозійної стійкості швів в кислому середовищі зразки занурювались в ванну з 10 % розчином соляної кислоти (рис. 2.3) і закривалися кришкою.

Рисунок 2.3 – Зразки в ванні з 10% розчином HCl (соляної кислоти)

Дана методика використовувалась для перевірки максимальної корозійної стійкості швів. Час витримки – 8 годин. Після цього зразки промивалися водою, далі етиловим спиртом і просушувалися (рис. 2.4).

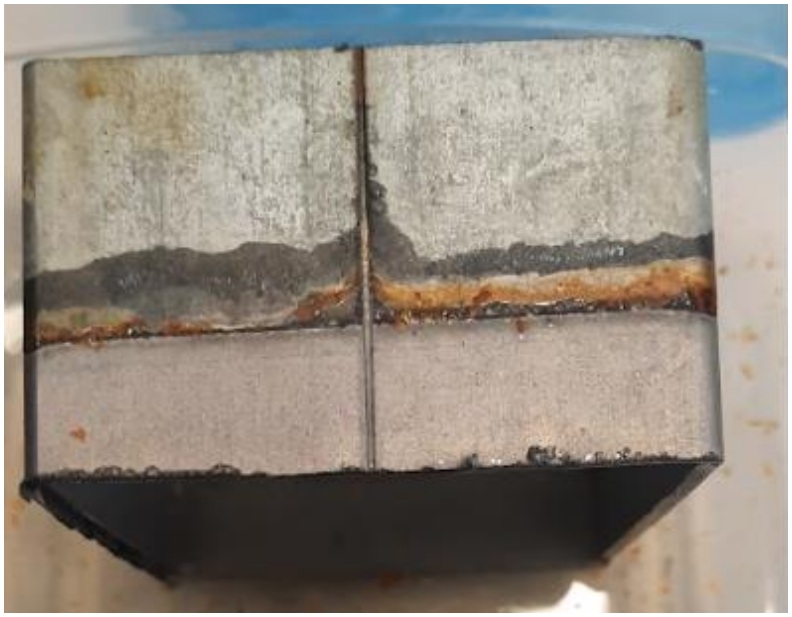


Рисунок 2.4 – Вигляд зразка після витримки в 10% розчині HCl

Підготовка зразків під металографічні дослідження

Для перевірки зварних швів після корозійних випробувань були підготовлені зразки під металографічні дослідження. Дані зразки представляють собою залиті в епоксидну смолу вирізані шматочки труб.

Залиті зразки мають циліндричну форму (рис. 2.5).

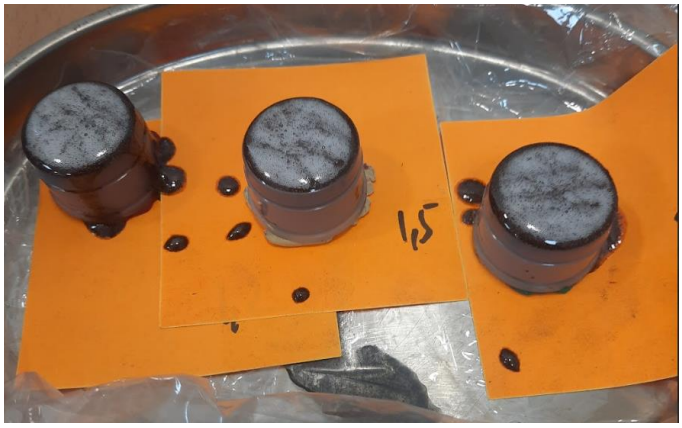


Рисунок 2.5 – Заливка зразків епоксидною смолою для проведення металографічних досліджень

Після твердіння смоли проводили торцювання зразків на токарному верстаті (рис. 2.6) для вирівнювання площини і далі проводили підготовку на шліфувальній машині (рис. 2.7).

Рисунок 2.6 – Торцювання металографічного зразка на токарному верстаті

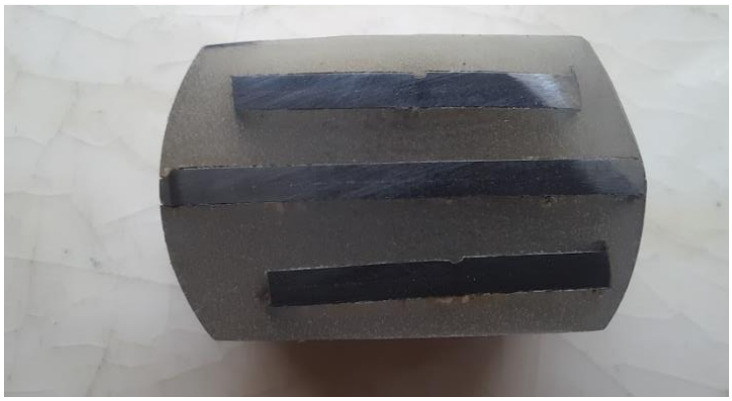


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд зразка для металографії

2.5 Висновки по розділу 2

Розроблено методику оцінки корозійної стійкості зварних швів у 5% розчині NaCl при 35-37°C протягом 72 годин із регулярним доливанням води для стабілізації концентрації. Після експозиції зразки промивали, обробляли етиловим спиртом і висушували перед стереомікроскопічним дослідженням.

Розроблено методику випробувань у розчинах NaCl із концентрацією 10-90% при 35-37°C протягом 72 годин. Концентрацію збільшували до 90% шляхом природного випаровування води без додавання свіжого розчину для оцінки впливу високої іонної агресивності на корозійне руйнування швів.

Розроблено методику визначення корозійної стійкості зварних швів у 10% розчині HCl при 35–37°C протягом 8 годин. Випробування проводили в закритій ванні для мінімізації випаровування реагенту та оцінки максимального ступеня корозійного руйнування металу.

Розроблено методику підготовки зразків для металографічного аналізу, що включала заливку в епоксидну смолу, торцювання на токарному верстаті та шліфування для якісної оцінки змін структури металу після корозійного впливу.

Запропоновані методики можуть бути використані для оцінки поведінки зварних швів у різних агресивних середовищах та визначення їхньої стійкості до дії хлоридів і кислот.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині

Візуальний огляд зварних швів після експозиції 72 години в розчині 5% NaCl не виявив змін поверхні шва та основного металу (рис. 3.1).

Після витримки 72 години в розчині 90% NaCl визначились деякі спалахи корозійного руйнування основного покриття. На швах виявлено білий наліт з плямами коричнево-сірого кольору.

Для вивчення більш детальної картини дослідження проведені на стереомікроскопі зі збільшеннями ×10–×50.

Стан поверхні основного покриття наведений на рис. 3.1, збільшення ×10 (рис. 3.1, а) та збільшення ×30 (рис. 3.2, б).

Дослідження зварних швів при збільшенні ×50 показало деякі скупчення корозії в місцях переходу від шва до основного металу, що може бути спричинене ввігнутістю поверхні шва.

Даний ефект може бути спровокований як капілярними явищами (ефект всмоктування корозійного середовища не в сам метал або покриття, а саме поверхнею шва), що викликані як лускатістю швів, що є звичним явищем при зварюванні, так і неповним заповненням шва (особливо на товщинах 1,5-2,0 мм).

Сам шов дещо змінив колір (став більш темний), але корозії в шві не спостерігається ні в центральній його частині, ні в ділянках прилеглих до зони термічного впливу на основному металі.

В лускатості швів є скупчення продуктів реакції корозійного середовища і покриття (рис. 3.2).

Локальні пошкодження покриття у зонах корозійного ураження можуть свідчити про вибіркову дію хлоридів на ділянки з нерівномірною товщиною цинкового шару, що потенційно може стати осередком подальшого розвитку корозії.

