

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Дослідження малоциклової корозійної втоми
конструкційних сталей з металізаційними покриттями в
середовищах мінеральних добрив»**

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Войтишин Володимир Михайлович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент Березовецький Андрій Петрович
(Прізвище та ініціали)

)

Дубляни 2025

Міністерство освіти та науки України
Львівський національний університет природокористування
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)
професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(прізвище, ім'я, по батькові)

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу студенту

Войтишин Володимиру Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження малоциклової корозійної втоми конструкційних сталей з металізаційними покриттями в середовищах мінеральних добрив»

Керівник роботи к.т.н., доцент Березовецький Андрій Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЛНУП від 28 лютого 2025 року №140/к-с

2. Строк подання студентом роботи до “ 10 ” 12 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: *Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи; науково-технічна, методична та довідкова література; результати патентного пошуку; законодавча і нормативна база України з питань охорони праці.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Огляд літератури і вибір напрямків досліджень; 4.2. Методологія і методи досліджень; 4.3. Дослідження малоциклової корозійної втоми конструкційних сталей з металізаційними покриттями в середовищах мінеральних добрив; 4.4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки і пропозиції; Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: інформаційний слайд (тема, автор кваліфікаційної роботи); аналіз літературних джерел; довговічність зразків з металізаційними покриттями при деформації $\varepsilon=0,5\%$; залежність величини електродного потенціалу від тривалості випробувань; стан поверхні зразків після дії корозії КАС протягом 6 місяців; фото зломів зразків на повітрі; профілограма поверхні зразків; структура металу шва зварних з'єднань; довговічність сталей: а - на повітрі, б - в корозійному середовищі; залежність втоми сталі КД2 від амплітуди циклічної деформації; висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	Березовецький А. П. доц. кафедри машинобудування.			
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання “ 4 ” березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Огляд літературних джерел за темою	21.10.25	
2	Методика досліджень	11.11.25	
3	Проведення досліджень по малоцикловій корозійній втомі конструкційних сталей з металізаційними покриттями	21.11.25	
4	Охорона праці та захист населення	28.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	03.12.25	
6	Оформлення слайдів	12.12.25	

Студент

_____ (підпис)

Володимир ВОЙТИШИН

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Андрій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ

УДК 631.632.1

«Дослідження малоциклової корозійної втоми конструкційних сталей з металізаційними покриттями в середовищах мінеральних добрив»

Войтишин В.М. – Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування – Дубляни, Львівський НУВМБ - 2025.

66 с. текст. част., 12 рис., 5 табл., 15 слайдів, 23 джерела.

У кваліфікаційній роботі викладено основні положення формування поверхневого шару деталей машин при різних зміцнювальних обробках і його вплив на малоциклову витривалість в агресивних середовищах.

Розглянуті питання кінетики втомного руйнування при циклових навантаженнях у пружно-пластичній області. Викладені методи досліджень і описане випробувальне обладнання на малоциклову втому конструкційних сталей.

Досліджено вплив втоми конструкційних сталей на безпеку працівників та навколишнє середовище.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1. Вплив мінеральних добрив на довговічність конструкційних сталей	8
1.2. Втома конструкційних матеріалів і методи підвищення довговічності... ..	11
1.3. Довговічність конструкційних сталей із металізаційними покриттями ..	24
1.4. Вплив неметалевих включень на втому конструкційних сталей у корозійно-активних середовищах	25
1.5. Висновки до розділу 1	26
2. МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	29
2.1. Методологічні засади досліджень	29
2.2. Об'єкти досліджень.....	30
2.3. Підготовка та обробка зразків	31
2.4. Середовища корозійної дії та схеми корозійної витримки.....	32
2.5. Методика випробувань на малоциклову втому	33
2.6. Визначення швидкості корозії та електрохімічних параметрів	33
2.7. Металографічні та фрактографічні дослідження.....	34
2.8. Статистична обробка та узагальнення результатів	35
3. ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОЦИКЛОВОЇ КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ З МЕТАЛІЗАЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ В СЕРЕДОВИЩАХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ	36
3.1. Корозійна малоциклова втома сталей з металізаційними покриттями	36
3.2. Вплив плакування на опір малоцикловій втомі	44
3.3. Довговічність сталей з вакуумно-плазмовими покриттями.	50
3.4. Висновки до розділу 3	54
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	57
4.2. Вимоги безпечної організації лабораторних робіт	57
4.3. Безпека при роботі з обладнанням для малоциклових навантажень.....	58
4.4. Пожежна безпека в лабораторії	59

4.5. Дії персоналу в разі аварії чи надзвичайної ситуації	59
4.6. Система цивільного захисту та план реагування.....	60
4.7. Висновки до розділу 4	60
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	61
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	64

ВСТУП

На сучасному етапі продовжує зростати виробництво і використання засобів хімізації сільського господарства: мінеральних і органічних добрив, гербіцидів, фунгіцидів, інсектицидів, регуляторів росту рослин. Актуальним стоїть питання впливу цих препаратів на довговічність машин і механізмів, які застосовуються при приготуванні, транспортуванні і внесенні їх.

Практика показує, що більшість механізмів і машин, які працюють безпосередньо в контакті з агресивними середовищами одночасно сприймають циклічні навантаження і довговічність конструкцій при таких умовах праці значно знижується.

Багато технічних одиниць з парку машин, які контактують в роботі із засобами хімізації сільського господарства, далеко не відпрацьовують запланованого ресурсу часу через поломки, спричинені малоцикловими навантаженнями і корозійною дією агресивних середовищ.

На опір малоцикловій втомі конструкційних сталей великий вплив має фізико-механічний стан поверхні металу. В роботі проводяться дослідження металізаційних покриттів деталей машин, які працюють в контакті з мінеральними добривами.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Вплив мінеральних добрив на довговічність конструкційних сталей

Зі зростанням масштабів виробництва та застосування рідких мінеральних добрив особливої актуальності набуває проблема їх впливу на матеріали машин і обладнання, що працюють на всіх етапах життєвого циклу добрив — від стадії синтезу й зберігання до транспортування та внесення у ґрунт. Паралельно з розробленням нових марок добрив створюються спеціалізовані машини для їх застосування: агрегати ПЖУ для внесення РКД, причепи та цистерни типу ГКБ і ОЗТП для перевезення рідких добрив і їхніх сумішей. Однак склалася певна суперечність: нові типи машин фактично не проходили комплексних випробувань саме на тих марках рідких хімічних засобів, для роботи з якими вони були спроектовані.

Значна частина наявних машин для транспортування й внесення мінеральних та органічних добрив, а також отрутохімікатів, має конструктивно слабкі вузли, а поверхні деталей або зовсім не захищені, або захищені недостатньо ефективними антикорозійними покриттями. Практично відсутні машини, робочі органи яких виготовлені повністю з корозійностійких матеріалів [16].

Корозійна дія рідких добрив на сільськогосподарську техніку та відповідне технологічне обладнання досліджена неповною мірою. Окремі дослідження стосуються корозійної стійкості конструкційних матеріалів у середовищах РКД. Зокрема, вивчали корозійну поведінку вуглецевої сталі Ст3 та економнолегованих сталей X18H10T, 08X22H6T, 08X21H6M2T у розчинах РКД марки 10-34-0 (ТУ 6-08-414-78) методом гравіметричних вимірювань протягом 1000 годин. Встановлено, що глибинний показник корозії змінюється в залежності від тривалості випробувань, тому не може

розглядатися як універсальний критерій оцінки корозійної стійкості сталі [13].

Для кількісної оцінки корозійних втрат металу досліджували кінетику корозійного процесу сталі Ст3 у РКД. При зануренні зразка в розчин з коефіцієнтом конверсії 55 % та $\text{pH} = 6,67$ спостерігалось інтенсивне виділення водню, яке поступово затухало, але тривало 2...3 доби. Вагові втрати металу відзначалися лише в перші 50...55 годин випробувань. Металографічний аналіз виявив на поверхні зразків захисний фосфатний шар товщиною 3...4 мкм, який при збільшенні часу витримки від 52 до 1000 годин зростав до 6...7 мкм [16]

Показано [13], що найбільш адекватним критерієм корозійної стійкості сталі Ст3 є величина втрат металу з одиниці площі за період формування захисного шару. На відміну від вагових чи глибинних показників, які сильно залежать від загальної тривалості випробувань, такий підхід дає більш точне уявлення про поведінку вуглецевої сталі в середовищі РКД.

Було встановлено формування захисного фосфатного шару на зразках вуглецевих сталей марок 10-34-0 і 9-9-9 під дією РКД. Результати досліджень корозійної стійкості сталі Ст3 у добривах марок 9-9-9 і 7-7-10, виготовлених на основі базового розчину 10-34-0, свідчать, що глибинний показник корозії Ст3 у РКД 9-9-9 у 2...2,5 раза більший, ніж у базовому розчині. Для РКД 7-7-10 корозія металу ще інтенсивніша (на порядок вища, ніж у 10-34-0), що пов'язано, зокрема, з наявністю хлориду калію, який сповільнює формування захисного фосфатного шару [16].

Суттєвий вплив на корозійну поведінку мають солі мікроелементів $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, введені до складу РКД марок 10-34-0 і 9-9-9. Наприклад, додавання 0,7...1,0 % Мо призводить до збільшення корозійних втрат металу на стадії формування захисного шару й зростання глибинного показника корозії, особливо в РКД 10-34-0. За наявності 1,0 % В протягом 18 діб захисний шар взагалі не формується. Водночас сірчаноокислий цинк у кількості 0,2...1,0 %

активізує утворення захисного шару на поверхні сталі і суттєво зменшує корозійні втрати металу [12]. На підставі цих результатів зроблено висновок, що економнолеговані сталі демонструють високу корозійну стійкість у середовищах РКД, модифікованих мікроелементами.

В лабораторних умовах проводили випробування сталей Ст3, Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т у суспензійних РКД марки 15-15-15 при кімнатній температурі. Встановлено, що глибинний показник корозії Ст3 у суспензійних добривах на порядок вищий, ніж у базовому розчині.

Окрему увагу приділено вивченню корозії сталі Ст3 в РКД 10-34-0 на межі поділу рідкої і газової фаз у герметичній місткості протягом 1000 годин. Паралельно зразки досліджували у чисто рідкій та суто газовій фазі. Втрати металу в газовій фазі були незначними (швидкість корозії не перевищувала 0,0013 мм/рік), на поверхні спостерігали окремі плями корозії. Натомість на лінії розділу фаз сформувались глибокі заглибини шириною до 0,8 мм; у цій зоні поверхня металу не покривалася захисним шаром, що приводило до концентрування виразок та поглиблень. Швидкість корозії в цій області була у 10...15 разів більшою, ніж у рідкій фазі [13].

Показано також особливу небезпеку щілинної корозії. У спарених зразках з клиноподібною щілиною захисний шар не формувався, якщо ширина щілини була меншою за 0,3 мм. Отже, найуразливішими з корозійної точки зору є саме щілини та зони між третювими поверхнями (наприклад, між валами насосів і сальниковими ущільненнями) [9].

Визначено корозійну активність розчинів КАС стосовно вуглецевої сталі Ст3. Для цього випробовували зразки, виготовлені з листового прокату, а також зварені з одностороннім стиковим швом. Дослідження проводили в газовій фазі над розчином, на межі поділу «рідина–газ» та безпосередньо в рідкій фазі, що дозволило комплексно оцінити умови корозійного ураження металу в процесі експлуатації обладнання для КАС.

1.2. Втома конструкційних матеріалів і методи підвищення довговічності

1.2.1. Руйнування під дією циклічних напружень. Руйнування матеріалів під впливом циклічних напружень, які викликають пластичні циклічні деформації, отримало назву «малоциклової» (low-cycle) або пластичної (plastic strain) втоми. Термін «малоциклова» підкреслює, що руйнування настає при порівняно невеликій кількості циклів навантаження.

На відміну від класичної втоми, для якої характерні мільйони циклів до руйнування, малоциклова втома розглядає область довговічностей, що зазвичай не перевищують 10^5 циклів. У цьому випадку руйнування розвивається на фоні значних макроскопічних пластичних деформацій, які охоплюють істотну частину об'єму або перерізу зразка (чи елемента конструкції). Для звичайної втоми типовою є лише мікропластична деформація, локалізована у відносно невеликих об'ємах поблизу зони зародження і поширення втомної тріщини [13].

Характер руйнування при малоцикловій втомі за своїми особливостями близький до руйнування при одноразовому статичному навантаженні й водночас займає проміжне положення між чисто статичними та класичними втомними руйнуваннями. Тому навантаження малої частоти, яке призводить до руйнування за відносно невеликої кількості циклів (10^3 – 10^4), іноді називають повторно-статичним.

Випробування з постійною амплітудою циклічних напружень відносять до «м'якої» схеми навантаження. Якщо ж амплітуда циклічних деформацій зберігається сталою, говорять про «жорстку» схему навантаження.

Одним із суттєвих недоліків більшості промислових і дослідних машин для випробувань корпусних матеріалів на малоциклову втому є невідповідність типу прикладеного навантаження реальним умовам роботи конструкцій. Найчастіше застосовується розтяг, тоді як у реальних елементах корпусів домінує згин. Випробування листових зразків на згин із достатньою

точністю моделюють напружено-деформований стан деталей під час експлуатації та дозволяють коректно оцінити їхню довговічність. Це особливо важливо для порівняльних досліджень, коли необхідно обрати найкращий варіант матеріалу з кількох можливих або перевірити властивості нових матеріалів в однакових умовах з матеріалом, що вже використовується. З практичної інженерної точки зору малоциклові випробування на згин є значно інформативнішими, ніж випробування на розтяг [16].

Враховуючи наведені міркування, для власних досліджень малоциклової втоми корпусних матеріалів використовували установки, що працюють із пластинчастими зразками.

Багато авторів виконували комплексні дослідження різних аспектів малоциклової втоми при термічних та механічних циклічних деформаціях. Переважно застосовували схему осьового навантаження за «жорстким» варіантом, оскільки термічна втома за такої схеми є аналогом випробувань при сталому рівні деформації. Результати цих випробувань зазвичай подають у вигляді залежностей довговічності від розмаху (подвоєної амплітуди) пластичної деформації.

На основі узагальнення літературних джерел і експериментальних результатів було показано, що зв'язок між пластичною циклічною деформацією і числом циклів до руйнування в широкому діапазоні довговічностей (від 1 до 10^5 циклів) описується рівнянням [10]

$$\varepsilon_{пл} \cdot N^m = C \quad (1.1)$$

де $\varepsilon_{пл}$ –циклічна пластична деформація,

N – цикли до руйнування,

m і C - постійні.