а

б

Рисунок 3.1 – Стан поверхні основного покриття після витримки протягом

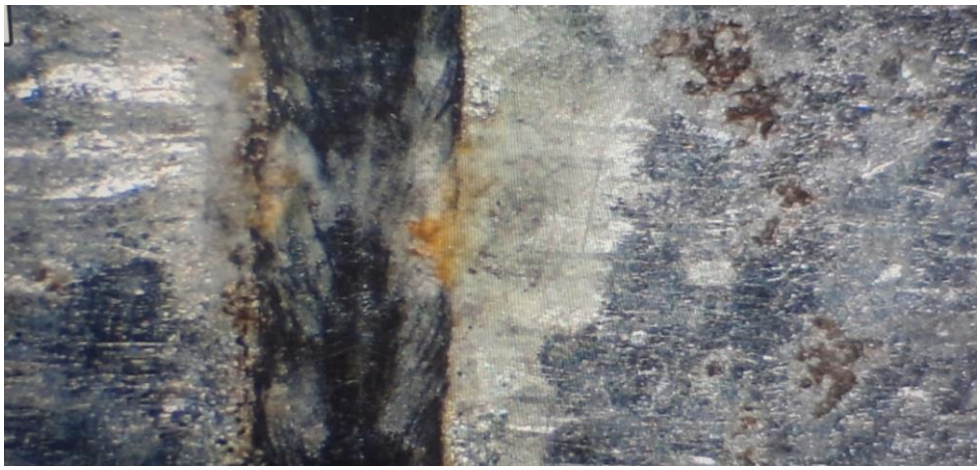


Рисунок 3.2 – Стан поверхні основного покриття (×50) після витримки протягом 72 годин в розчині 5-90 %NaCl

3.2 Результати дослідження корозійної стійкості зварних швів в розчині

Встановлено, що вплив 10% HCl на цинкове покриття є руйнуючим. Корозія йде зі швидкістю приблизно 5-10 мкм/хв. Поступово зменшуючись по мірі падіння концентрації розчину соляної кислоти. Поверхня основного металу і металу шва має однаковий темно-сірий колір, що суттєво відрізняється від кольору цинкового покриття. Лускатість шва проявилася набагато яскравіше, що може свідчити про присутність на його поверхні оксидного шару, який утворюється під час знаходження реакційної зони зварювання в інтервалі високих температур. Даний оксидний шар складається з комплексного шлаку системи FeO-MnO-SiO_2-ZnO і міцно тримається як за рахунок лускатості, так і за рахунок утворення мікрошпінелей в міжфазній зоні – шлак-метал (рис. 3.3–3.5).

Рисунок 3.3 – Вигляд частини зварного профіля (труби) 45×45×2 зі сторони занурення в 10% розчин HCl і витримки 15 хв. (х20)

Слід зазначити, що цинк вступає в реакцію першим ніж зварний шов. Це доказує те, що бульбашки водню активно йдуть саме з поверхні основного металу і майже не йдуть зі шва.

На рисунку 3.4 видно, що межа сплавлення кромок з швом нерівномірна і має заглублення і розширення, що повторюються з визначеною періодичністю.

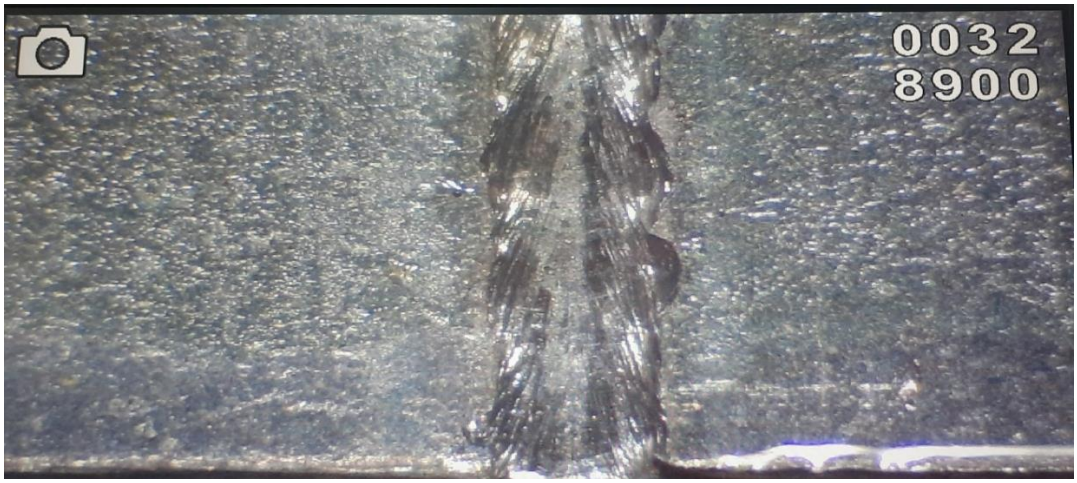


Рисунок 3.4 – Вигляд частини труби 45×45×2 зі сторони занурення в 10% розчин HCl і витримки 15 хв. (×50)

Рисунок 3.5 – Вигляд шва і зони термічного впливу після випробувань (×100)

Дослідження поверхні труби при більших збільшеннях показало, що на шві майже немає ознак корозії. Про це свідчить виражена лускатість, яка мала б зникнути при довгому контакті з соляною кислотою (ефект полірування). Отже сам зварний шов в даній системі має не гірші показники корозійної стійкості, ніж основний метал.

3.3 Дослідження мікроструктури зварних швів та зони термічного впливу

Даний цикл досліджень проводився за допомогою металографічного мікроскопа ММО-1600 ВАТ.

Завчасно підготовлені зразки для металографічних досліджень додатково відполіровувались за допомогою пробо підготовчої полірувальної машини.

Оберти диску – 300-350 об/хв. На полірувальну тканину подавалася суспензія гідроколоїдного оксиду алюмінію. Після полірування зразки промивалися 96% етиловим спиртом, висушувалися на повітрі і далі проводились петрографічні дослідження. Далі зразок травився за допомогою 4% розчину азотної кислоти HNO_3 в етиловому спирті.

Поперечні перетини зразків під мікроскопом наведені на рис. 3.6 та 3.7.

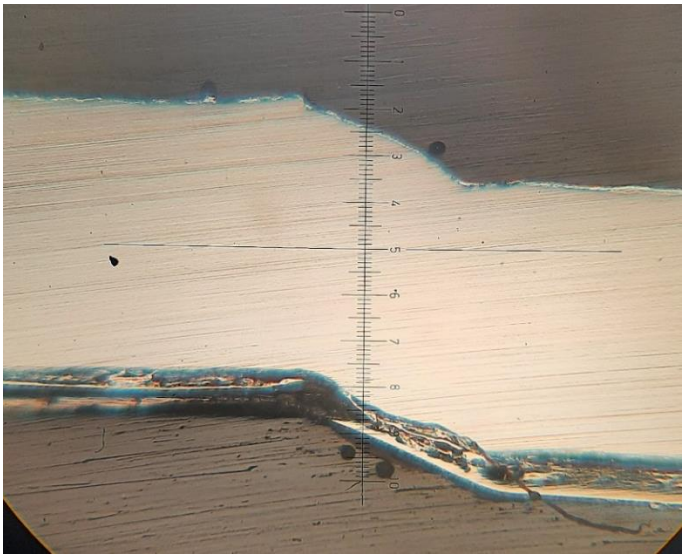


Рисунок 3.6 – Поперечний перетин профілю (труби) 40×60×1,2 (×80)

Як видно з рис. 3.6 та 3.7 зварні шви мають різну геометрію. На трубі шва і основного металу (рис. 3.6), Труба 80×60×2 має шов, який не заповнений до товщини труби на 0,4 мм.

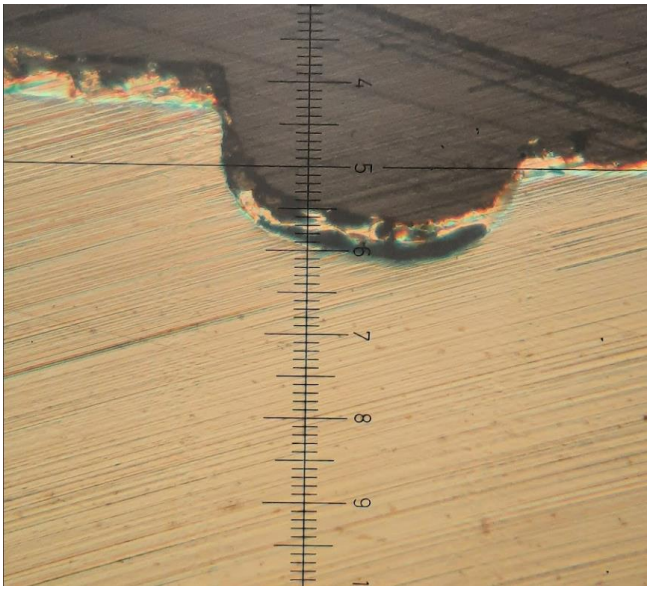


Рисунок 3.7 – Поперечний перетин труби 80×60×2 (×200)

Присутність неметалевих включень (рис. 3.8) в основному металі (строчених оксидів) може сприяти погіршенню стабільності процесу лазерного зварювання, що буде проявлятись в підвищеному розбризкуванні.