Це співвідношення часто називають основним законом малоциклової втоми. У подвійному логарифмічному масштабі воно відповідає прямій лінії з тангенсом кута нахилу, рівним $-m$. Автор вважає, що величина m приблизно дорівнює 0,5 і практично не залежить від виду матеріалу, форми циклу навантаження, частоти, температури та інших чинників. Незначні відхилення у зоні малих деформацій пояснюють впливом локальних дефектів (у тому числі поверхневих – неметалеві включення, подряпини, надрізи). При великих деформаціях внесок таких дефектів нівелюється, оскільки деформація охоплює весь об'єм металу більш рівномірно.

Останнім часом дослідження впливу різних факторів на малоциклову втому істотно активізувалися. Вивчається роль концентрації напружень, мікроструктури й легування, ступеня рафінування сталі, масштабного фактора, частоти навантаження, розміру зерна, процесів накопичення пошкоджень, а також закономірності зародження та поширення тріщин.

Особливу увагу приділяють малоцикловій втомі зварних з'єднань. Це дозволяє конструкторам і технологам вирішувати складні задачі проєктування крупногабаритних елементів машин шляхом зварювання прокатних, кованих і литих заготовок великих перерізів при високих вимогах до їхньої міцності за змінних навантажень у пластичній області. У літературі наводяться різні підходи до прогнозування ресурсу довговічності при малоцикловій втомі, зокрема з урахуванням особливостей зварних з'єднань [15].

1.2.2. Малоциклова втома в агресивних середовищах. Оскільки значна частина відповідальних конструкцій, що працюють під повторно-статичними або змінними навантаженнями, експлуатується в агресивних середовищах (трубопроводи, посудини, що працюють під тиском, корпуси суден, різні реактори, елементи літальних апаратів, машини для внесення добрив і засобів захисту рослин тощо), особливий інтерес становлять дані про вплив цих середовищ на малоциклову втому.

Інформація про корозійну втому в області довговічностей близько 10^5 циклів досить обмежена. До того ж, наявні результати досліджень важко безпосередньо застосувати до поставленої проблеми, оскільки корозійні процеси істотно залежать від часу, а отже, довговічність матеріалу в умовах корозійної втоми сильно пов'язана з частотою прикладання навантаження.

Відзначено, що криві втоми, отримані при випробуваннях у повітрі та в солоній воді, перетинаються в області дуже малої кількості циклів. У деяких режимах солоня вода може навіть дещо збільшувати довговічність сталі порівняно з повітрям [13].

У ряді робіт досліджували швидкість поширення тріщин у зразках нових високоміцних конструкційних сталей при малоциклових випробуваннях у корозійному середовищі з частотою навантаження 5 циклів за хвилину. Показано, що дія розчину NaCl прискорює ріст тріщин майже на порядок.

При вивченні сумісного впливу концентрації напружень і агресивного середовища (морська вода) на малоциклову втому одержано дані про залежність довговічності зразків від амплітуди і частоти циклічної деформації, а також від геометричних параметрів концентраторів напружень.

Проаналізовано вплив параметрів циклічного навантаження (частота, асиметрія циклу, амплітуда деформації) на малоциклову втому в корозійному та наводнюючому середовищах. Виявлено, що збільшення частоти та амплітуди циклічного навантаження зменшує негативний вплив середовища на довговічність, причому в умовах наводнювання цей ефект проявляється більш яскраво, ніж при «чистій» корозії.

Досліджено дію концентраторів напружень на малоциклову втому в різних середовищах. Показано, що наявність концентратора різко знижує довговічність при малоцикловій втомі, причому найбільше падіння ресурсу спостерігається саме при випробуваннях на повітрі (тобто без корозійного середовища), а в наявності середовища ефект змінюється.

Окремі дослідження [5] присвячені змінам структурно чутливих властивостей (мікротвердості, циклічної в'язкості, ширини рентгенівської дифракційної лінії) в процесі випробувань у повітрі та наводнюючому середовищі. Наводяться результати спостереження за утворенням і розвитком тріщин та пропонується механізм міжзеренного руйнування при малоцикловій втомі. Показано, що наводнююче середовище прискорює міжзеренне руйнування і сприяє формуванню великої кількості тріщин, тоді як при випробуваннях на повітрі, як правило, розвивається одна магістральна тріщина.

Вивчено вплив корозійного середовища на малоциклову втому сталей різного рівня міцності, а також процеси накопичення пошкоджень. Зниження втомної міцності під дією наводнювання було названо «водневою втомою», а зменшення довговічності при малоцикловій втомі в присутності водню – «малоцикловою водневою втомою».

З огляду на важливість впливу водню на малоциклову втому сталі, виконано низку випробувань, які показали, що руйнування зразків у середовищі водню відбувається у 2–3 рази швидше, ніж у вакуумі. Це пояснюється різким зниженням пластичності приповерхневих шарів металу внаслідок адсорбції водню.

З узагальненого огляду літератури видно, що інтерес до малоциклової втоми постійно зростає, однак багато аспектів, пов'язаних із дією агресивних середовищ, наводнювання, локальної корозії та тріщиноутворення, залишаються недостатньо вивченими.

1.2.3. Опір втомі при попередній корозії. Нині накопичено значний обсяг даних, присвячених вивченню впливу попередньої корозії (ПК) на фізико-механічні властивості металів. Дослідження торкалися різних схем попередньої витримки зразків, типів середовищ та характеру корозійних пошкоджень. Загальним висновком є те, що одна лише зміна маси зразків не відображає реальної корозійної стійкості матеріалу, оскільки корозія зазвичай носить локальний характер [16].

Корозійні ушкодження у вигляді пітингів і виразок виникають не тільки на відкритій поверхні, але й на торцевих та обрізних кромках, а інколи й під поверхнею металу. Такі підповерхневі ураження виявляють під час шліфування та іншої механічної обробки: вони мають вигляд порожнистих каверн складної, розгалуженої форми. Для їхньої оцінки розроблено спеціальні методики визначення площі, зайнятої пітингами, та форми цих дефектів.

З огляду на те, що багато деталей машин, що працюють у режимі змінних навантажень, зазнають дії агресивних середовищ ще до початку експлуатації (наприклад, під час зберігання чи транспортування), питання впливу попередньої корозії на втомну міцність є особливо важливим.

Вивчався вплив ПК у відсутності механічних напружень на подальший опір втомі при випробуваннях на повітрі. Було досліджено низку сталей та деякі алюмінієві сплави. Зразки спочатку витримували у чистій воді протягом різного часу, після чого висушували і проводили втомні випробування. Встановлено, що ПК знижує опір втомі, причому цей ефект посилюється зі збільшенням часу перебування у воді. Крива «напруження – число циклів» ($\sigma-N$) для кожного фіксованого часу витримки зберігає подібну форму до кривої, отриманої на повітрі: у сталей залишається характерна горизонтальна ділянка.

Показано, що шкідливий вплив попередньої корозії зростає зі збільшенням границі міцності матеріалу. Зменшення опору втомі автори пов'язують насамперед із підвищеною концентрацією напружень поблизу корозійних каверн, оскільки фактичне зменшення площі перерізу через втрату металу є незначним. Було продемонстровано, що подібні криві $\sigma-N$ можна отримати й за умови наявності штучних надрізів, нанесених механічно. Зроблено спробу зв'язати втомну міцність із формою, розмірами та просторовим розподілом корозійних каверн [16].

При дослідженні корозійної втоми сталі в прісній воді встановлено, що пітинги слугують ініціаторами корозійних тріщин. Зародження тріщин

вивчалось для сталей різних марок. Відзначено, що на ранніх стадіях руйнування корозійні виразки мають напівсферичну форму, а з часом набувають еліпсоподібних обрисів. Саме від дна таких дефектів починають розвиватися корозійні тріщини. Подібний механізм спостерігається і при корозійному розтріскуванні.

Описано також формування корозійно-втомних тріщин у залізних прутках: тріщини зароджуються від пітингів і розповсюджуються як углиб, так і вздовж поверхні. Показано, що кілька великих пітингів знижують циклічну міцність сильніше, ніж велика кількість дрібних. При цьому пітинги частіше утворюються на площинах ковзання.

Доведено, що ПК істотно знижує границю втоми вуглецевої сталі, особливо у випадках нерівномірного вибіркового ураження (міжкристалітна корозія, пітинг і т. ін.). Велика кількість дрібних концентраторів напружень, сформованих у процесі ПК, у деяких випадках знижує циклічну міцність менше, ніж наявність небагатьох великих дефектів. Встановлено, що найбільше падіння втомних характеристик на повітрі відбувається у перші хвилини дії агресивного середовища; подальше збільшення часу ПК лише посилює цей ефект.

Окремі дослідження [1,2] були присвячені впливу тривалої (2–6 років) попередньої корозії на циклічну міцність сталі WSt 52-3. Показано, що зниження циклічної міцності основного металу після тривалої ПК залежить від рівня прикладених напружень і стану поверхні. Дослідники аналізували взаємозв'язок локальної корозії й зародження тріщин для різних матеріалів, показавши, що циклічні навантаження інтенсифікують корозійні ушкодження. Особливу роль відіграє геометрія дефектів, яка визначає розподіл напружень і швидкість накопичення ушкоджень.

На підставі проведених робіт зроблено висновок про необхідність запобігання попередній корозії деталей машин у період зберігання та транспортування до місця експлуатації.

Практично важливими є результати досліджень впливу періодичної дії корозійного середовища на ненапружений матеріал з наступними циклічними навантаженнями на повітрі, що частково моделює реальні умови роботи багатьох деталей. Встановлено, що чергування корозійної дії з циклічними навантаженнями сприяє більш інтенсивному розвитку корозійних ушкоджень, ніж лише ПК без навантаження. Це пояснюється, по-перше, руйнуванням оксидних плівок під дією змінних напружень, що відкриває агресивному середовищу вільний доступ до металу, і, по-друге, формуванням «ювенільних» (свіжих) поверхонь унаслідок зсувних деформацій, які також інтенсифікують взаємодію металу з корозійним середовищем [16].

Автори однієї з робіт [19] запропонували розглядати процес корозійної втоми як послідовність трьох стадій: ріст пітинга, зародження тріщини в зоні пітинга і подальше поширення цієї тріщини. На прикладі низьколегованих сталей було встановлено, що діаметр пітинга $2c$ до моменту зародження тріщини зростає в часі за законом $2c \sim t^{1/3}$, причому коефіцієнт пропорційності залежить від складу середовища. Глибина пітинга a пов'язана з його діаметром постійним відношенням $(a / 2c_{cr}) \approx 0,35$. Після зародження тріщини значення $2c$ практично не змінюється і розглядається як критичне ($2c_{cr}$). Зі збільшенням амплітуди напруження σ_a значення $2c_{cr}$ спочатку різко зменшується (від >1 до $0,3$ мм при σ_a до 40 МПа), а далі змінюється повільніше (від $\approx 0,3$ до $\approx 0,2$ мм у діапазоні σ_a 40 – 80 МПа).

Інтерпретуючи пітинг як напівеліптичну тріщину, здійснили розрахунок за формулою Ньюмена–Раджу критичної амплітуди $(\Delta K)_{cr}$ коливань коефіцієнта інтенсивності напружень K , що відповідає експериментальному значенню $2c_{cr}$.

Дослідження пітингової корозії та її ролі у ініціюванні тріщин показали, що наявність пітингів на поверхні обладнання часто призводить до появи тріщин і повного руйнування деталей. Наприклад, глибина пітингів

близько 250 мкм на валу ротора турбіни знижувала його втомну міцність у повітрі до 70 % порівняно з полірованим матеріалом.

За результатами мікроскопічних спостережень встановлено, що в умовах повітряної атмосфери центрами зародження тріщин найчастіше є оксидні включення, а в агресивних середовищах – сульфідні. В усіх випадках пітингоутворення пов'язують із хімічною взаємодією поверхні сталі з іонами S^{2-} та HS^- , що генеруються з сульфідних включень. В агресивному середовищі пітингова корозія сприяє росту дефектів, їх виходу за межі зерен і досягненню критичного значення коефіцієнта інтенсивності напружень, при якому відбувається зародження та розвиток тріщин. Ймовірність виникнення тріщини з пітинга залежить від його геометрії та локального складу розчину [13].

Показано, що «активний» пітинг, сформований, наприклад, у воді, може значно сильніше знижувати втомну міцність, ніж звичайний геометричний концентратор напружень.

У дослідженнях із промисловою сталлю EN1 втомну міцність визначали за схемою обертання зі згином. Частину зразків попередньо відпалювали при 920 °C протягом трьох годин в аргону. Поверхню полірували до високої чистоти (алмазна паста з зерном 1 мкм). Корозійно-втомні випробування проводили в розчині NaCl з концентрацією 0,6 М при температурі 22 °C, частота навантаження становила 47 Гц, рівень напружень — 177–309 МПа.

Встановлено, що при витримці ненапружених зразків у 0,6 М розчині NaCl протягом 20 годин на поверхні з'являлися темні ділянки, переважно в зонах підвищеної густини включень. На відпалених зразках спостерігалось формування мікропітингів на межі «включення – матриця» [16].

Ненапружені зразки, які обертались у розчині, вели себе подібно до статичних. Однак при циклічному знакозмінному навантаженні 183 МПа вже після 200 циклів відзначали розчинення по межі включення–матриця, а також часткове розчинення самих включень. Подібні результати спостерігали при

193 МПа після 2000 циклів. Подальше збільшення числа циклів до 34 000 за того ж рівня напруження призводило до локальної корозії в зоні включень та їх відокремлення від матриці, що формувало мікропітинги.

При збільшенні числа циклів до 360 000 при 193 МПа відбувалося злиття мікропітингів у ділянках із високою густиною сульфідних включень, утворювалися дефекти типу тріщин. При напруженні 278 МПа збільшення числа циклів від 2000 до 34 000 спричиняло інтенсивне розчинення включень і локальну корозію біля них, а при 440 000 циклах мікропітинги зливалися, утворюючи тріщиноподібні дефекти.

При ще вищому навантаженні (309 МПа) після 2000 циклів фіксували розчинення по межах зерен і в перлітних ділянках із утворенням пітингів і поперечних тріщин. Після 161 000 циклів під напруженням 164 МПа злиття поперечних тріщин призводило до руйнування зразка [16].

Було встановлено, що значення рН розчину в щілинах або мікропітингах на зразках, які оберталися без навантаження ($1,3 \cdot 10^6$ обертів), становило приблизно 4,5. Під дією навантаження 192 МПа після $3,4 \cdot 10^4$ циклів локальне значення рН зменшувалося до 3–3,5, що пов'язують із підвищеним розчиненням металу й гідролізом продуктів корозії.

Зменшення рН у мікропорожнинах поблизу включень інтенсифікує розчинення сульфідів з утворенням іонів HS^- , які, своєю чергою, посилюють корозійне розчинення сталі. Такий процес може спричинити утворення всередині пітинга борозенок і порожнин, що зливаються у тріщини. Однією з причин прискореної корозії на межі «включення – матриця» є підвищений вміст сірки у вузькій смужці фериту навколо включення [16].

1.2.4. Роль поверхнево-пластичного деформування в підвищенні малоциклової корозійної втоми. Метод зміцнення деталей машин поверхнево-пластичним деформуванням (ППД) сьогодні набув широкого практичного застосування. За рахунок ППД змінюються фізико-механічні характеристики приповерхневого шару металу: зростає твердість, формується сприятливий розподіл залишкових напружень по перерізу деталі,

перебудовується форма й орієнтація кристалічних зерен у поверхневих шарах. У результаті підвищується опір цих шарів пластичній деформації та руйнуванню [5].

Після звичайного шліфування на поверхні часто залишаються глибокі й гострі надрізи. ППД змінює геометрію цих дефектів: радіуси вершин нерівностей збільшуються, висота нерівностей зменшується, орієнтація мікрodefектів стає менш небезпечною. У режимі малоциклової втоми при відносно невисокій концентрації напружень саме мікрорельєф поверхні, а не залишкові напруження, виходить на перший план, особливо для високоміцних сталей.

Обробка, спрямована виключно на зняття розтягуючих залишкових напружень, часто дає обмежений ефект або взагалі не впливає на витривалість за умов циклічних пластичних деформацій. Значне підвищення втомної міцності досягається, насамперед, заходами, які затримують зародження тріщин і гальмують їх розвиток: механічне видалення різких переходів перерізу, надрізів, мікротріщин у відповідальних зонах.

Показано, що пластична деформація від зовнішнього навантаження може зменшити або навіть повністю знівелювати початкові залишкові напруження, тому їхній вплив на витривалість не завжди проявляється. Разом з тим низка досліджень свідчить, що в окремих випадках, особливо в областях конструктивних чи технологічних концентраторів напружень, релаксація залишкових напружень після ППД не відбувається навіть при напруженнях, що перевищують границю пружності.

Отже, поверхнєве нагартування загалом сприяє підвищенню довговічності деталей у зоні малоциклової втоми, але дискусійним залишається питання, який із факторів – стискуючі залишкові напруження чи поліпшений мікрорельєф (шорсткість) поверхні – відіграє домінуючу роль [5,7].

У літературі також наведено протилежні результати щодо ефективності поверхневого зміцнення в області малоциклової втоми. Наприклад, за

результатами деяких втомних випробувань сталених зразків, зміцнених дробоструменевою обробкою, при високих рівнях напружень втомна міцність нагартованих зразків виявилася нижчою, ніж у ненагартованих.

Таким чином, застосування поверхневого нагартування для гарантованого підвищення несучої здатності деталей у зоні малоциклової втоми поки що залишається дискусійним. Єдиного узгодженого погляду на ступінь впливу ППД на малоциклову втому конструкційних сталей наразі не сформовано.

1.2.5. Використання енергії вибухової речовини. Останні роки характеризуються активним розвитком технологій обробки металів із використанням енергії вибухових речовин (ВР). Це дозволило сформувати й упровадити в промисловість високоефективний процес зміцнення металів – зміцнення вибухом. Існує низка фундаментальних робіт, присвячених обробці металів вибухом, опубліковано огляди, у яких узагальнено результати співвідносно до різних металів і сплавів [17].

Основними причинами покращення втомних характеристик зварних зразків після вибухової обробки вважають зміни, викликані проходженням ударної хвилі через кристалічну решітку: зростання дислокаційної густини, фрагментація структури, формування сприятливих залишкових стискуючих напружень. Додатково позитивний ефект пов'язують із притупленням вершин мікротріщин, зменшенням концентрації напружень, підвищенням твердості поверхневого шару та зниженням рівня розтягуючих залишкових напружень [17].

1.2.6. Вплив лазерної обробки на границю витривалості сталей. У численних роботах вивчався вплив лазерної обробки на границю витривалості сталей з різним вмістом вуглецю. Показано, що зі збільшенням вмісту вуглецю ефект підвищення втомної міцності стає більш вираженим: для сталі 75Г приріст може досягати до 80 %.

Продемонстровано [21] можливість збільшення циклічної міцності вуглецевих сталей методом імпульсного лазерного гартування з подальшим

низьким відпусканням. Наприклад, границя втоми зразків сталі У8 із «корсетною» (звуженою) робочою частиною після такої обробки зростала з 375 до 700 МПа. Наводяться також дані про підвищення циклічної міцності окремих елементів штампів у 2–3 рази після лазерного зміцнення.

Проведено також дослідження [21] характеристик тріщиностійкості зміцнених вуглецевих сталей із поверхневими тріщинами. Результати показали, що ударна в'язкість для всіх досліджуваних сталей після лазерного зміцнення зменшується у 1,5–3 рази, що зумовлено високою крихкістю гартованого шару. Аналогічне зниження ударної в'язкості спостерігалось і при інших видах поверхневого гартування, коли в поверхневому шарі формується мартенситна структура.

У цілому випробування показали, що лазерне зміцнення вуглецевих сталей може призводити до значного зниження їхньої тріщиностійкості. Для її підвищення, очевидно, необхідно застосовувати додаткові технологічні прийоми (наприклад, оптимізацію режимів відпуску, комбіновану обробку), які б підвищували роботу руйнування при поширенні тріщини.

На наш погляд, кількість робіт, присвячених впливу лазерної обробки на втомну міцність зварних з'єднань і на властивості металу після лазерного різання, є недостатньою.

1.2.7. Запобігання попередній корозії технологічними методами.

Одним із напрямів підвищення довговічності конструкційних сталей є запобігання або зменшення шкідливого впливу попередньої корозії за рахунок раціонального вибору способів механічної обробки поверхні.

Аустенітні сталі після певних видів механічної обробки (свердління, фрезерування, шліфування) можуть набувати підвищеної схильності до корозійного розтріскування. Це пов'язано з локальними зонами, де напруження наближаються до границі міцності, хоча такі області зазвичай мають невеликі розміри.

Ще одним способом модифікації поверхні є травлення, яке дає змогу знімати напружений поверхневий шар. Однак травленням доцільно видаляти

шари стали не більше 10–20 мкм. Більш глибоке видалення економічно невиправдане, тому що в нижчих шарах залишкові напруження від зварювання часто перевищують напруження, пов'язані з механічною обробкою.

1.3. Довговічність конструкційних сталей із металізаційними покриттями

Експлуатаційні характеристики деталей машин значною мірою залежать від стану їх поверхні. Окрім механічних методів зміцнення, важливу роль відіграє формування захисних металевих покриттів або дифузійне насичення поверхневих шарів різними елементами. Товщина таких покриттів чи глибина насичення повинна забезпечувати набуття нових властивостей поверхні, зокрема підвищення корозійної стійкості.

Найпоширенішими антикорозійними матеріалами є алюміній та цинк, які у більшості агресивних середовищ поведуться як аноди щодо сталі. Алюмінієві покриття широко застосовуються у транспортному, гідротехнічному та будівельному машинобудуванні США — від мостових конструкцій і опор до суднових корпусів, трубопроводів, резервуарів, платформ та елементів нафтової інфраструктури [1,2].

У сучасному машинобудуванні зростає потреба у матеріалах, що поєднують високу механічну міцність і корозійну стійкість. Це зумовлює активне застосування двошарових і багатошарових композицій, де основа виготовляється з доступної вуглецевої або низьковуглецевої сталі, а поверхневі шари — із високолегованих або кольорових металів.

Попри те, що металізаційні покриття ефективно запобігають корозії, їхній вплив на втому, особливо в режимі пружно-пластичних циклічних деформацій, досліджений недостатньо. На відміну від гальванічних покриттів, які здебільшого знижують втомну міцність, металізаційні шари можуть як покращувати, так і погіршувати характеристику довговічності.

Наприклад, дослідження насосних штанг показали зростання корозійної втоми у середовищі $\text{NaCl}+\text{H}_2\text{S}$ при застосуванні металізаційних покриттів. Водночас, для перлітних сталей зафіксовано зниження циклічної довговічності при цинкуванні та алюмініуванні, особливо в корозійних середовищах [18,19].

Результати робіт щодо багатошарових (плакованих) сталей свідчать, що різниця у пластичності шарів спричиняє мікронеоднорідність деформацій, яка впливає на зародження та розвиток тріщин. Зоною підкріплення виступає межа між шарами, де може формуватися гальмівний ефект поширення втомних пошкоджень. Для умов малоциклової втоми, де діють великі пластичні деформації, покриття, що знижують пластичність поверхневого шару, здебільшого зменшують довговічність. Однак існуючі експерименти підтверджують, що плаковані сталі у багатьох випадках не демонструють суттєвого погіршення міцності порівняно з основним металом.

1.4. Вплив неметалевих включень на втому конструкційних сталей у корозійно-активних середовищах

Конструкційні сталі містять певну кількість неметалевих включень (НВ), які є небажаними з погляду втомної міцності. Включення виконують роль зародкових центрів тріщиноутворення під час термообробки, зварювання, циклічних навантажень і, особливо, корозійної втоми.

Дослідження МЦВ сталей різного ступеня рафінування показують, що агресивне середовище значно впливає на довговічність. Наприклад, сталь 20 із сульфідними включеннями, що на повітрі демонструвала порівняно високу довговічність, у кислому електроліті ($\text{pH}=2$) втрачала свої позиції, поступаючись сталям з іншими типами включень. Особливо виразне погіршення довговічності спостерігалось для металу з глиноземистими включеннями [16].

Аналіз впливу природи НВ показав, що сталь після дворазового дугового вакуумного переплаву (2ДВП), яка характеризується низьким вмістом включень, має суттєво більшу довговічність у порівнянні з програмно забрудненими виплавками. Найшкідливішими виявилися сульфідні й глиноземисті включення, тоді як нітридні та кремнеземні — менш негативні.

Причиною такого впливу є електрохімічна гетерогенність: НВ є катодними центрами відносно матриці, що призводить до різкої різниці потенціалів на межі розподілу та виникнення локальних струмів. Це спричиняє прискорене розчинення металу біля включень. Найактивнішими виявилися сульфіди, де фіксується найбільший градієнт потенціалу, що відповідає їхній підвищеній корозійній небезпеці [23].

Мікроскопічні спостереження підтверджують, що метал у зоні контакту з такими включеннями розчиняється значно швидше, ніж у середньому по поверхні. Тому очищення металу від НВ (рафінування) суттєво підвищує його довговічність у режимі малоциклової втоми, особливо в агресивних середовищах.

1.5. Висновки до розділу 1

У результаті аналізу літературних джерел за тематикою впливу агресивних мінеральних середовищ та стану поверхні на довговічність конструкційних сталей можна зробити такі узагальнення.

1. Рідкі комплексні добрива (РКД), КАС та суспензійні добрива є висококорозійно-активними середовищами для вуглецевих конструкційних сталей, зокрема Ст3. Характер корозії визначається не лише загальним хімічним складом добрив, а й ступенем конверсії, значенням рН, наявністю мікроелементів та фазовим станом (розчини, суспензії, газова фаза, межа «рідина–газ»).

2. Встановлено, що критично небезпечною з точки зору корозії є межа поділу рідкої й газової фаз, а також щілини та вузькі зазори (менше 0,3 мм), де захисний фосфатний шар не формується і зосереджується локальне виразкове руйнування. Саме ці зони мають бути враховані як найуразливіші при конструюванні та експлуатації машин для внесення РКД і КАС.

3. Показано, що глибинний показник корозії не може слугувати універсальним критерієм оцінки корозійної стійкості сталей у РКД. Більш інформативним є показник втрат металу з одиниці площі за період формування захисного шару. Це важливо для коректного порівняння різних марок сталей і складів добрив.

4. Малоциклова втома конструкційних сталей характеризується розвитком руйнування на фоні значних пластичних деформацій при відносно невеликій кількості циклів (до 10^5). Основний закон малоциклової втоми описується степеневою залежністю між пластичною деформацією й числом циклів до руйнування, однак у корозійно-активних середовищах ця закономірність істотно модифікується дією водню, локальної корозії та концентрації напружень.

5. Попередня корозія (ПК), у тому числі атмосферна або періодичне змочування корозійно-активними розчинами, істотно знижує втомну міцність сталей навіть за подальших випробувань на повітрі. Встановлено, що найбільше падіння границі втоми відбувається вже на початкових етапах дії середовища, а пітинги та каверни виступають ефективними концентраторами напружень і центрами зародження тріщин.

6. Стан поверхні та методи її механічної та поверхневої обробки (точіння, шліфування, обкатування роликами, дробоструменева обробка, травлення) мають принциповий вплив як на корозійну стійкість, так і на корозійно-втомну міцність

7. Поверхнево-пластичне деформування (ППД) і обкатування роликами в більшості випадків підвищують витривалість і корозійно-втомну стійкість сталей за рахунок згладжування мікронерівностей, зниження концентрації

напружень та формування стискуючих залишкових напружень. Водночас у зоні малоциклової втоми питання співвідношення ролі залишкових напружень і мікрорельєфу залишається дискусійним, а результати для агресивних середовищ, зокрема добрив, є фрагментарними.

8. Зміцнення вибухом та лазерна обробка істотно змінюють мікроструктуру та напружений стан приповерхневих шарів сталей, що може як підвищувати, так і знижувати втомну й корозійну міцність. Для низки сталей зафіксовано значне зростання границі втоми після вибухового зміцнення, тоді як недоцільні режими лазерного гартування призводять до утворення крихких структур і небезпечних залишкових напружень розтягу, які погіршують тріщиностійкість. Загалом вплив цих видів обробки на малоциклову корозійну втому в умовах дії добрив вивчений недостатньо.

9. Металізаційні покриття (алюмінієві, цинкові та багат шарові плаковані системи) є ефективним засобом захисту від загальної корозії, однак їхній вплив на втому й корозійно-втомну довговічність неоднозначний. Різниця в пластичності шарів, мікронеоднорідність деформацій і зміна механіки зародження тріщин можуть як покращувати, так і погіршувати ресурс, особливо в області великих пластичних деформацій.

10. Узагальнення літературних даних показує, що, незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі малоциклової втоми, корозійної втоми та впливу поверхневої обробки, комплексна оцінка опору малоцикловій корозійній втомі конструкційних сталей в умовах дії рідких мінеральних добрив і КАС, з урахуванням попередньої корозії, реальних схем навантаження (згин), стану поверхні, наявності включень і можливостей сучасних методів зміцнення, залишається недостатньо опрацьованою. Це обґрунтовує актуальність і необхідність подальших експериментальних досліджень у цьому напрямі, що й покладено в основу даної кваліфікаційної роботи.

2. МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методологічні засади досліджень

Методологія роботи ґрунтується на поєднанні фізико-металургійного підходу до аналізу стану металу з експериментальними методами оцінювання опору малоциклової корозійній втомі конструкційних сталей за умов дії агресивних середовищ мінеральних добрив.

Основою є положення про те, що довговічність сталевих елементів машин у середовищах хімізації сільського господарства визначається сукупною дією трьох груп факторів:

- корозійно-активного середовища (тип, концентрація, тривалість дії);
- циклічного напружено-деформованого стану (рівень деформації, характер навантаження, частота, тривалість циклу);
- стану поверхневого та приповерхневого шару металу (структура, наявність покриттів, неметалевих включень, параметри шорсткості, залишкові напруження).

Відповідно до мети кваліфікаційної роботи – підвищення опору малоциклової корозійній втомі конструкційних сталей шляхом застосування металізаційних, плакованих, вакуумно-плазмових покриттів та рафінування металу – поставлено такі основні методологічні завдання:

- експериментально визначити вплив алюмінієвих металізаційних покриттів на довговічність гладких і зварних зразків у середовищі рідких мінеральних добрив;
- оцінити ефективність плакування (двошарових сталей типу КД2) як засобу підвищення втомної довговічності в умовах малоциклового навантаження та корозії;
- дослідити вплив вакуумно-плазмових покриттів на основі нітридів титану та хрому на швидкість корозії та опір малоциклової втомі;

– встановити роль електрошлакового переплаву з використанням флюсів на основі рідкоземельних металів у зміні структурного стану, вмісту неметалевих включень та газів, а також у формуванні опору корозійній втомі.

Усі експерименти проводили з використанням методики малоциклових випробувань при керуванні деформацією із заданими рівнями відносної деформації в поєднанні з тривалою попередньою корозійною витримкою зразків у середовищах мінеральних добрив. Це дозволило наблизити умови лабораторних досліджень до реальних умов експлуатації деталей машин, що працюють під навантаженням у добривних середовищах.

2.2. Об'єкти досліджень

Об'єктами експериментальних досліджень були:

- вуглецева сталь звичайної якості Ст3;
- вуглецева конструкційна сталь 20;
- високоміцні низьколеговані сталі 30ХГСНА, 09Г2, 10ХСНД, 12ХНЗА;
- корозійностійка сталь Х18Н10Т;
- двошарова (плакована) сталь КД2, отримана вальцюванням поєднання шару сталі 10ХГСН1Д з плакованим шаром сталі Х18Н10Т;

Досліджувалися як гладкі плоскі зразки, так і стикові зварні зразки листового металу зі сталей 09Г2 та 10ХСНД. Зварні зразки виготовляли зі сталей як без покриття, так і з попередньо нанесеним металізаційним покриттям різної товщини.

Спеціальну групу становили зразки з поверхневими покриттями:

- алюмінієві металізаційні покриття, нанесені електродуговим способом із використанням дроту СвА5;
- плаковані (двошарові) матеріали з різною товщиною плакованого шару (1,2; 1,8; 2,5 мм);

– вакуумно-плазмові покриття на основі нітриду титану TiN і композиційні покриття (TiCr)N, одержані методом катодного іонного бомбардування на установці типу «Булат».

2.3. Підготовка та обробка зразків

Гладкі зразки для випробувань на малоциклову втому виготовляли з листового прокату та прутків у вигляді плоских смуг із заданим робочим перерізом. Для частини сталей (КД2, 10ХГСН1Д, Х18Н10Т) робочий переріз становив 6×30 мм при загальній товщині листа 6 мм. Для інших експериментів використовували зразки товщиною 2,5 мм. Орієнтацію вирізання зразків вибирали так, щоб їхня довга вісь була перпендикулярною або паралельною до напрямку прокатки, залежно від завдання досліджу.

Перед нанесенням металізаційних алюмінієвих покриттів поверхню зразків зі сталі типу 12ХН3А попередньо шліфували, після чого виконували дробоструминну обробку чавунним колотим дробом марки ДЧК до отримання рівномірної шорсткої поверхні. Така підготовка забезпечувала сприятливий рельєф для формування адгезійно міцного металізаційного шару, а також задавала певний рівень початкової мікронерівності (Ra) поверхні.

Металізаційні покриття наносили електродуговим апаратом ЕМ-14М у нормованих режимах, використовуючи алюмінієвий дріт СвА5 діаметром 1,6 мм як вихідний матеріал. Товщина покриттів для зварних зразків змінювалася від 0,1 до 0,5 мм, що дозволяло оцінити вплив цього параметра на структуру зварного з'єднання та довговічність при малоцикловому навантаженні.

Для виготовлення двошарової сталі КД2 застосовували метод плакування вальцюванням. Після отримання двошарових листів з різною товщиною плакованого шару з них вирізали випробні зразки без додаткового

механічного шліфування робочих поверхонь, щоб зберегти реально сформований у процесі вальцювання стан поверхні.

Зразки зі сталі Ст3 для вакуумно-плазмового напилення перед нанесенням покриття піддавали різним видам попередньої обробки, залежно від прийнятого режиму: без додаткової підготовки, з віброобробкою або з електрополіруванням. Усі варіанти обробки виконували з обох боків зразка в однакових режимах.

2.4. Середовища корозійної дії та схеми корозійної витримки

Для моделювання реальних умов експлуатації деталей машин застосовували низку агресивних середовищ, характерних для рідких мінеральних добрив та засобів хімізації сільського господарства. Основним середовищем був розчин карбамідно-аміачної селітри (КАС). Окрім нього, використовували суміш КАС із рідкими комплексними добривами (РКД) у співвідношенні 1:1, а також розчини компазану і ТХА з концентрацією 25 г/л.

Було реалізовано кілька схем попередньої корозійної витримки:

- тривале статичне витримування зразків у КАС протягом 150 та 300 діб без навантаження;
- шестимісячне витримування в КАС із періодичним промиванням водопровідною водою;
- шестимісячне витримування в суміші КАС+РКД (1:1);
- тримісячна циклічна корозійна дія за схемою «1 год у розчині – 1 год на повітрі» для розчинів компазану та ТХА.

Температурні умови під час витримки були близькими до кімнатних; аерація розчинів здійснювалася природним шляхом. Після завершення витримки продукти корозії з поверхні зразків видаляли стандартними методами, що не викликають додаткового пошкодження металу, і проводили подальші механічні та металографічні дослідження.

2.5. Методика випробувань на малоциклову втому

Випробування на малоциклову втому проводили при керуванні деформацією, задаючи амплітуди відносної деформації ε у діапазоні приблизно 0,25–1,5 %. Залежно від серії дослідів використовували одноосне навантаження згином або розтягом при симетричному циклі напружень.

Для кожного значення деформації випробовували не менше трьох зразків, що дозволяло отримати репрезентативні середні значення довговічності та оцінити розкид результатів. Критерієм руйнування приймали число циклів до утворення наскрізної тріщини або повного руйнування зразка.

Випробування проводили як на повітрі, так і в корозійному середовищі. У першому випадку зразок деформувався безпосередньо в атмосфері лабораторії. У другому варіанті корозійне середовище могло діяти на зразок двома шляхами: або безпосередньо під час циклічного навантаження (традиційна схема), або в режимі попередньої тривалої корозійної витримки з подальшими випробуваннями на повітрі.

За результатами випробувань будували криві малоциклової втоми у координатах «амплітуда деформації – логарифм числа циклів до руйнування», а також визначали коефіцієнти, що характеризують вплив середовища та конструктивних рішень на довговічність: коефіцієнт впливу середовища, коефіцієнт плакування, відносне підвищення довговічності за наявності покриттів.

2.6. Визначення швидкості корозії та електрохімічних параметрів

Швидкість корозії визначали гравіметричним методом за втратою маси зразків після стандартних інтервалів витримки в корозійних середовищах. За результатами зважувань обчислювали швидкість корозії в $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$ і

визначали коефіцієнт захисту покриттів як відношення швидкості корозії незахищеного металу до швидкості корозії металу з покриттям.

Для частини серій дослідів проводили вимірювання електродного потенціалу зразків у часі. На основі отриманих залежностей аналізували характер пасивації поверхні, стабільність захисних плівок і кореляцію електрохімічної поведінки з результатами випробувань на малоциклову втому.

2.7. Металографічні та фрактографічні дослідження

Для з'ясування механізмів корозійно-втомного руйнування виконували комплекс металографічних і фрактографічних досліджень. Поперечні шліфи зразків готували за стандартною методикою механічного шліфування та полірування з подальшим травленням відповідними реактивами для виявлення структури сталі, металізаційних покриттів, зон зварних швів і двошарових систем.

Оптичну мікроскопію проводили при різних збільшеннях, що дозволяло оцінити морфологію неметалевих включень, характер їх розподілу, форму оксидних, сульфідних та інших включень у вихідних і рафінованих сталях. Особливу увагу приділяли аналізу зон перед фронтом втомних тріщин, околу пітингових ушкоджень та поверхневих дефектів, які локалізують пластичну деформацію й полегшують зародження тріщин.

Фрактографічні дослідження зломів проводили для зразків, зруйнованих на повітрі та після попередньої корозії. Аналізували характер руйнування (в'язке, крихке, змішане), наявність зон стабільного поширення тріщин і областей миттєвого руйнування, а також вплив корозійного середовища й покриттів на морфологію поверхні зламу.

2.8. Статистична обробка та узагальнення результатів

Результати випробувань підлягали статистичній обробці з визначенням середніх значень довговічності, середньоквадратичних відхилень і довірчих інтервалів. За необхідності застосовували апроксимацію експериментальних кривих малоциклової втоми аналітичними залежностями.

Порівняння серій дослідів здійснювали за відносними показниками: кратністю підвищення або зниження довговічності, зміною коефіцієнта впливу середовища та коефіцієнта плакування, відносним зниженням швидкості корозії тощо. Узагальнення виконували з урахуванням комплексного аналізу: механічних характеристик, структурного стану металу, корозійної поведінки, характеру неметалевих включень і параметрів поверхневого шару.

Запропонована методика дозволила одержати достовірні дані щодо впливу металізаційних, плакованих і вакуумно-плазмових покриттів, а також рафінування сталей електрошлаковим переплавом на опір малоциклової корозійній втомі в середовищах мінеральних добрив і сформувані практичні рекомендації щодо вибору матеріалів і технологій захисту деталей машин.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОЦИКЛОВОЇ КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ З МЕТАЛІЗАЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ В СЕРЕДОВИЩАХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

3.1. Корозійна малоциклова втома сталей з металізаційними покриттями

Поверхню зразків товщиною 2,5 мм перед нанесенням металізаційного шару обробляли чавунним коленим дробом марки ДЧК. Металізаційне покриття наносили за допомогою електродугового апарата ЕМ-14М. Як вихідний матеріал використовували алюмінієвий дріт марки СвА 5 діаметром 1,6 мм

Аналіз одержаних результатів (табл. 3.1) показав, що напилення гладких, попередньо шліфованих зразків зі сталі типу 12ХН3А (АК-32) призводить до зменшення їхньої малоциклової довговічності в 1,5–1,7 рази як під час випробувань на повітрі, так і в середовищі КАС.

У традиційних схемах випробувань на малоциклову втому контакт корозійного середовища з металізаційними покриттями є надто короткочасним: у цих дослідженнях він триває близько 10 годин. Щоб повніше виявити реальні захисні властивості покриття, частину зразків попередньо витримували без навантаження в середовищі КАС протягом 150 і 300 діб, а вже потім піддавали випробуванням на втому. Дані (табл. 3.1) свідчать, що при витримванні протягом 150 діб нанесене покриття ще знижує МЦВ, однак цей ефект менший, ніж без попередньої витримки; натомість після витримки протягом 300 діб довговічність напилених зразків зростає вже приблизно вдвічі.

Таблиця 3.1 - Довговічність зразків з металізаційними покриттями при деформації $\varepsilon=0,5\%$

Види зразків	Довговічність до руйнування в циклах на повітрі			Довговічність до руйнування в циклах в КАС		
	без попередньої корозії	після попередньої корозії (3 місяці)	після попередньої корозії (6 місяців)	без попередньої корозії	після попередньої корозії (3 місяці)	після попередньої корозії (6 місяців)
Шліфування (вихідний)	28688	17526	6799	20662	14633	5021
Шліфування+ обробка дробом+ металізація	18897	13377	13060	11835	10485	10153

Під час візуального огляду зразків встановлено, що на металізованих алюмінієм поверхнях спостерігається лише незначна кількість продуктів корозії алюмінієвого покриття (гідроокису алюмінію). За весь період досліджень руйнування алюмінієвого шару або ознак корозійного ураження основного металу під покриттям не спостерігалось. Натомість зразки без алюмінієвого покриття інтенсивно кородували. Отримані результати корелюють зі зміною величини електродного потенціалу в часі (рис. 3.1) та зі швидкістю корозії: для зразків без покриття вона становила $0,0420 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$, тоді як для зразків з покриттям — лише $0,0034 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}$.

Після видалення продуктів корозії на поверхні зразків виявлено характерні корозійні пошкодження у вигляді виразок, канавок і плям, особливо виражені після витримки протягом 300 діб. Такі дефекти локалізують пластичну деформацію та слугують осередками зародження втомних тріщин (рис. 3.2, 3.3). Корозія викликала різке зростання мікронерівностей рельєфу поверхні: висота нерівностей (R_a) зразків,

витриманих у КАС протягом 300 діб, досягла 65 мкм при вихідному значенні 0,15 мкм (рис. 3.4).