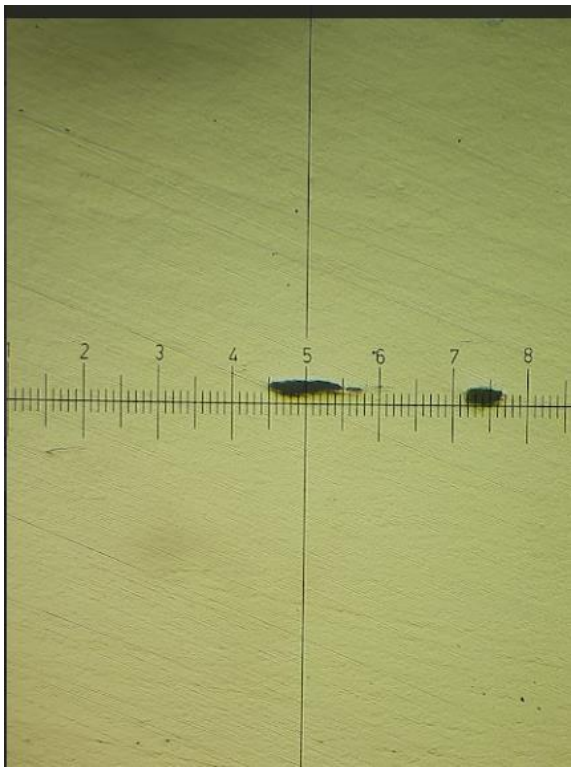


Рисунок 3.8 – Неметалеві включення в основному металі (×200)

Під час потрапляння крупних оксидних неметалевих включень в реакційну зону зварювання відбувається їх миттєва дисоціація, при який вивільнений кисень вступає в реакцію з металом зварювальної ванни. При цьому можуть утворюватися кратери на поверхні шва (див. рис. 3.4), ближче до границі з основним металом. Цей процес може носити вибуховий характер і потребує додаткового вивчення.

На рис. 3.9 приведена мікроструктура цинкового покриття.

Рисунок 3.9 – Мікроструктура цинкового покриття (×400)

Як видно, покриття є якісним і має дрібнокристалічну структуру. Проте дослідження мікроструктури покриття показало наявність на ній подряпин різної глибини. Вони можуть спровокувати місця зародження локальної корозії. Це, зокрема, спостерігається в процесі корозійних досліджень на ділянках, які знаходяться на значному віддаленні від зони шва (див. рис. 3.1).

Як видно з результатів дослідження корозійної стійкості, зварний шов, отриманий методом лазерного зварювання, має стійкість до корозії не нижче, ніж основний матеріал. Причому це спостерігається як в умовах наявності захисного цинкового покриття, так і після видалення цинкового покриття внаслідок витримки в 10% розчині HCl.

Це явище є нетиповим. Часто внаслідок структурної та хімічної неоднорідності зварного шва та **зони термічного впливу** (ЗТВ), саме вони стають місцем виникнення мікрогальванічних пар.

Для пояснення причин цього ефекту були проведені додаткові дослідження мікроструктури шва.

Загальний вигляд мікроструктури зварного шва на профілі з товщиною металу 1,2 мм приведено на рис. 3.10.

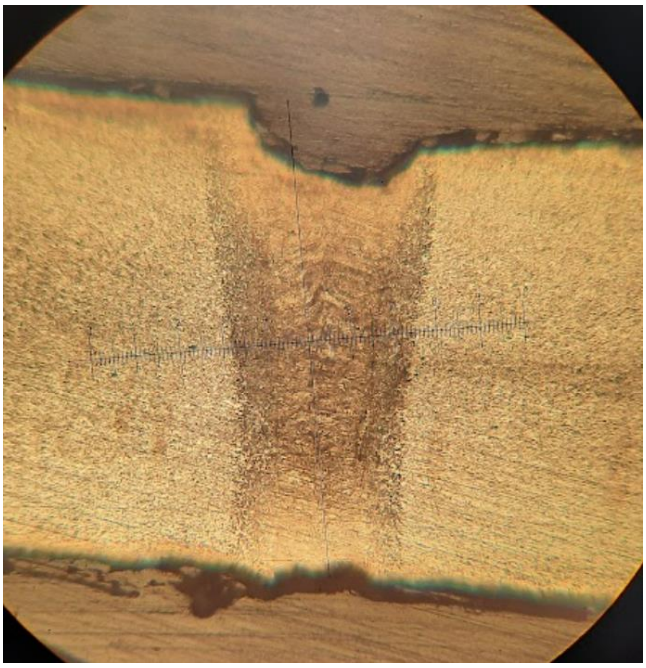


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд мікроструктури зварного шва (×100) після травлення 4% розчином HNO_3 в етанолі

З рис. 3.10 видно, що зона сплавлення має чітку дендритну структуру, характерну для рідкого металу, що кристалізується. Ширина зони становить профіля (труби). Це може бути пов’язано з особливостями розподілу енергії лазерного променю при зварюванні.

Границя з твердим металом досить різка. На рис. 3.11 та 3.12, де мікроструктуру зварного шва представлено зі збільшеннями ×200 та ×400 відповідно, видно, що зона термічного впливу має протяжність 1 – 1,5 мм. Вона

зберігає дрібнозернисту структуру, дисперсність якої знаходиться на рівні вихідного металу. Це пояснюється високою питомою енергією лазерного променю, коли швидкість процесу плавлення металу більше, ніж швидкість теплопередачі у глибину основного металу. Тому зона термічного впливу відносно вузька, її температура швидко падає за рахунок теплопередачі у відносно холодний основний метал і значного зростання зерна в зоні термічного впливу не спостерігається.

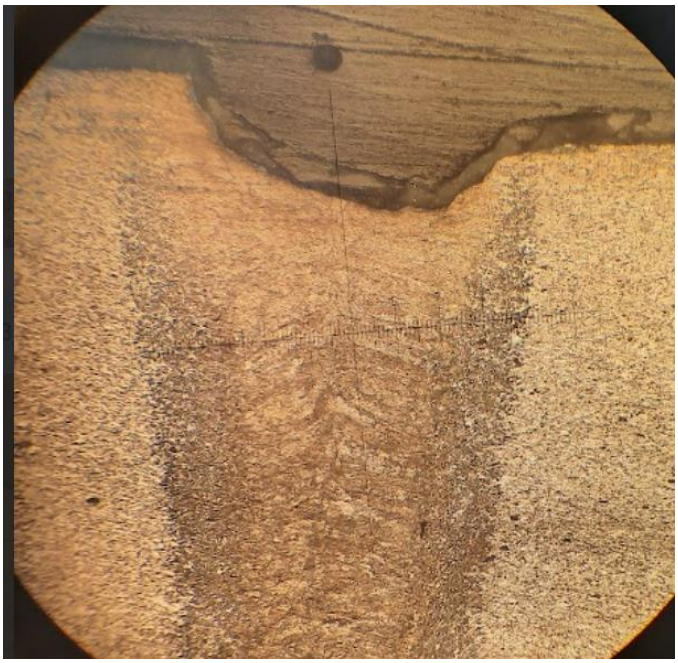


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд мікроструктури зварного шва (×200) після травлення 4% розчином HNO_3 в етанолі

Крім того, подрібнення зерна пов’язано також з протіканням прямого $\alpha \rightarrow \gamma$ т

а На рис. 3.12 показано детальну будову зони сплавлення при зварюванні. Видно, що зона зустрічі фронтів кристалізації щільна, слідів усадочної пористості не виявляється. Це підтверджується також даними рис. 3.6 та 3.7 де на нетравленій поверхні також не виявлено ні пористості ні неметалевих включень.

р

о

т

н

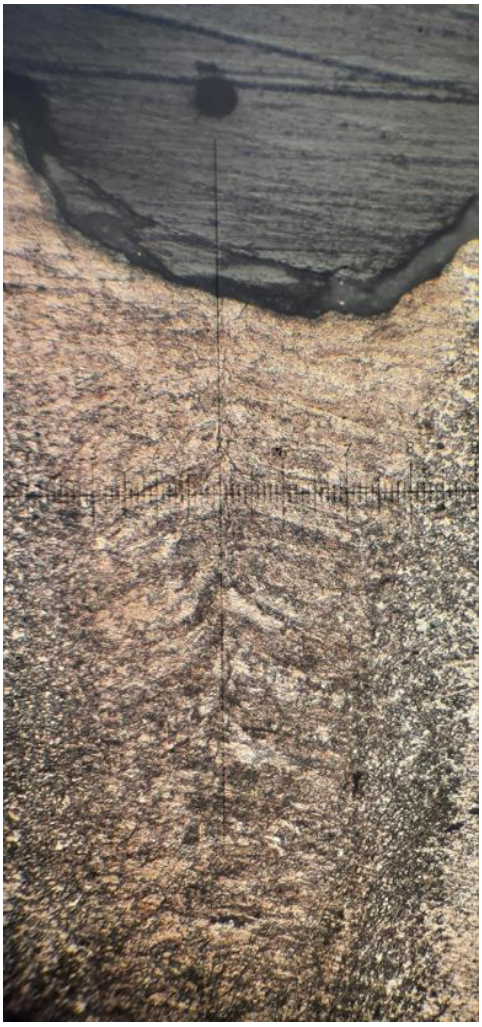


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд мікроструктури зварного шва (×400) після травлення 4% розчином HNO_3 в етанолі

Дендрити орієнтовані у напрямку відведення тепла, деякий поворот їх від чітко перпендикулярного напрямку відносно лінії стику пов’язаний з деякою нерівномірністю розподілу енергії по висоті шва. Верхня частина зони сплавлення має більшу ширину, дендрити мають більший розмір. Відсутність значного викривлення дендритів та вогнута форма верхньої поверхні шву свідчать, що кристалізація метала відбулася вже після закінчення процесу стиснення кромок.

Таким чином, з точки зору мікроструктури висока корозійна стійкість металу шва та ЗТВ пояснюється тим, що у низьковуглецевому металі з мінімальним вмістом елементів, схильних до ліквації (Si, S, P), хімічна неоднорідність матеріалу не виникає, а висока швидкість плавлення та

кристалізації не приводить до формування значної структурної неоднорідності. Власне зона сплавлення не містить неметалевих включень та мікропористості, а рівень внутрішніх напружень не зростає, так як кристалізація завершується після пластичної деформації при стисненні кромок і існують умови для релаксації напружень.

3.4 Висновки по розділу 3

Встановлено, що після експозиції 72 години в 5% розчині NaCl зварні шви та основний метал профілів **45×45×2 мм, 40×60×1,2 мм, 80×60×2 мм** не зазнали візуальних змін, що свідчить про відсутність активної корозії в цих умовах.

Виявлено, що після 72 годин у 90% розчині NaCl на швах профілів **45×45×2 мм та 80×60×2 мм** утворився білий наліт із коричнево-сірими плямами, а на основному металі спостерігалися локальні ділянки корозійного руйнування, що свідчить про нерівномірне пошкодження захисного покриття.

Показано, що при збільшенні ×50 у зварних швах профілів **40×60×1,2 мм та** шва до основного металу, що може бути спричинене ввігнутістю поверхні шва та капілярним ефектом, зумовленим лускатістю та неповним заповненням шва при товщинах **1,5-2,0 мм**.

Встановлено, що вплив 10% HCl є руйнівним для цинкового покриття на профілях **45×45×2 мм** та **80×60×2 мм**, корозія протікає зі швидкістю **мкм/хв** і поступово сповільнюється через зниження концентрації кислоти внаслідок реакції з металом.

Виявлено, що після витримки в 10% HCl поверхня шва та основного металу профілів **45×45×2 мм** набуває темно-сірого кольору, а виражена лускатість шва свідчить про наявність оксидного шару, що складається зі шлаків **FeO-MnO-SiO_2-ZnO** та утримується завдяки мікрошпінелям у міжфазній зоні.

Доведено, що зварний шов профілів **40×60×1,2 мм та 80×60×2 мм** має корозійну стійкість не нижчу, ніж основний метал, про що свідчить відсутність значного

руйнування після тривалого контакту з HCl, а також збереження лускатої структури без ефекту «полірування» кислотою.

Встановлено, що мікроструктура зварного шва профілів **40×60×1,2 мм** характеризується чіткою дендритною структурою з шириною зони сплавлення **2-3 мм**, яка розширюється ближче до поверхні труби через особливості розподілу енергії лазерного променя.

Виявлено, що зона термічного впливу (1-1,5 мм) у профілях **40×60×1,2 мм** зберігає дрібнозернисту структуру без значного зростання зерна, що пояснюється високою швидкістю теплових процесів під час лазерного зварювання та ефектом швидкого охолодження основного металу.

Показано, що неметалеві включення в основному металі профілів **80×60×2 мм**, зокрема оксиди, можуть сприяти нестабільності процесу зварювання, що проявляється підвищеним розбризкуванням та утворенням кратерів на поверхні шва.

Доведено, що хімічна та структурна однорідність металу шва профілів **40×60×1,2 мм** запобігає утворенню мікрогальванічних пар, а рівень внутрішніх напружень мінімальний завдяки завершенню кристалізації після пластичної деформації кромок.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ОЦИНКОВАНИХ ПРОФІЛІВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Оптимізація хімічного складу. Хімічний склад досліджених зразків (див. Додаток А) типовий для киплячої сталі, але навіть для такої сталі характеризується надзвичайно низьким вмістом кремнію та зниженим вмістом марганцю. Для такого металу також характерна присутність підвищеного вмісту оксидних неметалевих включень. У поєднанні з відсутністю захисту шву від окислення будь яким методом, що є особливістю лазерного зварювання, це приводить до окислення розплавленого металу (виникнення «іскріння» під час зварювання).

Низький вміст кремнію (Si) та марганцю (Mn) може спричиняти проблеми під час лазерного зварювання через підвищену кількість неметалевих включень та окислення.

Тому **рекомендується** для відповідальних замовлень та для виробництва продукції підвищеної якості використовувати метал з вмістом **Si ≥ 0,1%** та **Mn ≥ 0,3%** при мінімально можливому вмісті сірки та фосфору. Проте слід враховувати, що збільшення вмісту кремнію та марганцю може підвищити міцність матеріалу та утруднити процес формування профілю методом холодної деформації.

Варто врахувати, що підвищений вміст Si сприяє утворенню силікатних неметалевих включень, що може погіршити пластичність металу, зокрема в зоні зварного шва.

Для визначення оптимального діапазону концентрацій вказаних елементів потрібно проведення додаткових експериментів.

Додатково можна **рекомендувати**: окрім коригування хімічного складу, варто розглянути застосування флюсу або захисного середовища (наприклад, аргону або азоту) для зменшення окислення під час зварювання.

Проблеми з макроструктурою зони з'єднання. Макроструктура зони з'єднання є нестабільною і спостерігається як недостатнє зближення кромок з формуванням западини на поверхні шва, так і зміщення кромок. Перше може послаблювати шов, а друге погіршує зовнішній вид продукції.

Рекомендовано звернути увагу на налаштування вузла зближення кромок при зварюванні.

Проблема недостатнього зближення кромок може бути пов'язана не лише з налаштуванням вузла зближення, а й із якістю підготовки кромок перед зварюванням.

Тому додатково можна **рекомендувати**: слід провести аналіз шорсткості кромок після різання та забезпечити їх якісну обробку перед зварюванням. Це може зменшити ризик формування западин і зміщення.

Подряпини на оцинкованій поверхні. Наявність подряпин на оцинкованій поверхні профілю може бути пов'язана як з її пошкодженням при виробництві та транспортуванні напівфабрикату, так і з особливостями процесів деформування при виготовленні профіля.

Проте, окремі дефекти цинкового покриття не приводять до катастрофічної корозії внаслідок особливостей анодної (протекторної) дії цинкового покриття.

Подряпини можуть не лише знижувати корозійну стійкість, а й бути концентраторами напружень, що потенційно може спричинити тріщини під час експлуатації.

Для підвищення якості продукції **рекомендується** приділити увагу визначенню причин появи пошкоджень та їх усуненню.

Оптимізація режимів лазерного зварювання. Важливо підібрати правильну швидкість зварювання та потужність лазера для мінімізації перегріву металу, що може спричинити грубу зернисту структуру в зоні термічного впливу.

Рекомендовано: провести серію експериментів із варіюванням швидкості подачі та потужності лазера, а також оцінити мікроструктуру шва та механічні властивості отриманих профілів.

Контроль товщини та рівномірності цинкового покриття. Оцінка цинкового покриття перед зварюванням важлива, оскільки нерівномірне або надмірно товсте покриття може спричинити дефекти в зоні шва.

Рекомендовано: використання електромагнітних або ультразвукових методів контролю товщини покриття перед зварюванням та введення додаткових параметрів контролю в технологічний процес.

Автоматизований контроль якості. Використання системи візуального або лазерного контролю в реальному часі для виявлення дефектів зварного шва, западин, зміщення кромок чи пошкоджень покриття.

Рекомендовано: впровадити систему машинного зору (наприклад, камери з алгоритмами штучного інтелекту), яка автоматично аналізуватиме якість зварного шва та оцинкованої поверхні.

7. Зазначені рекомендації можна покращити через:

- Додавання заходів щодо захисту шва від окислення (покриття, фарби).
- Покращення параметрів обробки кромок.
- Використання сучасних методів контролю товщини цинкового покриття та автоматизованого контролю якості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході проведених досліджень було вивчено корозійну стійкість зварних швів гнутозварних профілів з оцинкованої сталі, виготовлених методом лазерного зварювання. На основі отриманих експериментальних даних можна зробити такі висновки:

Застосована технологія зварювання забезпечує формування щільного шва без мікропористості та підвищення вмісту неметалевих включень.