Рис. 3.1. Залежність величини електродного потенціалу від тривалості випробувань: 1 - Zn-покриття; 2 - Al-покриття; 3 - без покриття

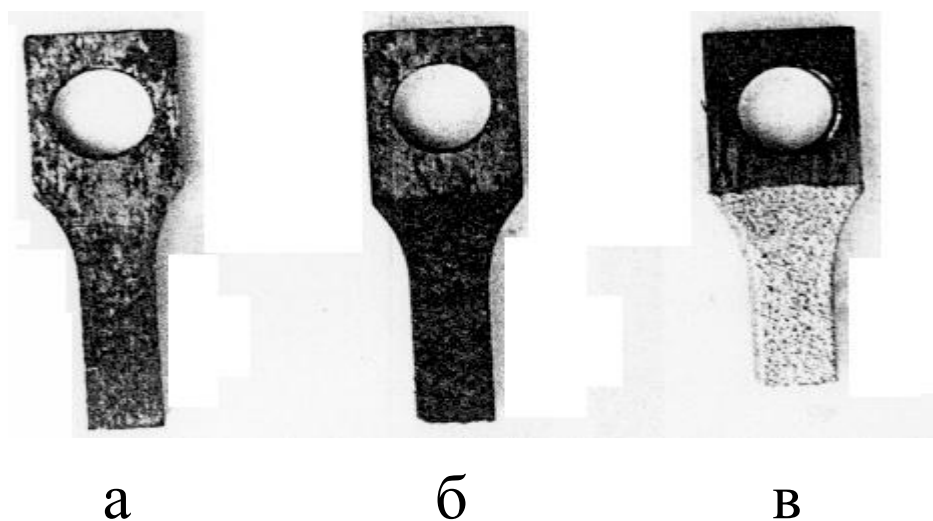


Рис. 3.2. Стан поверхні зразків після дії корозії КАС протягом 6 місяців: а- зразок вихідний; б-зразок з дробоструменевою обробкою; в-напилений алюмінієм

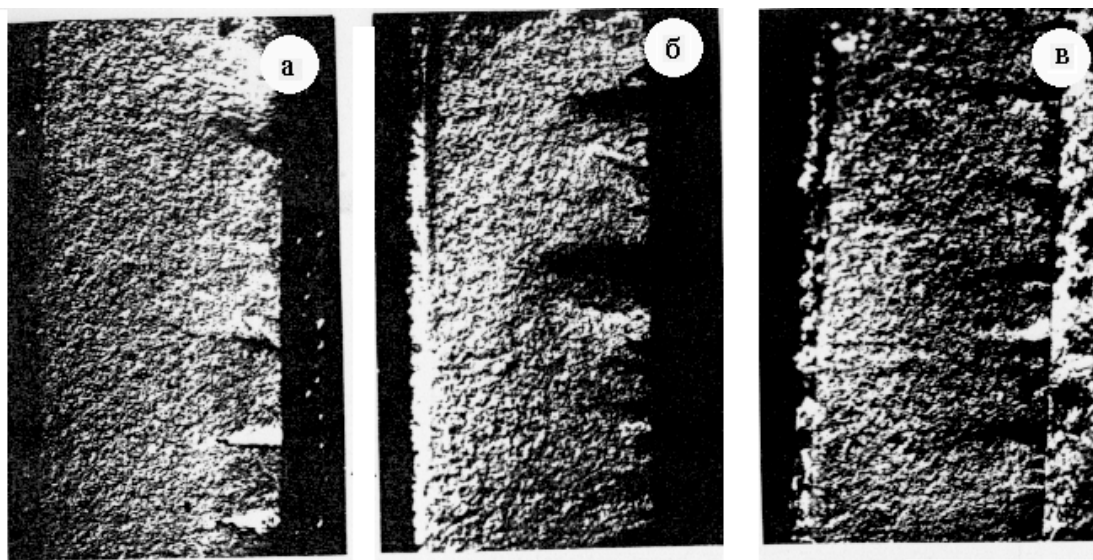


Рис. 3.3. Фото зломів зразків на повітрі: а) без попередньої корозії і покриття; б) з попередньою корозією без покриття; в) з попередньою корозією і покриттям

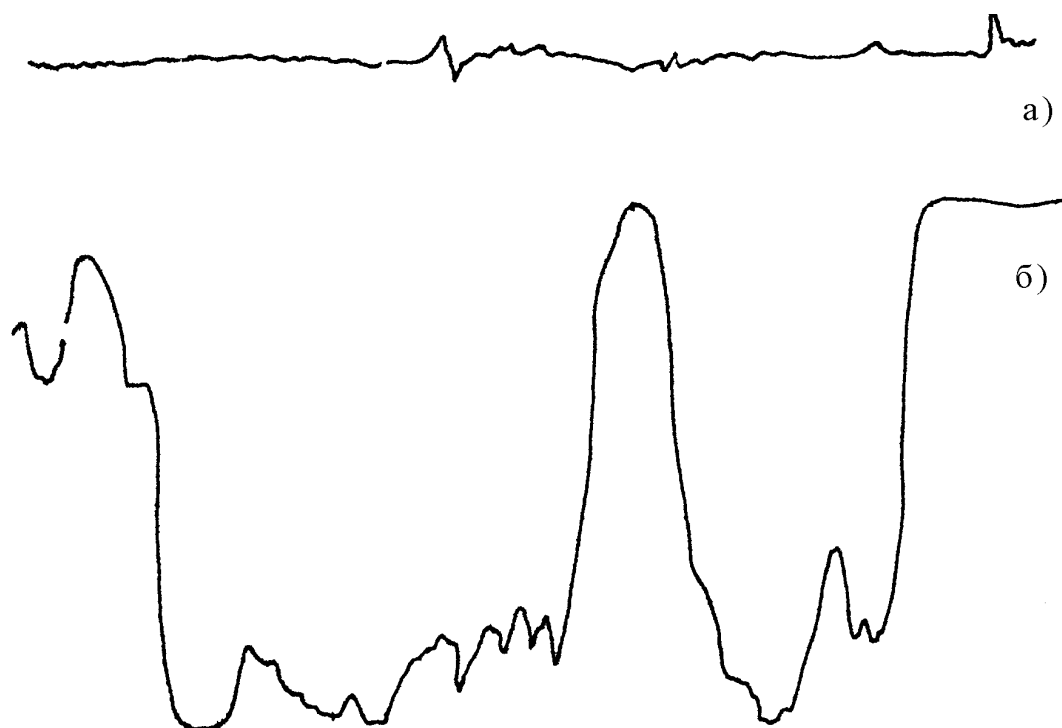


Рис. 3.4. Профілограмне зображення поверхні зразків: а – зразок вихідний; б - після витримки протягом 6 місяців в корозійному середовищі

Отже, традиційні методики випробувань на корозійну втому конструкційних матеріалів з металізаційними покриттями не дають достатньо об'єктивної картини. Більш достовірною є методика, яка передбачає попередню тривалу витримку зразків у корозійному середовищі з подальшим їх випробуванням на втому. За таких умов значно чіткіше проявляється позитивний вплив металізаційного покриття на витривалість сталі.

3.1.1. Дослідження витривалості напилених зразків із зварним швом. Під час аналізу впливу металізаційного покриття на опір втомі зварних з'єднань необхідно розглядати два принципово різні випадки:

1. спочатку виконують зварювання, а потім зварне з'єднання покривають металізаційним шаром;
2. з метою підвищення продуктивності процес металізації здійснюють безпосередньо у металургійних прокатних цехах, а зварювання проводять уже по попередньо покритих листах.

У зв'язку з цим питання впливу алюмінієвого металізаційного шару на подальшу працездатність зварної деталі набуває принципового значення.

Для першого випадку вище було показано, що нанесення металізаційного покриття на зварні з'єднання сприяє підвищенню корозійно-втомних характеристик зварних швів.

Для другого варіанта експериментально досліджували плоскі стикові зварні зразки зі сталей 09Г2 ($t = 12$ мм) і 10ХСНД ($t = 20$ мм), попередньо покритих алюмінієм різної товщини.

З аналізу результатів випробувань сталі 09Г2 (табл. 3.2) видно, що зварювання листів із металізаційними покриттями товщиною 0,2 мм не погіршує опір малоцикловій втомі. Більше того, зафіксовано підвищення опору втомі, особливо в корозійному середовищі, порівняно із зварними зразками з листів без попередньої металізації. Частково цей ефект пояснюється зміною електрохімічного стану сталей з покриттями (табл. 3.3).

Таблиця 3.2 – Характеристики зварного з'єднання металізованої алюмінієм сталі 09Г2,

Товщи на, мм	Механічні властивості				
	Довговічність, цикли до руйнування при $\sigma=660$ МПа		Границя міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість, КДж/м ² при 293 К	
	повітря	КАС		метал шва	лінія оплавлення
0	18043	6335	557.2-558.7	2160	2160
0.2	21503	9873	472.4-546.8	814-1392	1040-1650
0.3	-	-	514.2-538.4	507-645	750-1050
0.5	14262	6295	528.7-543.7	520-687	725-980

Таблиця 3.3 - Швидкість корозії і електродні потенціали сталей 09Г2 та 10ХСНД з покриттями алюмінієм товщиною 0,3 мм

Стан зразка	Сталь 10ХСНД		Сталь 09Г2	
	Стаціонар ний електродний потенціал, мВ	Швид- кість корозії, г/м ² -год	Стаціонар ний електродний потенціал, мВ	Швид кість корозії, г/м ² -год
Без покриття	- 450	0,0626	-440	0,0626
З покриттям, $\delta=0,3$ мм	- 780	0,0028	-760	0,0016

Малоциклова довговічність зварних зразків ($t = 12$ мм) із листів, напилених шаром товщиною 0,5 мм, виявилася нижчою за довговічність зразків із листів з покриттям 0,2 мм. Ймовірною причиною є підвищена концентрація алюмінію в зоні зварного шва (рис. 3.5), оскільки за малої товщини листа значна частина алюмінію потрапляє у зону плавлення.

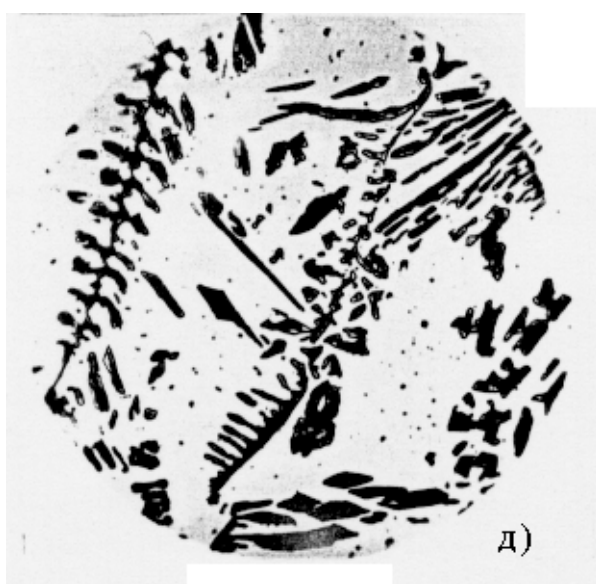
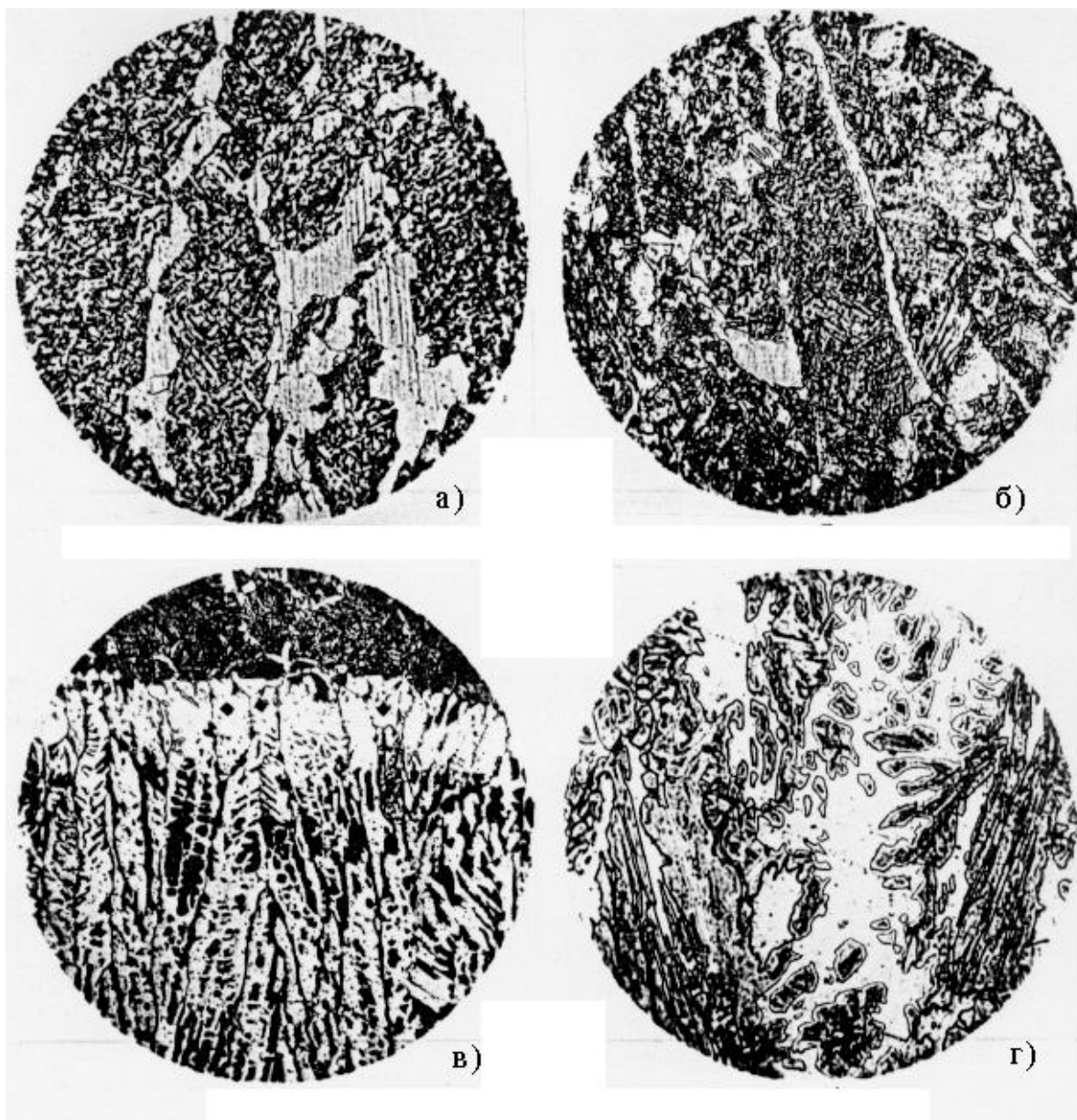


Рис. 3.5. Структура шва зварного з'єднання металу із сталі 09Г2 (х300): а – неметалізована; б - покрита товщиною 0,1 мм алюмінієм; в – покрита товщиною 0,2 мм алюмінієм; г – покрита товщиною 0,3 мм алюмінієм; д – покрита товщиною 0,5 мм алюмінієм

Цей висновок підтверджують і результати механічних випробувань: механічні властивості зварних зразків із листів з покриттям товщиною 0,2 мм залишаються на рівні показників основного металу, тоді як для зразків із листів з покриттям 0,5 мм спостерігається зменшення пластичності та параметрів ударної в'язкості.

Випробування на опір малоцикловій корозійній втомі зварних зразків зі сталі 10ХСНД товщиною 20 мм показали, що зварювання попередньо напиленних алюмінієм листів практично не впливає на довговічність зразків порівняно з аналогічними зразками з ненапиленних листів (рис. 3.6). Руйнування всіх зварних зразків (як зі сталі 09Г2, так і 10ХСНД) відбувається через зародження та подальше поширення втомної тріщини по лінії сплавлення.

Таким чином, при нанесенні металізаційного алюмінієвого покриття товщиною 0,2 мм на листи перед зварюванням опір малоцикловій втомі зразків, що працюють у корозійному середовищі, не знижується. Спостережуване підвищення довговічності зумовлене як електрохімічною захисною дією покриття, так і більшою гетерогенністю властивостей у зоні переходу «зона термічного впливу – основний метал», яка формується внаслідок сприятливої попередньої дробоструминної обробки листів. Оптимальну товщину покриття слід визначати окремо в кожному конкретному випадку залежно від товщини листів, що зварюються, технології підготовки кромки і режимів зварювання.

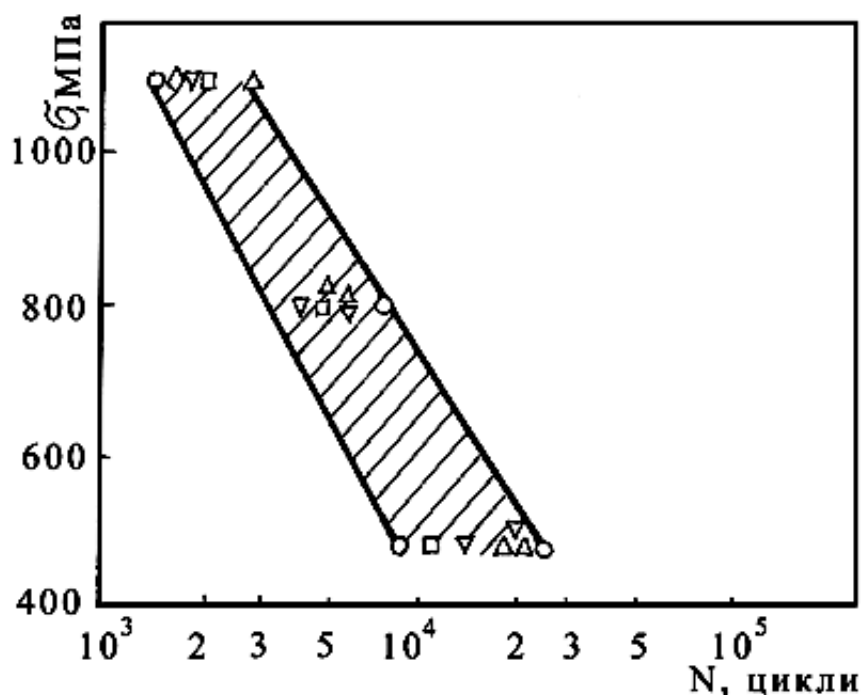


Рис. 3.6. Графік довговічності зварних з'єднань сталі 10XCHD товщиною 20 мм в КАС

3.2. Вплив плакування на опір малоцикловій втомі

Застосування звичайних конструкційних сталей загального призначення для роботи в середовищах засобів хімізації сільського господарства є проблематичним, оскільки їхня довговічність у таких умовах значно знижується.

Широке використання корозійностійких сталей у сільськогосподарському машинобудуванні наразі обмежене дефіцитом багатьох легуючих елементів. Одним із реальних напрямів заміни дорогих корозійностійких сталей є створення біметалічних матеріалів на основі вже відомих сталей і сплавів.

Поєднання високоміцних вуглецевих сталей з високопластичними агресивно-стійкими сталями і сплавами на основі недефіцитних компонентів дозволяє отримати відносно дешеві й водночас надійні конструкційні матеріали.

У роботі досліджували втому листової двошарової сталі КД2, отриманої шляхом плакування вальцюванням, та порівнювали її малоциклову втому з показниками сталі основного шару (10ХГСН1Д) і сталі плакованого шару (Х18Н10Т).

Зразки для випробувань із робочим перерізом 6×30 мм вирізали з листів товщиною 6 мм. При виготовленні зразків поверхню не піддавали додатковій механічній обробці. Товщина плакованого шару у двошаровій сталі становила 1,2; 1,8 та 2,5 мм. Під час випробувань на згин розтягуюче навантаження завжди прикладали зі сторони плакованого шару.

Для зразків із плакованої сталі КД2, які призначалися для випробувань у корозійному середовищі, з метою виключення протекуючої дії плакованого шару на сталь основи, а також для запобігання корозії основного шару, плоскі та торцеві поверхні основного металу покривали спеціальною захисною фарбою. Зразки з гомогенної сталі марок 10ХГСН1Д та Х18Н10Т піддавали дії корозійного середовища з усіх боків.

Аналіз результатів випробувань на повітрі (рис. 3.7, а) показує, що в області великих деформацій ($\epsilon = 0,6\text{--}1,0\%$) найвищу довговічність демонструє корозійностійка високопластична сталь Х18Н10Т. Із зменшенням деформації співвідношення довговічності досліджуваних сталей змінюється, і при $\epsilon \approx 0,57\%$ криві малоциклової втоми для сталей КД2 та Х18Н10Т перетинаються. Подальше зниження рівня деформації забезпечує перевагу двошаровій сталі КД2.

Дослідження малоциклової втоми в корозійному середовищі дали якісно подібну картину (рис. 3.7, б).

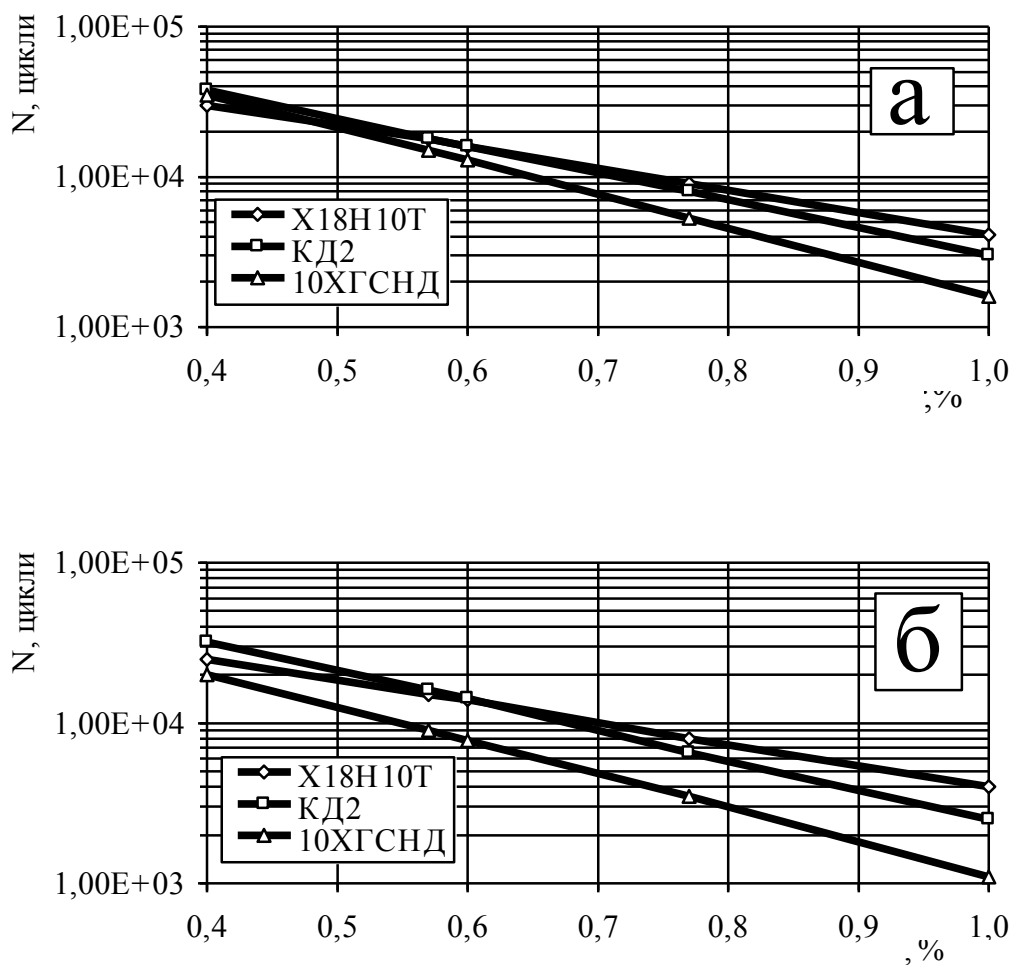


Рис. 3.7. Довговічність сталей: а - на повітрі, б - в корозійному середовищі.

Наявність корозійного середовища при малоциклових випробуваннях знижує довговічність усіх досліджуваних сталей, однак ступінь зниження є різним. Найбільш суттєво втомні характеристики погіршуються у сталі 10ХГСНД, а найменше — у нержавіючої сталі Х18Н10Т. Для кількісної оцінки цього ефекту використовували коефіцієнт впливу середовища (рис. 3.8):

$$\beta_c = \frac{N_{\text{пов.}} - N_{\text{середов.}}}{N_{\text{пов.}}}; \quad (3.1)$$

де $N_{\text{пов.}}$ - довговічність повітряному середовищі;

$N_{\text{сер.}}$ - довговічність в корозійному середовищі.

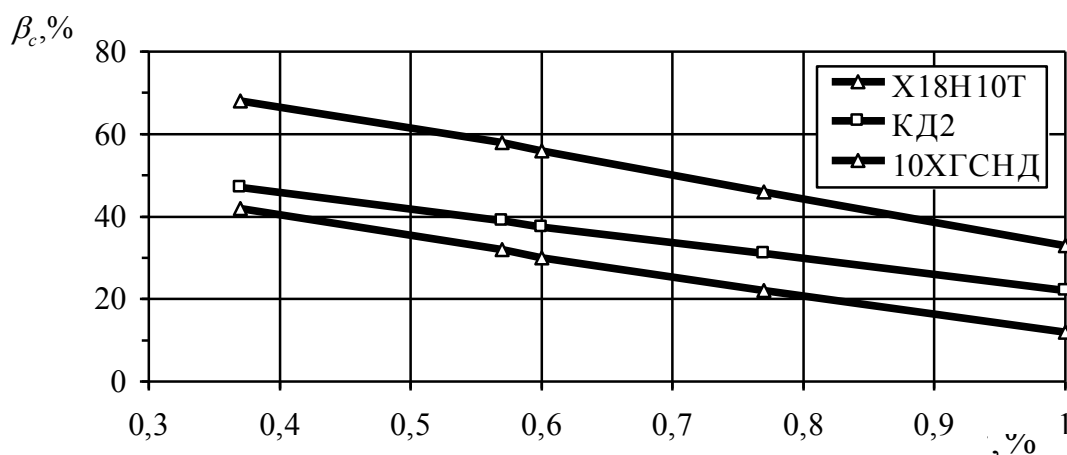


Рис. 3.8. Графік залежності коефіцієнта впливу середовища від величини циклічної деформації

Для плакованої сталі значення цього коефіцієнта відрізняються від показників нержавіючої сталі несуттєво (на 3–9 %), що підтверджує доцільність використання двошарової сталі КД2 як корпусного матеріалу для роботи в корозійних середовищах.

З рисунка 3.9 видно, що використання плакованої сталі є особливо вигідним саме при малоциклових випробуваннях у корозійному середовищі, а не на повітрі. Особливий інтерес викликає факт зростання переваги плакованої сталі зі збільшенням амплітуди циклічної деформації, про що свідчать значення коефіцієнта плакування, обчисленого за формулою:

$$\beta_{\text{пл.}} = \frac{N_{\text{пл.}} - N_{\text{осн.}}}{N_{\text{пл.}}} \cdot 100\%; \quad (3.2)$$

де $N_{\text{пл.}}$ - довговічність плакованої сталі;

$N_{\text{осн.}}$ - довговічність основи.

При великих пружно-пластичних циклічних деформаціях, коли вирішальним чинником стає рівень пластичності металу, найкращий опір втомі має найбільш пластична зі всіх досліджуваних сталь X18H10T, тоді як

найгірші показники демонструє сталь 10ХГСН1Д з мінімальною пластичністю.

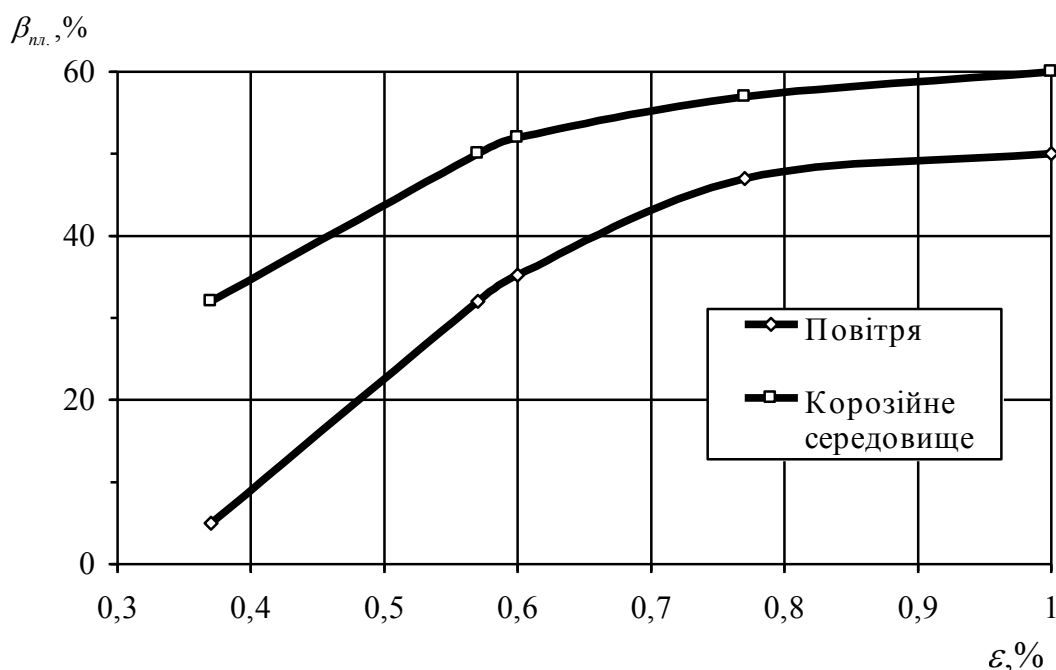


Рис. 3.9. Графік залежності коефіцієнту плакування від амплітуди деформації

Зі зменшенням рівня напружень (деформацій) перевага Х18Н10Т над іншими сталями поступово зникає, а показники втоми сталі 10ХГСН1Д наближаються до відповідних показників інших матеріалів. При деформації $\varepsilon = 0,375\%$ показники довговічності Х18Н10Т стають уже найнижчими.

У проміжній області навантажень перевагу отримують двошарові сталі. Крім того, товщина плакованого шару стає важливим параметром, який впливає як на криві статичного згину, так і на малоциклову втому (рис. 3.10, 3.11). Якщо експлуатація обшивки супроводжуватиметься значними перевантаженнями ($\varepsilon > 0,6\%$), доцільно застосовувати двошарову сталь із більшою товщиною плакованого шару.