Після 72 годин у 5% розчині NaCl візуальних змін на поверхні зварного шва та основного металу не зафіксовано, що свідчить про достатню корозійну стійкість у помірно агресивному середовищі. У 90% розчині NaCl спостерігалися локальні пошкодження захисного покриття, утворення білого нальоту та коричнево-сірих плям, що свідчить про вибірковий вплив хлоридів на зони з нерівномірною товщиною цинкового шару.

Таким чином, при випробуванні представлених зразків у водних розчинах протекторну роль не дивлячись на порушення шару цинку на поверхні шва і локалізації корозійних процесів в зоні зварного шва не відбувається. Шов не є місцем початку корозійного руйнування. Його висока однорідність та відсутність порушень електропровідності в зоні шва дозволяє ефективно використовувати протекторний захист цинкового покриття.

Встановлено, що **10% HCl** має руйнівний вплив на цинкове покриття, корозія відбувається зі швидкістю 5-10 мкм/хв. Зварний шов проявив високу корозійну стійкість і не зазнав значного руйнування, що пояснюється особливостями його мікроструктури та відсутністю хімічної неоднорідності.

Таким чином, додаткові дослідження процесу електрохімічної корозії в 10% водному розчині HCl показали, що цинкове покриття відіграє свою захисну роль і в цьому випадку. Після повного розчинення захисного покриття метал шва та зони термічного впливу не утворює гальванічні пари з основним металом профілю і корозія носить рівномірний характер.

Встановлено, що зварний шов не є «слабким місцем» і не приводить до локалізації корозійних процесів в зоні шва та зони термічного впливу. Великий вплив на фактичний строк служби профілю буде мати якість лакофарбового чи іншого захисного покриття готового профілю та товщина та суцільність цинкового покриття заготовки.

5. Дослідження показало, що зварний шов має чітку дендритну структуру з рівномірною зоною сплавлення (2-3 мм), що забезпечує його високу механічну міцність і корозійну стійкість. Зона термічного впливу (1-1,5 мм) зберігає дрібнозернисту структуру, що сприяє стабільності механічних властивостей після зварювання.

Виявлені недоліки виробничого процесу та розроблені рекомендації щодо їх усунення. Виявлено локальні дефекти зварного шва, такі як западини та зміщення кромок, що можуть послаблювати конструкцію. Для їх мінімізації рекомендовано оптимізувати процес зближення кромок перед зварюванням. Дослідження показало наявність подряпин на оцинкованій поверхні, що може знижувати корозійну стійкість і механічну надійність виробу. Для їх усунення необхідно вдосконалити процес транспортування та обробки профілів. Аналіз складу металу вказав на низький вміст кремнію (Si) і марганцю (Mn), що сприяє утворенню неметалевих включень і підвищеному розбризкуванню під час зварювання. Рекомендується коригування хімічного складу сталі для покращення якості шва.

Розроблені рекомендації щодо вдосконалення технології містять потреби у наступному:

- Оптимізація режимів лазерного зварювання для зменшення перегріву металу та покращення однорідності шва.
- Впровадження захисту зони зварювання (захисний газ або покриття) для зменшення окислення під час процесу.
- Контроль рівномірності та товщини цинкового покриття для зниження ймовірності локальної корозії.

- Впровадження автоматизованих систем контролю якості (лазерне сканування, машинний зір) для оперативного виявлення дефектів у процесі виробництва.

Таким чином, результати досліджень показали, що зварні шви оцинкованих профілів, виготовлені методом лазерного зварювання, мають високу корозійну стійкість та не поступаються основному металу. Виявлені недоліки виробничого процесу можуть бути усунені шляхом оптимізації хімічного складу сталі, покращення технології зварювання та впровадження сучасних методів контролю якості. Це сприятиме підвищенню надійності та довговічності готової продукції. Для подальшого підвищення якості продукції слід врахувати рекомендації розділу 4.

Результати роботи передані Замовнику (див. Акт приймання-передачі, Додаток Б) у вигляді цього звіту та технічного звіту (Додаток В).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

охмурський В. І. Розвиток досліджень корозії та корозійно-механічного руйнування металів і методів їх захисту (Огляд). *Фізико-хімічна механіка м*

*a*Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, 2017. P. 3–30. ISBN *m*

*e*1730–1751. DOI: 10.1002/maco.202213140.

*p*1999. Vol. 78. P. 47–56.

i 2025. Vol. 73, No. 1. P. 189–198. DOI: 10.18311/jmmf/2025/46985.

a

*o*ufeiani L., Foliente G., Nguyen K. T. Q., San Nicolas R. Corrosion protection of steel

e

b

оденніков С. А., Скачков В. О., Воденнікова О. С., Гнатишак Р. В. Методика прискорених випробувань матеріалу металоконструкцій на основі багатофазних сплавів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2023. №2. С. 20–25. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-2-3.

2023. Vol. 12, No. 4. P. 1476–1520. DOI: 10.17675/2305-6894-2023-12-4-6.

.

i

Національний фонд нормативних документів України. Офіційний каталог стандартів. URL:

15. ДСТУ ISO 7384:2022. Корозійні випробування в штучній атмосфері. Загальні вимоги (ISO 7384:1986, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 8 с.

16. ДСТУ EN 1670:2014. Будівельна фурнітура. Стійкість до корозії. Вимоги та методи випробування (EN 1670:2007, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 10 с.

4

s

17. ДСТУ EN ISO 7539-11:2022. Корозія металів і сплавів. Випробування на корозію під напругою. Частина 11. Настанови щодо випробування стійкості металів і сплавів до водневої крихкості та водневого розтріскування (EN ISO 7539-11:2013, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 20 с.

18. ДСТУ EN ISO 14713-1:2022. Покриття цинкові. Настанови та рекомендації щодо захисту від корозії конструкцій із чавуну та сталі. Частина 1. Загальні принципи проектування та корозійної стійкості (EN ISO 14713-1:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. [Кількість сторінок не вдалося визначити].

19. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування. Київ: Мінрегіон України, 2014. 23 с.

20. ДСТУ ISO 9227:2015. Випробування на корозію в штучних атмосферах. Випробування соляним туманом (ISO 9227:2012, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 19 с.

21. ДСТУ ISO 12944-5:2019. Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 5. Захисні лакофарбові системи (ISO 12944-5:2018, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 35 с. (ISO 12944-5:2018 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 5: Protective paint systems. Geneva: International

ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres –

23. ASTM B117-19. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken: ASTM International, 2019. 13 p.

25. MIL-STD-202G. Method 101E Salt Atmosphere (Corrosion). Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2002. 14 p.

26. MIL-STD-810H. Method 509.7 Salt Fog. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2019. 16 p.

27. MIL-STD-883K. Method 1009.8 Salt Atmosphere. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2019. 14 p.

28. IEC 60068-2-52:2017. Environmental testing – Part 2-52: Tests – Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium chloride solution). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. 20 p.

29. ASTM D1654-08. Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments. West Conshohocken: ASTM International, 2008. 10 p.

30. ASTM G31-21. Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. West Conshohocken: ASTM International, 2021. 18 p.

31. ISO 2812-2:2018 Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Part 2: Water immersion method. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 10 p.

32. NACE TM0172-2015. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking in Hydrogen Sulfide (H_2S) Environments. Houston: NACE International, 2015. 28 p.

33. Feng Z., Frankel G. S., Matzdorf C. A. Quantification of Accelerated Corrosion Testing of Coated AA7075-T6. *Journal of The Electrochemical Society.* 2014. № 161(1). C. C42-C49. DOI: 10.1149/2.059401jes.

34. Нарівський О. Е., Сніжной Г. В., Субботін С. О. та ін. Математичне моделювання корозійної поведінки сталей аустенітного класу в хлоридовмісних середовищах при роботі пластинчастих теплообмінників. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* 2023. № 1. С. 3-20.

35. Воденніков С. А., Скачков В. О., Воденнікова О. С. та ін. Методика прискорених випробувань матеріалу металоконструкцій на основі багатофазних сплавів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* 2023. № 2. С. 3-15.

36. Meade C. L. Accelerated Corrosion Testing. *Materials Performance.* 2000. № 98(6). C. 540-545. DOI: 10.1002/mp.200009856.

37. Montoya P., Díaz I., Granizo N., Cano H., Morcillo M. An study on accelerated corrosion testing of weathering steel. *Materials Chemistry and Physics*. 2013. C. 1–9. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.07.009.

38. Lin C.-C., Wang C.-X. Correlation between accelerated corrosion tests and atmospheric corrosion tests on steel. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2005. № 35. С. 837–843. DOI: 10.1007/s10800-005-1322-7.

39. Robinet L., Thickett D. A New Methodology for Accelerated Corrosion Testing. *Studies in Conservation*. 2003. № 48(4). С. 263–268.

40. Van den Steen N., Simillion H., Thierry D., Terryn H., Deconinck J. Comparing Modeled and Experimental Accelerated Corrosion Tests on Steel. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017. № 164(9). С. C554–C562. DOI: 10.1149/2.0951709jes.