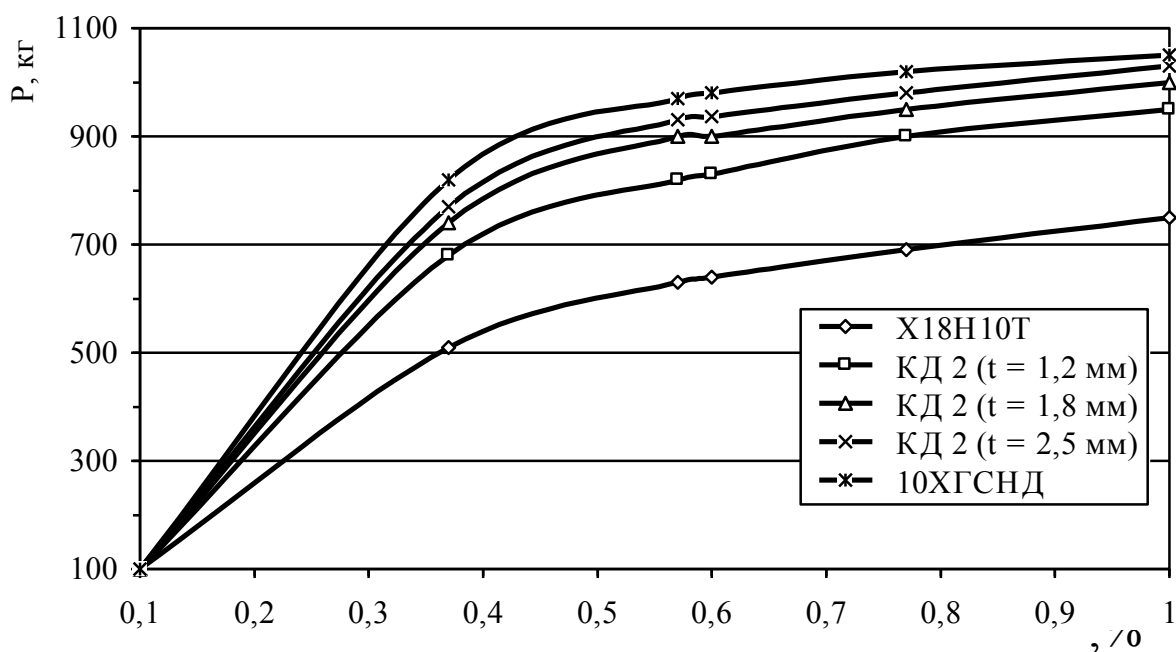


Рис. 3.10. Графік статичного згину

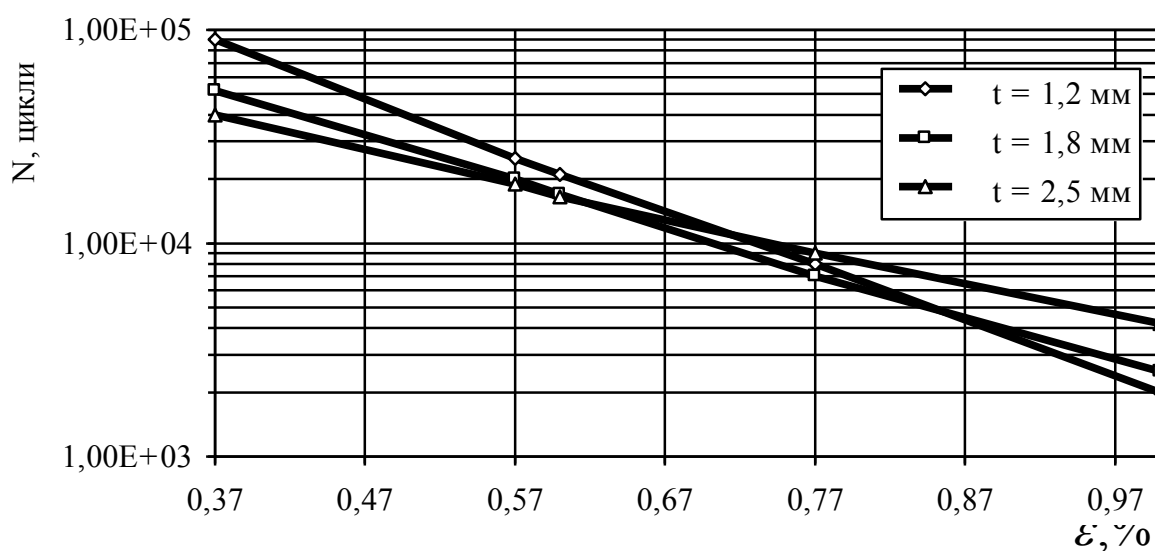


Рис. 3.11. Залежність втоми сталі КД2 від амплітуди циклічної деформації

За відносно невеликих експлуатаційних навантажень (орієнтовно в діапазоні $\epsilon = 0,3\text{--}0,4\%$) оптимальною є сталь КД2 з мінімальною товщиною плакованого шару (у даному випадку 1,2 мм). Окрім достатнього захисту

корпусу від корозійної дії середовищ хімізації сільського господарства, така сталь має ще й найнижчу вартість, що є додатковим аргументом на її користь.

Таким чином, зниження рівня напружень (деформацій) приводить до відносного зменшення ролі пластичності та, відповідно, зростання значення міцності. Характер залежності малоциклової витривалості досліджуваних сталей на повітрі від показників статичної міцності та пластичності наочно показано на графіку (рис. 3.12). Із цього графіка видно, що при порівняно великих деформаціях (наприклад, $\varepsilon = 1,0\%$) спостерігається добра кореляція витривалості із показниками пластичності δ , інтегральним критерієм $\sigma_B \cdot \delta \psi^2 / (1 - \psi)$, а також з величиною, обернено-пропорційною до межі міцності σ_B (тобто обернена пропорційна залежність від σ_B).

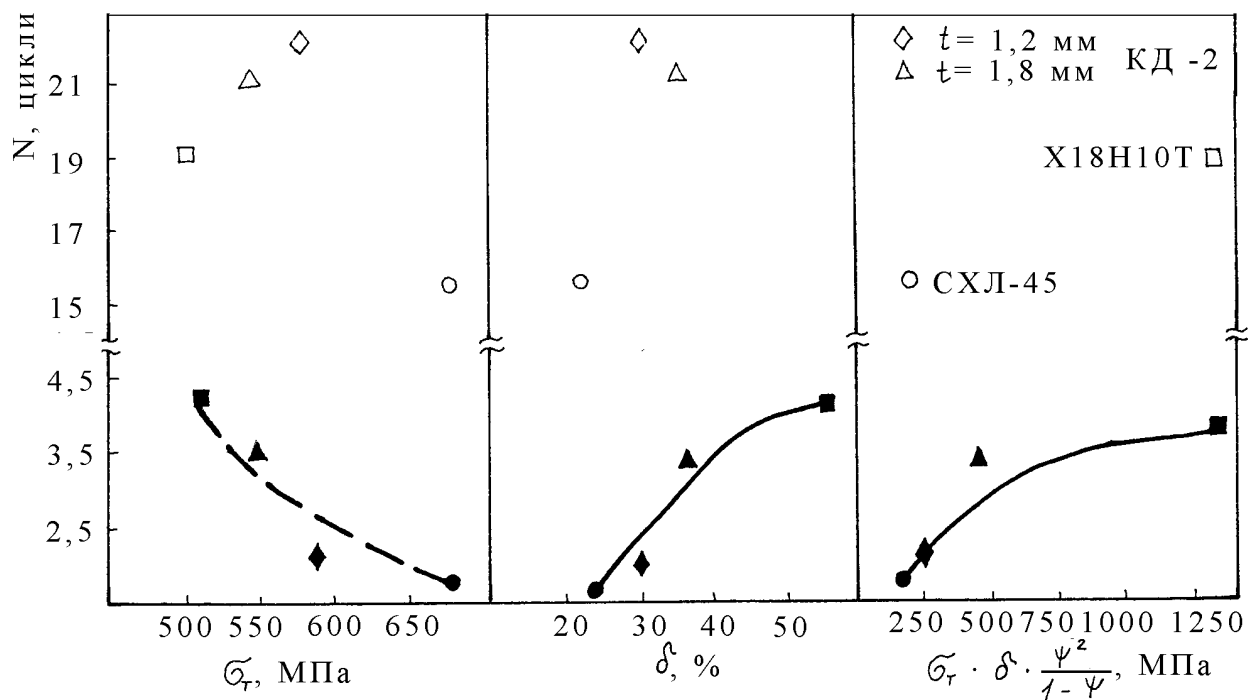


Рис. 3.12. Залежність довговічності на повітрі сталей при $\varepsilon = 1,0\%$) від показників міцності і пластичності при дослідженнях на розтяг.

3.3. Довговічність сталей з вакуумно-плазмовими покриттями.

Покриття наносили методом вакуумно-плазмової конденсації в умовах катодного іонного бомбардування (КІБ) на серійній установці типу «Булат»

за такими режимами: тиск у вакуумній камері – 6,6 МПа, струм дуги між катодом і анодом – 100 А, температура підкладки (зразків) – 673 К, тривалість напилення – 1 година. Матеріалом катода слугував титановий сплав ВТ1-0. Як реактивний газ використовували азот, який, взаємодіючи з плазмовим потоком титану, утворював на поверхні покриття з нітриду титану.

Результати випробувань засвідчили, що тверді покриття знижують опір малоцикловій втомі. Це пов'язано з високою твердістю й підвищеною крихкістю покриття: при великих деформаціях, характерних для малоциклових випробувань, вирішальне значення має параметр пластичності поверхневого шару. За його зменшення опір втомі закономірно знижується. Таким чином, застосування таких покриттів як засобу захисту від корозії за умов традиційних випробувань (безпосередньо в агресивному середовищі) виявилось проблематичним.

Зважаючи на результати попередніх досліджень, у яких показано, що зміцнювальні обробки й покриття, які зменшують пластичність поверхневих шарів зразка, що працює при високих деформаціях у режимі малоциклової втоми, знижують опір втомі, було заплановано комплекс випробувань при малих рівнях деформацій. Крім того, розширено номенклатуру агресивних середовищ та варіантів режимів напилення.

Для сталі Ст3 застосовували такі режими:

- режим 1 – багатошарове напилення без попередньої обробки, покриття на основі нітриду титану;
- режим 2 – композиційне напилення після попередньої віброобробки у два прийоми з обох боків по 30 хв, покриття – на основі нітриду титану та хрому;
- режим 3 – композиційне напилення після попереднього електрополірування у два прийоми з обох боків по 30 хв, покриття – на основі нітриду титану та хрому;

– режим 4 – композиційне багатошарове напилення з попереднім електрополіруванням, покриття – на основі нітридів титану та хрому.

Попередню корозійну дію моделювали за такими схемами:

А – витримування зразків протягом 6 місяців у КАС з періодичним промиванням водопровідною водою;

Б – витримування протягом 6 місяців у суміші КАС + РКД (1:1) з періодичним вийманням та промиванням водою;

В – витримування протягом 3 місяців у компазані (25 г на 1 л води) за циклом «1 год у розчині – 1 год на повітрі»;

Г – витримування протягом 3 місяців у розчині ТХА (25 г на 1 л) за аналогічною схемою «1 год у розчині – 1 год на повітрі».

Швидкість корозії визначали за результатами спостережень для 10 зразків, які згодом використовували для випробувань на малоциклову втому; отримані значення наведено в табл. 3.4. У всіх випадках покриття, незалежно від режиму напилення та виду середовища, сприятливо впливали на зменшення швидкості корозії. Коефіцієнт захисту, що відповідає відношенню швидкості корозії незахищеного металу до швидкості корозії захищеної поверхні, завжди мав додатне значення. Водночас чіткої залежності ефекту від конкретного режиму напилення виявити не вдалося.

Забезпечення доброї адгезії покриття до металевої підкладки, відсутності пористості, гомогенної структури та рівномірної товщини шару, а також позитивні результати випробувань у різних корозійних середовищах дали підстави зробити висновок, що вакуумно-плазмові покриття на основі нітридів, карбідів і оксидів можуть бути ефективним засобом захисту деталей машин від корозії за умов відсутності або незначності робочих навантажень.

Таблиця 3.4 - Швидкість корозії (г/м²·год) сталі Ст3 з плазмовими вакуумними покриттями

Режим напилення	Середовища							
	А	$\beta_{\text{зах.}}$	Б	$\beta_{\text{зах.}}$	В	$\beta_{\text{зах.}}$	Г	$\beta_{\text{зах.}}$
Без напилення	0.0759	-	0.9383	-	0.5055	-	0.2111	-
№1	0.0193	3.91	0.8105	1.15	0.4658	1.08	0.1768	1.19
№2	0.0218	3.48	0.8461	1.10	0.1762	2.86	0.0818	2.58
№3	0.0399	1.90	0.7837	1.19	0.2008	2.51	0.1059	1.99
№4	0.0290	2.61	0.8252	1.13	0.2492	2.02	0.0945	2.23

Результати малоциклових випробувань (табл. 3.5) показали, що плазово-вакуумне напилення при низькому рівні деформацій підвищує опір малоцикловій втомі приблизно в 1,6 раза. Таке поліпшення пов'язане з підвищеною міцністю і твердістю поверхневого шару, а також з високою чистотою поверхні. Виявити суттєві розбіжності між окремими режимами напилення не вдалося, хоча попередня вібраційна обробка (режим 2) могла б потенційно сприяти додатковому підвищенню довговічності.

Після попередньої корозії опір малоцикловій втомі знизився залежно від агресивності середовища та режиму витримки в 1,28–1,78 раза. При цьому для плазово-вакуумних покриттів зазначене зниження становило лише 1,18–1,48 раза, тобто напилені зразки завдяки підвищеній корозійній стійкості та кращому стану поверхні зберігають вищий опір малоцикловій втомі.

Таблиця 3.5 – Малоциклова втома при деформації $\varepsilon = 0,25\%$ сталі Ст3 з плазмово-вакуумним покриттям

Ре жи ми	Середовища									
	Повіт ря	$\beta_{\text{зах.}}$	А	$\beta_{\text{зах.}}$	Б	$\beta_{\text{зах.}}$	В	$\beta_{\text{зах.}}$	Г	$\beta_{\text{зах.}}$
Без напи лення	28465	-	21980	-	18143	-	20820	-	22250	-
№1	46559	1.63	39125	1.70	34234	1.88	38799	1.86	39456	1.77
№2	43332	1.52	36413	1.65	31629	1.74	35811	1.72	36413	1.63
№3	48527	1.70	40439	1.83	35681	1.93	40439	1.94	40778	1.83
№4	46371	1.29	39297	1.78	34348	1.89	38323	1.84	39633	1.78

З урахуванням того, що для приготування різних видів рідких мінеральних добрив необхідне обладнання для змішування сипких і рідких компонентів, яке, крім циклічних навантажень і дії агресивного середовища, зазнає ще й абразивного зношування, використання твердих антикорозійних покриттів у таких умовах експлуатації є особливо доцільним.