41. Austin S.A., Lyons R., Ing M.J. Electrochemical Behavior of Steel-Reinforced Concrete During Accelerated Corrosion Testing. *Corrosion*. 2004. № 60(2). С. 203–212. DOI: 10.5006/1.3287722.

42. Yuan Y., Ji Y., Shah S.P. Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures. *ACI Structural Journal*. 2007. № 104(3). С. 344–353. DOI: 10.14359/18748.

43. Nossoni G., Harichandran R. Current Efficiency in Accelerated Corrosion Testing of Concrete. *Corrosion*. 2012. № 68(9). С. 801–809. DOI: 10.5006/0428.

44. Malumbela G., Moyo P., Alexander M. A step towards standardising accelerated corrosion tests on laboratory reinforced concrete specimens. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 2012. № 54(2). С. 78–85. DOI: 10.17159/2309-8775/2012/v54n2a7.

45. LeBozec N., Blandin N., Thierry D. Accelerated corrosion tests in the automotive industry: A comparison of the performance towards cosmetic corrosion. *Materials and Corrosion.* 2008. № 59(11). С. 889–894. DOI: 10.1002/maco.200804168.

46. Antunes R.A., Ichikawa R.U., Martinez L.G., Costa I. Characterization of Corrosion Products on Carbon Steel Exposed to Natural Weathering and to Accelerated Corrosion Tests. *International Journal of Corrosion.* 2014. № 2014. С. 1–10. DOI: 10.1155/2014/419570.

47. Ahmad S. Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete. *The Arabian Journal for Science and Engineering.* 2009. № 34(2C). С. 95–104. DOI: 10.1007/s13369-009-0004-x.

48. Papadopoulos M.P., Apostolopoulos C.A., Zervaki A.D., Haidemenopoulos G.N. Corrosion of exposed rebars, associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion tests. *Construction and Building Materials.* 2011. № 25. С. 3367–3374. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.027.

49. Simpson C.H., Ray C.J., Skerry B.S. Accelerated corrosion testing of industrial maintenance paints using a cyclic corrosion weathering method. *Journal of Protective Coatings and Linings.* 1991. № 8(5). С. 37–48.

50. Павленко В. М., Мануйлов В. М., Кужель В. П., Семенченко С. В., Гапула В. В. Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2023. № 2(18). С. 127–133. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133.

51. Aljibori H.S., Alamiery A.A., Kadhum A.A.H. Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition.* 2023. № 12(4). P. 1476–1520. DOI: 10.17675/2305-6894-2023-12-4-6.

52. Mizuno D. Automotive corrosion and accelerated corrosion tests for zinc-coated steels. *ISIJ International.* 2018. № 58(9). P. 1562–1568. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-159.

53. Wang S., Luo K., Sun T., Li G., Cui J. Corrosion behavior and failure mechanism of electromagnetic pulse welded joints between galvanized steel and aluminum alloy sheets. *Journal of Manufacturing Processes.* 2021. № 64. P. 937–947. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.039.

54. Sinha A.K., Anand A. Development of an alternative for corrosive resistant galvanized steel compatible for laser welding. *Materials Today: Proceedings.* 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.096.

55. LeBozec N., Thierry D. A new device for simultaneous corrosion fatigue testing of joined materials in accelerated corrosion tests. *Materials and Corrosion.* 2015. № 66(9). P. 893–898. DOI: 10.1002/maco.201407984.

56. CORROSIONBOX. Salt Spray Fog Chamber [Електронний ресурс]. Milano: Cofomegra Srl. Режим доступу: https://cofomegra.it/en/corrosionbox/

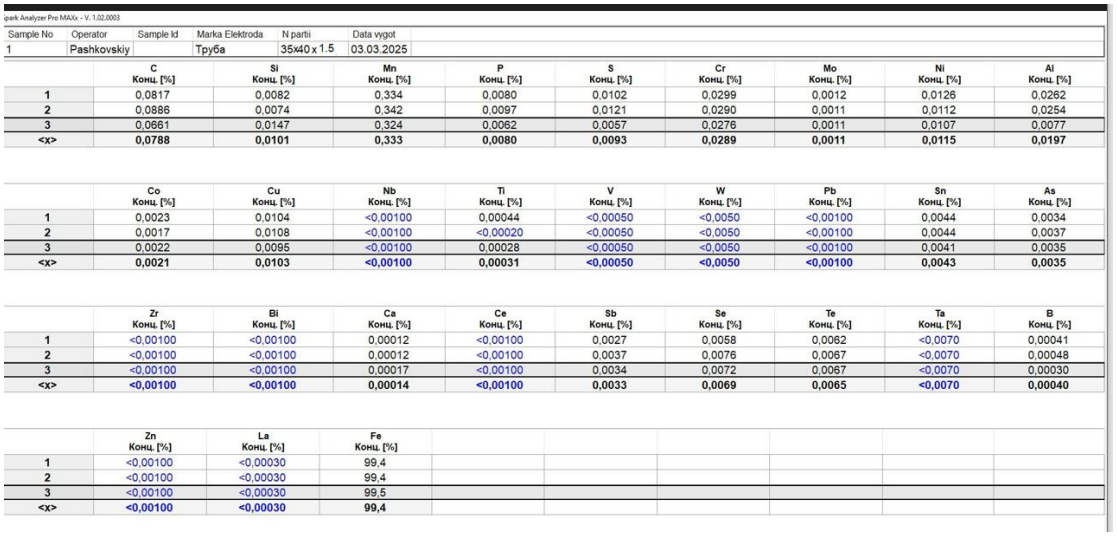
57. Industrial Physics. Cyclic Corrosion Cabinet [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://industrialphysics.com/product/cyclic-corrosion-cabinet/

58. Ascott Analytical. Kesternich Chamber [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.ascott-analytical.com/kesternich-chamber/

59. Lisun Group. Salt Spray Test Machine [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.lisungroup.com/products/environmental-test-chamber/salt-spray-test-machine.html

ДОДАТКИ

Додаток А. Протоколи визначення хімічного складу зварених профілів (труб)



Spark Analyzer Pro MAXx - V. 1.02.0003

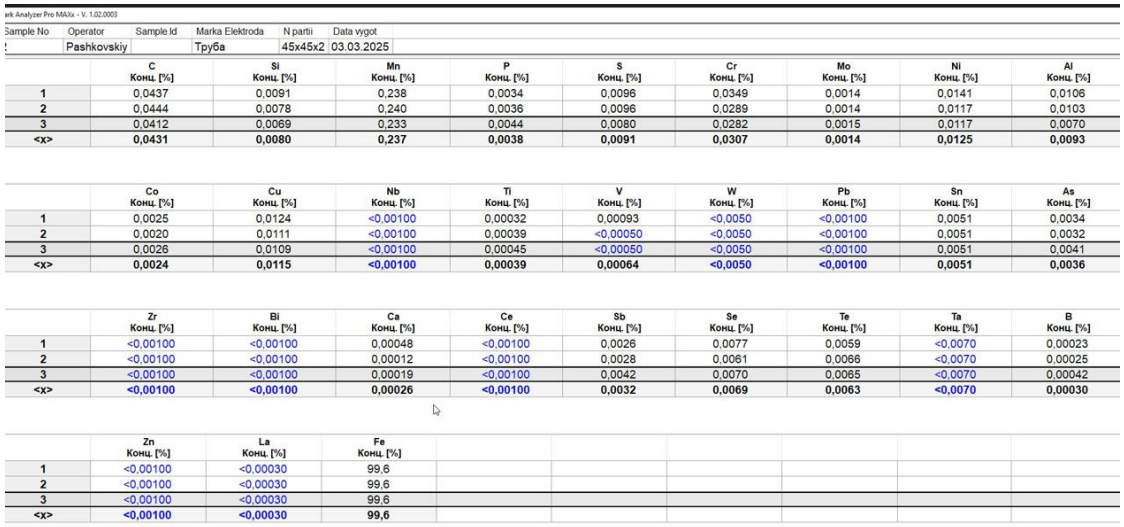
Sample No	Operator	Sample Id	Marka Elektroda	N partii	Data vygot
1	Pashkovskiy		Труба	35x40 x 1.5	03.03.2025

	C Конц. [%]	Si Конц. [%]	Mn Конц. [%]	P Конц. [%]	S Конц. [%]	Cr Конц. [%]	Mo Конц. [%]	Ni Конц. [%]	Al Конц. [%]
1	0,0817	0,0082	0,334	0,0080	0,0102	0,0299	0,0012	0,0126	0,0262
2	0,0886	0,0074	0,342	0,0097	0,0121	0,0290	0,0011	0,0112	0,0254
3	0,0661	0,0147	0,324	0,0062	0,0057	0,0276	0,0011	0,0107	0,0077
<x>	**0,0788**	**0,0101**	**0,333**	**0,0080**	**0,0093**	**0,0289**	**0,0011**	**0,0115**	**0,0197**

	Co Конц. [%]	Cu Конц. [%]	Nb Конц. [%]	Ti Конц. [%]	V Конц. [%]	W Конц. [%]	Pb Конц. [%]	Sn Конц. [%]	As Конц. [%]
1	0,0023	0,0104	<0,00100	0,00044	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0044	0,0034
2	0,0017	0,0108	<0,00100	<0,00020	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0044	0,0037
3	0,0022	0,0095	<0,00100	0,00028	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0041	0,0035
<x>	**0,0021**	**0,0103**	**<0,00100**	**0,00031**	**<0,00050**	**<0,0050**	**<0,00100**	**0,0043**	**0,0035**

	Zr Конц. [%]	Bi Конц. [%]	Ca Конц. [%]	Ce Конц. [%]	Sb Конц. [%]	Se Конц. [%]	Te Конц. [%]	Ta Конц. [%]	B Конц. [%]
1	<0,00100	<0,00100	0,00012	<0,00100	0,0027	0,0058	0,0062	<0,0070	0,00041
2	<0,00100	<0,00100	0,00012	<0,00100	0,0037	0,0076	0,0067	<0,0070	0,00048
3	<0,00100	<0,00100	0,00017	<0,00100	0,0034	0,0072	0,0067	<0,0070	0,00030
<x>	**<0,00100**	**<0,00100**	**0,00014**	**<0,00100**	**0,0033**	**0,0069**	**0,0065**	**<0,0070**	**0,00040**

	Zn Конц. [%]	La Конц. [%]	Fe Конц. [%]
1	<0,00100	<0,00030	99,4
2	<0,00100	<0,00030	99,4
3	<0,00100	<0,00030	99,5
<x>	**<0,00100**	**<0,00030**	**99,4**



ark Analyzer Pro MAXx - V. 1.02.0003

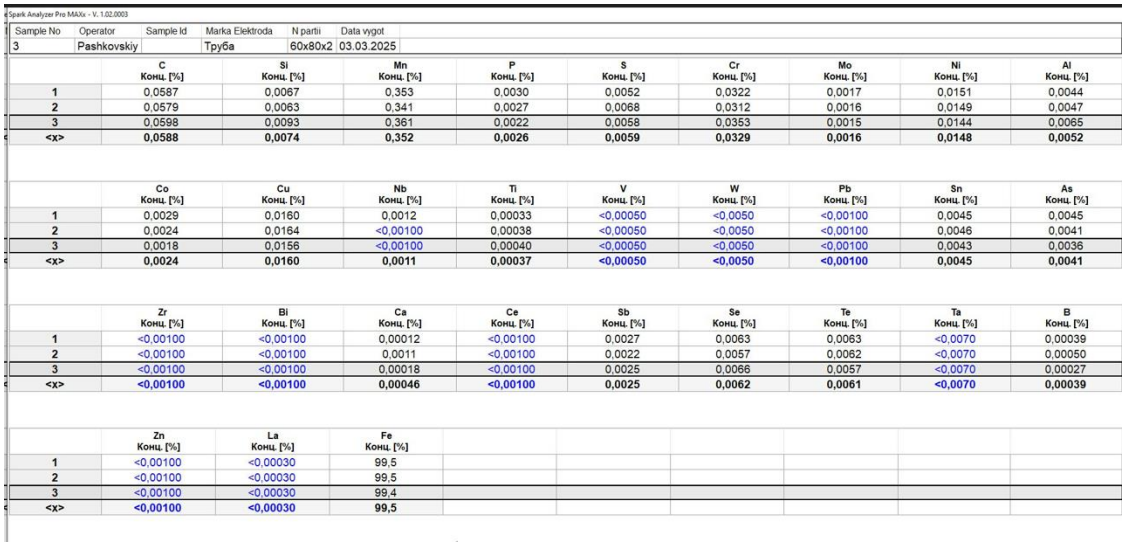
Sample No	Operator	Sample Id	Marka Elektroda	N partii	Data vygot
2	Pashkovskiy		Труба	45x45x2	03.03.2025

	C Конц. [%]	Si Конц. [%]	Mn Конц. [%]	P Конц. [%]	S Конц. [%]	Cr Конц. [%]	Mo Конц. [%]	Ni Конц. [%]	Al Конц. [%]
1	0,0437	0,0091	0,238	0,0034	0,0096	0,0349	0,0014	0,0141	0,0106
2	0,0444	0,0078	0,240	0,0036	0,0096	0,0289	0,0014	0,0117	0,0103
3	0,0412	0,0069	0,233	0,0044	0,0080	0,0282	0,0015	0,0117	0,0070
<x>	**0,0431**	**0,0080**	**0,237**	**0,0038**	**0,0091**	**0,0307**	**0,0014**	**0,0125**	**0,0093**

	Co Конц. [%]	Cu Конц. [%]	Nb Конц. [%]	Ti Конц. [%]	V Конц. [%]	W Конц. [%]	Pb Конц. [%]	Sn Конц. [%]	As Конц. [%]
1	0,0025	0,0124	<0,00100	0,00032	0,00093	<0,0050	<0,00100	0,0051	0,0034
2	0,0020	0,0111	<0,00100	0,00039	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0051	0,0032
3	0,0026	0,0109	<0,00100	0,00045	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0051	0,0041
<x>	**0,0024**	**0,0115**	**<0,00100**	**0,00039**	**0,00064**	**<0,0050**	**<0,00100**	**0,0051**	**0,0036**

	Zr Конц. [%]	Bi Конц. [%]	Ca Конц. [%]	Ce Конц. [%]	Sb Конц. [%]	Se Конц. [%]	Te Конц. [%]	Ta Конц. [%]	B Конц. [%]
1	<0,00100	<0,00100	0,00048	<0,00100	0,0026	0,0077	0,0059	<0,0070	0,00023
2	<0,00100	<0,00100	0,00012	<0,00100	0,0028	0,0061	0,0066	<0,0070	0,00025
3	<0,00100	<0,00100	0,00019	<0,00100	0,0042	0,0070	0,0065	<0,0070	0,00042
<x>	**<0,00100**	**<0,00100**	**0,00026**	**<0,00100**	**0,0032**	**0,0069**	**0,0063**	**<0,0070**	**0,00030**

	Zn Конц. [%]	La Конц. [%]	Fe Конц. [%]
1	<0,00100	<0,00030	99,6
2	<0,00100	<0,00030	99,6
3	<0,00100	<0,00030	99,6
<x>	**<0,00100**	**<0,00030**	**99,6**



Spark Analyzer Pro MAXx - V. 1.02.0003

Sample No	Operator	Sample Id	Marka Elektroda	N partii	Data vygot
3	Pashkovskiy		Труба	60x80x2	03.03.2025

	C Конц. [%]	Si Конц. [%]	Mn Конц. [%]	P Конц. [%]	S Конц. [%]	Cr Конц. [%]	Mo Конц. [%]	Ni Конц. [%]	Al Конц. [%]
1	0,0587	0,0067	0,353	0,0030	0,0052	0,0322	0,0017	0,0151	0,0044
2	0,0579	0,0063	0,341	0,0027	0,0068	0,0312	0,0016	0,0149	0,0047
3	0,0598	0,0093	0,361	0,0022	0,0058	0,0353	0,0015	0,0144	0,0065
<x>	**0,0588**	**0,0074**	**0,352**	**0,0026**	**0,0059**	**0,0329**	**0,0016**	**0,0148**	**0,0052**

	Co Конц. [%]	Cu Конц. [%]	Nb Конц. [%]	Ti Конц. [%]	V Конц. [%]	W Конц. [%]	Pb Конц. [%]	Sn Конц. [%]	As Конц. [%]
1	0,0029	0,0160	0,0012	0,00033	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0045	0,0045
2	0,0024	0,0164	<0,00100	0,00038	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0046	0,0041
3	0,0018	0,0156	<0,00100	0,00040	<0,00050	<0,0050	<0,00100	0,0043	0,0036
<x>	**0,0024**	**0,0160**	**0,0011**	**0,00037**	**<0,00050**	**<0,0050**	**<0,00100**	**0,0045**	**0,0041**

	Zr Конц. [%]	Bi Конц. [%]	Ca Конц. [%]	Ce Конц. [%]	Sb Конц. [%]	Se Конц. [%]	Te Конц. [%]	Ta Конц. [%]	B Конц. [%]
1	<0,00100	<0,00100	0,00012	<0,00100	0,0027	0,0063	0,0063	<0,0070	0,00039
2	<0,00100	<0,00100	0,0011	<0,00100	0,0022	0,0057	0,0062	<0,0070	0,00050
3	<0,00100	<0,00100	0,00018	<0,00100	0,0025	0,0066	0,0057	<0,0070	0,00027
<x>	**<0,00100**	**<0,00100**	**0,00046**	**<0,00100**	**0,0025**	**0,0062**	**0,0061**	**<0,0070**	**0,00039**

	Zn Конц. [%]	La Конц. [%]	Fe Конц. [%]
1	<0,00100	<0,00030	99,5
2	<0,00100	<0,00030	99,5
3	<0,00100	<0,00030	99,4
<x>	**<0,00100**	**<0,00030**	**99,5**

Додаток Б. Акт приймання-передавання

АКТ

приймання-передавання виконаної роботи
за Договором № 20257008 від «10» лютого 2025 р.

м. Запоріжжя «_12_» березня 2025 р.

ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДАНВІС», далі «**Замовник**», в особі **директора Циміданова Дениса Владиславовича**, з однієї сторони, та **ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**, далі **«Виконавець»**, в особі **ректора Поважного Олександра Станіславовича**, з іншої сторони, склали цей акт про те, що згідно Договору № 20257008 від «10» лютого 2025 р. Виконавець виконав для Замовника роботи, передбачені п.1 Договору та Технічним Завданням (Додаток 1 Договору), а саме:

«Дослідження структури та корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням».

У Замовника претензій до якості виконаних робіт немає.

За виконану роботу Замовник сплачує Виконавцю суму 50 000,00 грн. (п'ятдесят тисяч гривень 00 коп.).

41 666,67 грн. (сорок одна тисяча шістсот шістдесят шість грн. 67 коп.) без ПДВ. Сума ПДВ становить 8 333,33 грн. (всім тисяч триста тридцять три грн. 33 коп.).

ЗАМОВНИК	ВИКОНАВЕЦЬ
ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДАНВІС»	«ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
м. Київ, 04053,	«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
площа Львівська, будинок 4А, офіс 10.	м. Запоріжжя, 69008,
код ЕДРПОУ 31265999	вул. Південне шосе 80
п/р UA 8430 7770 0000 0260 0741 1123 830	код ЕДРПОУ 43663468
в АТ «А-БАНК» м. Київ,	п/р UA 1033 4851 0000 0000 2600 9120 844
МФО 307770	в АТ «ПУМБ» м. Київ,
	МФО 333485
	ІПН 436634605826
	Тел: (068) 572-09-26,
	(050) 804-44-14

ЗАМОВНИК

Директор _____ Д. В. Циміданов

ВИКОНАВЕЦЬ

Ректор _____ О. С. Поважний

Додаток В. Технічний звіт

ТЕХНІЧНИЙ ЗВІТ

за результатами виконання науково-дослідної роботи

Дослідження структури та корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням»

за договором № 20257008 від «10» лютого 2025 р. між ПП «ДАНВІС» (**Замовник**) та ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» (**Виконавець**)

Мета і визначення НДР (згідно з технічним завданням)

Встановлення особливостей структури і корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням і обґрунтування можливість використання цієї технології виробництва з мінімальними додатковими витратами на обробку зони з'єднання після зварювання

- Проведення дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням в залежності від товщини металу, що зварюється
- Вибір методики прискореної оцінки корозійної стійкості зварних з'єднань оцинкованих профілів отриманих лазерним зварюванням.
- Проведення дослідження корозійної стійкості та можливості використання продукції, отриманої методом лазерного зварювання, при мінімальній додатковій обробці зони зварювання.

Результати досліджень

1. Об'єкт дослідження

Зварні шви оцинкованих гнутозварних профілів з низьковуглецевої сталі, виготовлених методом лазерного зварювання.

2. Мета дослідження

Оцінка корозійної стійкості зварних швів у розчинах NaCl (5–90%) та HCl (10%), виявлення потенційних зон руйнування та розробка рекомендацій для підвищення довговічності продукції.

3. Досліджені зразки

- Профілі: 45×45×2 мм, 40×60×1,2 мм, 80×60×2 мм.
- Корозійні середовища: 5%, 90% NaCl (витримка 72 год при 35-37°C), 10% HCl (витримка 8 год).
- Методи аналізу: візуальний огляд, стереомікроскопія (×10 – ×50), металографічний аналіз (×100 – ×400).

4. Основні результати

1. Корозія в розчинах NaCl:
    - У 5% NaCl протягом 72 год зварні шви та основний метал не зазнали візуальних змін.
    - У 10-90% NaCl спостерігалося локальне пошкодження цинкового покриття, утворення білого нальоту та коричнево-сірих плям. Корозія не локалізувалася у зоні шва, а розподілялася рівномірно.
    - Виявлено, що протекторна дія цинку зберігається, навіть при частковому руйнуванні покриття.
2. Корозія в 10% HCl:
    - Цинкове покриття руйнується зі швидкістю 5-10 мкм/хв.
    - Зварний шов виявився стійким, корозія носить рівномірний характер, мікрогальванічні пари не утворюються.
    - Лускатість шва сприяє утриманню оксидного шару FeO-MnO-SiO_2-ZnO, що покращує стійкість до кислотної корозії.
3. Структурний аналіз:
    - Зона сплавлення: 2-3 мм, чітка дендритна структура, відсутність мікропористості.
    - Зона термічного впливу (ЗТВ): 1-1,5 мм, дрібнозерниста структура без зростання зерна.
    - Хімічна однорідність шва запобігає утворенню мікрогальванічних пар, що э позитивним ефектом.
4. Дефекти виробництва:
    - Зміщення кромок (0,25-0,3 мм), западини (0,4 мм) у швах деяких профілів.
    - Подряпини на оцинкованій поверхні, що можуть знижувати корозійну стійкість.
    - Низький вміст Si (<0,1%) та Mn (<0,3%), що сприяє утворенню неметалевих включень та розбризкуванню під час зварювання.

5. Основні рекомендації

1. **Оптимізація хімічного складу сталі**
    - Для зменшення утворення неметалевих включень та покращення стабільності зварного процесу рекомендується збільшити вміст **Si до 0,1–0,2%** та **Mn до 0,3–0,5%**.
    - Мінімізація вмісту сірки (S ≤ 0,02%) та фосфору (P ≤ 0,02%) знизить ризик утворення крихких фаз та підвищить корозійну стійкість металу.
2. **Удосконалення технології лазерного зварювання**
    - Оптимізація **потужності лазера та швидкості зварювання** для мінімізації перегріву металу, що може спричинити утворення грубозернистої структури в зоні термічного впливу.
    - Використання **захисного середовища (аргон або азот)** для зменшення окислення розплавленого металу у процесі зварювання та зниження ризику пористості.

- Введення **додаткового контролю формування шва** для мінімізації зміщення кромок та утворення западин, що були зафіксовані в окремих зразках.

6. Висновки

◈ **Зварні шви гнутозварних профілів типорозмірів 45×45×2 мм, 40×60×1,2 мм, 80×60×2 мм, виготовлених із оцинкованої штаби, демонструють корозійну стійкість, еквівалентну основному металу.** У 5% розчині NaCl протягом 72 годин не спостерігалося жодних змін поверхні, а в 90% розчині NaCl локальні корозійні процеси проявилися лише в місцях порушення суцільності цинкового покриття.

◈ **Тривалість експлуатації профілів значною мірою залежить від якості цинкового покриття штаби.** Виявлено, що нерівномірність цинкового шару на вихідному матеріалі може призводити до локальних зон корозійного ураження після тривалого впливу хлоридного середовища. Оптимальна товщина цинкового шару повинна бути не менш ніж 18–20 мкм для забезпечення довговічності.

◈ **Зварний шов залишається потенційною зоною для розвитку корозії через локальне вигоряння цинку під час зварювання.** Випробування в 10% HCl показали, що цинкове покриття повністю руйнується зі швидкістю 5-10 мкм/хв, проте корозія не поширюється на метал шва.

Рекомендовано нанесення захисного лакофарбового покриття на зварний шов для запобігання корозійним процесам у місцях втрати цинку.

◈ **Оптимізація технологічних параметрів зварювання та контроль хімічного складу сталі дозволять підвищити корозійну стійкість профілів.** Аналіз складу сталі (низьковуглецева сталь з мінімальним вмістом Si ≤ 0,02% та Mn ≤ 0,2%) виявив тенденцію до утворення неметалевих включень, що може впливати на якість шва.

Рекомендовано використовувати сталь із підвищеним вмістом Si ≥ 0,1% та Mn ≥ 0,3% для покращення зварюваності та зменшення ризику корозійного руйнування профілю.

Д-р техн. наук, професор **Володимир КУХАР**

Д-р техн. наук, професор **Володимир ПАШИНСЬКИЙ**

Канд. техн. наук., доцент **Ігор БОЙКО**