3.4. Висновки до розділу 3

У результаті проведених досліджень встановлено, що традиційна методика випробувань на малоциклову корозійну втому конструкційних сталей з металізаційними покриттями, коли контакт з агресивним середовищем є короткочасним, не дає об'єктивної оцінки їхньої довговічності. Металізаційні алюмінієві покриття на сталі типу 12ХН3А за короткочасної дії середовища знижують малоциклову витривалість, проте після тривалої попередньої витримки в КАС (150–300 діб) забезпечують суттєве зменшення швидкості корозії та підвищення довговічності зразків у 2 рази порівняно з неметалізованим металом. Це пов'язано з формуванням на

поверхні стабільного захисного шару продуктів корозії алюмінію, який ефективно екранує основу від дії агресивного середовища і перешкоджає розвитку корозійно-втомних пошкоджень.

Показано, що для зварних з'єднань низьколегованих сталей типу 09Г2 та 10ХСНД нанесення металізаційних алюмінієвих покриттів перед зварюванням за раціонально підбраної товщини шару (близько 0,2 мм) не лише не погіршує, а й у ряді випадків підвищує опір малоциклової корозійній втомі. Це зумовлено поєднанням електрохімічного захисного ефекту алюмінію та сприятливої структури зони термічного впливу після попередньої дробоструменевої обробки листів. Збільшення товщини покриття до 0,5 мм приводить до перенасичення зварного шва алюмінієм, зниження пластичності й ударної в'язкості, а отже, до зменшення малоциклової довговічності. Оптимальна товщина металізаційного шару має визначатися з урахуванням товщини листів, способу підготовки кромek та режимів зварювання, що є важливим для проєктування відповідальних вузлів сільськогосподарських машин.

Доведено доцільність використання двошарових (плакуваних) сталей типу КД2 як корпусних матеріалів для роботи в середовищах хімізації сільського господарства. При великих рівнях деформацій вирішальну роль відіграє пластичність металу, що забезпечує найвищу довговічність нержавіючої сталі Х18Н10Т. Із зниженням амплітуди циклічної деформації роль міцності зростає, і двошарова сталь КД2 демонструє перевагу над гомогенними сталями як за умов випробувань на повітрі, так і в корозійному середовищі. Встановлено, що збільшення товщини плакованого шару доцільне при експлуатації в умовах значних перевантажень ($\epsilon > 0,6\%$), тоді як при робочих деформаціях у діапазоні 0,3–0,4 % оптимальною є мінімальна товщина плакованого шару (приблизно 1,2 мм), яка забезпечує прийнятний рівень корозійного захисту за мінімальної вартості матеріалу.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що підвищення опору малоциклової корозійній втомі конструкційних сталей в

середовищах мінеральних добрив досягається комплексом заходів, які поєднують: застосування металізаційних, плакованих та вакуумно-плазмових покриттів, раціональний підбір їхньої товщини та режимів попередньої обробки; використання двошарових корозійностійких сталей як корпусних матеріалів; а також удосконалення металургійних процесів – електрошлакового переплаву і розкислення рідкоземельними елементами. При цьому особливо важливим є урахування реальних умов роботи деталей машин, рівня циклічних деформацій і тривалості дії агресивних середовищ, що вимагає застосування методик випробувань з попередньою тривалою корозійною витримкою зразків.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час проведення досліджень малоциклової корозійної втоми сталей із металізаційними покриттями в умовах дії агресивних розчинів мінеральних добрив виникає низка небезпечних виробничих факторів:

Хімічні фактори - аміачна вода, КАС-32, розчини карбаміду й аміачної селітри є корозійно-активними та подразнювальними речовинами; можливе виділення аміаку, парів кислот і нітратів; небезпека хімічних опіків шкіри та слизових оболонок; ризик гострого отруєння при перевищенні ГДК аміаку (20 мг/м^3 у робочій зоні).

Фізичні фактори - підвищені температури середовища при сушінні та термообробці зразків; шум та вібрації обладнання для малоциклових навантажень; ризик ураження електричним струмом від лабораторних стендів.

Механічні фактори - травмування під час закріплення зразків у випробувальних машинах; защемлення рук або одягу рухомими частинами приводу.

Пожежо- та вибухонебезпечні фактори - аміак та нітратні речовини у високих концентраціях можуть бути вибухонебезпечними; присутність легкозаймистих матеріалів при металізаційних процесах (алюмінієвий дріт, оксидні пилові суміші).

4.2. Вимоги безпечної організації лабораторних робіт

Вентиляція і мікроклімат - дослідження з хімічно активними добривами проводять у витяжній шафі або при примусовій вентиляції з кратністю ≥ 8 обмінів/год; у повітрі робочої зони повинні контролюватися концентрації

аміаку, азотної кислоти, NO_2 ; температура – 18–25 °С, відносна вологість – не більше 70 %.

Засоби індивідуального захисту - Працівник лабораторії повинен використовувати: захисний халат та гумові фартухи; хімічностійкі рукавички (нітрилові, латексні посилені); захисні окуляри або щиток; респіратори типу РПГ-67, FFP2/FFP3 при роботі з парами аміаку; гумове взуття, що перешкоджає ковзанню.

Загальні правила безпеки - заборонено зберігати зайві реактиви на робочому столі; усі розчини добрив мають чітке маркування та журнал реєстрації; заборонено доторкатися до обличчя, очей та відкритих ділянок шкіри під час роботи; переливання концентрованих розчинів здійснюють тільки у витяжній шафі; відходи добрив збирають у спеціальні хімічно стійкі контейнери.

4.3. Безпека при роботі з обладнанням для малоциклових навантажень

У ході досліджень застосовуються машини для циклічних навантажень (розтяг-стиск, згин), стенди для корозійних випробувань та металізаційні установки.

Вимоги безпеки - перевіряти справність захисного заземлення перед запуском обладнання; міцно фіксувати зразки у тримачах, уникати зміщення та перекосу; не торкатися рухомих частин під час випробувань; запускати машину лише після закриття захисного екрана; проводити щоквартальну перевірку стану навантажувальних вузлів; під час металізації алюмінієм — використовувати захисні щитки та витяжну вентиляцію, запобігати утворенню пилу та іскор.

4.4. Пожежна безпека в лабораторії

Основні джерела займання - електричні стенди та нагрівальні прилади; реагенти, що утворюють горючі гази (аміак); пилові суміші алюмінію при металізації.

Заходи попередження пожеж - регулярна перевірка електропроводки; використання іскробезпечного інструменту; наявність вогнегасників ВВК-2, ВП-5, кошми; заборона використання відкритого полум'я; навчання персоналу діям у разі загоряння.

4.5. Дії персоналу в разі аварії чи надзвичайної ситуації

При розливі аміачної води або КАС

1. Негайно припинити роботу, увімкнути аварійну вентиляцію.
2. Евакуювати персонал на відстань не менше 50 м.
3. Одягнути респіратор, хімічний захист.
4. Місце розливу засипати нейтралізатором (крейда, сода, пісок).
5. Повідомити відповідального за охорону праці.

При пожежі

1. Знеструмити обладнання.
2. Використати порошковий або вуглекислотний вогнегасник.
3. Повідомити ДСНС (101).
4. Евакуювати людей згідно з планом евакуації.

При ураженні хімічною речовиною

- промити шкіру проточною водою 10–15 хв;
- при ураженні очей — негайно промити та звернутись до медпункту;
- при отруєнні парами аміаку — вивести на свіже повітря, забезпечити тепло та кисневу підтримку.

4.6. Система цивільного захисту та план реагування

Усі працівники та студенти, залучені до експериментальних робіт, повинні: - пройти первинний інструктаж з охорони праці; вивчити План дій на випадок НС; знати місця розташування аптечок, вогнегасників, аварійних душів; вміти користуватися засобами хімічного та індивідуального захисту; брати участь у тренуваннях з евакуації щонайменше 1 раз на рік.

4.7. Висновки до розділу 4

Під час проведення досліджень малоциклової корозійної втоми конструкційних сталей у середовищах мінеральних добрив виникає комплекс небезпечних та шкідливих факторів хімічного, механічного, електричного та пожежного характеру. Виконання вимог законодавства, застосування індивідуальних засобів захисту, забезпечення належної вентиляції та технічного стану обладнання, а також чіткий алгоритм дій у надзвичайних ситуаціях гарантують безпечні умови праці та мінімізують ризики для персоналу.

Своєчасні профілактичні заходи, контроль за технічним станом лабораторного обладнання та проведення інструктажів є ключовими елементами ефективної системи охорони праці та цивільного захисту.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Рідкі комплексні добрива (РКД), КАС та суспензійні добрива є висококорозійно-активними середовищами для вуглецевих конструкційних сталей, зокрема Ст3. Характер корозії визначається не лише загальним хімічним складом добрив, а й ступенем конверсії, значенням рН, наявністю мікроелементів та фазовим станом (розчини, суспензії, газова фаза, межа «рідина–газ»).

2. Критично небезпечною з точки зору корозії є межа поділу рідкої й газової фаз, а також щілини та вузькі зазори (менше 0,3 мм), де захисний фосфатний шар не формується і зосереджується локальне виразкове руйнування. Саме ці зони мають бути враховані як найуразливіші при конструюванні та експлуатації машин для внесення РКД і КАС.

3. Показано, що глибинний показник корозії не може слугувати універсальним критерієм оцінки корозійної стійкості сталей у РКД. Більш інформативним є показник втрат металу з одиниці площі за період формування захисного шару. Це важливо для коректного порівняння різних марок сталей і складів добрив.

5. Агресивні середовища (розчини NaCl, морська вода, водень, добрива) суттєво знижують опір малоциклової втоми, прискорюють ріст тріщин і змінюють механізм руйнування (перехід до міжзеренного характеру, розвиток множинних тріщин замість єдиної магістральної). Частота та режим циклічного навантаження (амплітуда, асиметрія, швидкість циклів) безпосередньо впливають на ступінь корозійного послаблення довговічності.

6. Попередня корозія (ПК), у тому числі атмосферна або періодичне змочування корозійно-активними розчинами, істотно знижує втомну міцність сталей навіть за подальших випробувань на повітрі. Встановлено, що найбільше падіння границі втоми відбувається вже на початкових етапах дії середовища, а пітинги та каверни виступають ефективними концентраторами напружень і центрами зародження тріщин.

7. Стан поверхні та методи її механічної та поверхневої обробки (точіння, шліфування, обкатування роликami, дробоструменева обробка, травлення) мають принциповий вплив як на корозійну стійкість, так і на корозійно-втомну міцність

8. Поверхнево-пластичне деформування (ППД) і обкатування роликami в більшості випадків підвищують витривалість і корозійно-втомну стійкість сталей за рахунок згладжування мікронерівностей, зниження концентрації напружень та формування стискуючих залишкових напружень. Водночас у зоні малоциклової втоми питання співвідношення ролі залишкових напружень і мікрорельєфу залишається дискусійним, а результати для агресивних середовищ, зокрема добрив, є фрагментарними.

9. Зміцнення вибухом та лазерна обробка істотно змінюють мікроструктуру та напружений стан приповерхневих шарів сталей, що може як підвищувати, так і знижувати втому й корозійну міцність. Для низки сталей зафіксовано значне зростання границі втоми після вибухового зміцнення, тоді як недоцільні режими лазерного гартування призводять до утворення крихких структур і небезпечних залишкових напружень розтягу, які погіршують тріщиностійкість. Загалом вплив цих видів обробки на малоциклову корозійну втому в умовах дії добрив вивчений недостатньо.

10. Металізаційні покриття (алюмінієві, цинкові та багат шарові плаковані системи) є ефективним засобом захисту від загальної корозії, однак їхній вплив на втому й корозійно-втомну довговічність неоднозначний. Різниця в пластичності шарів, мікронеоднорідність деформацій і зміна механіки зародження тріщин можуть як покращувати, так і погіршувати ресурс, особливо в області великих пластичних деформацій.

У результаті проведених досліджень встановлено, що традиційна методика випробувань на малоциклову корозійну втому конструкційних сталей з металізаційними покриттями, коли контакт з агресивним середовищем є короткочасним, не дає об'єктивної оцінки їхньої довговічності. Металізаційні алюмінієві покриття на сталі типу 12ХН3А за

короткочасної дії середовища знижують малоциклову витривалість, проте після тривалої попередньої витримки в КАС (150–300 діб) забезпечують суттєве зменшення швидкості корозії та підвищення довговічності зразків у 2 рази порівняно з неметалізованим металом. Це пов'язано з формуванням на поверхні стабільного захисного шару продуктів корозії алюмінію, який ефективно екранує основу від дії агресивного середовища і перешкоджає розвитку корозійно-втомних пошкоджень.

Доведено доцільність використання двошарових (плакуваних) сталей типу КД2 як корпусних матеріалів для роботи в середовищах хімізації сільського господарства. При великих рівнях деформацій вирішальну роль відіграє пластичність металу, що забезпечує найвищу довговічність нержавіючої сталі Х18Н10Т. Із зниженням амплітуди циклічної деформації роль міцності зростає, і двошарова сталь КД2 демонструє перевагу над гомогенними сталями як за умов випробувань на повітрі, так і в корозійному середовищі. Встановлено, що збільшення товщини плакованого шару доцільне при експлуатації в умовах значних перевантажень ($\epsilon > 0,6\%$), тоді як при робочих деформаціях у діапазоні 0,3–0,4 % оптимальною є мінімальна товщина плакованого шару (приблизно 1,2 мм), яка забезпечує прийнятний рівень корозійного захисту за мінімальної вартості матеріалу.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що підвищення опору малоцикловій корозійній втомі конструкційних сталей в середовищах мінеральних добрив досягається комплексом заходів, які поєднують: застосування металізаційних, раціональний підбір їхньої товщини та режимів попередньої обробки. При цьому особливо важливим є урахування реальних умов роботи деталей машин, рівня циклічних деформацій і тривалості дії агресивних середовищ, що вимагає застосування методик випробувань з попередньою тривалою корозійною витримкою зразків.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Totten, G. E., West, S. R. Corrosion and Corrosion Control of Agricultural Equipment. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 276 p.
2. Influence of Corrosive Environments on Fatigue Behavior of Steels. // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 45, No. 6. – P. 120-130.
3. Андрейків О. Є., Лучко Й. Й., Божидарник В. В. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : монографія. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2002. – 634 с.
4. Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Ковальчук Я. О., Коваль І. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : навч. посібник. – Тернопіль : Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2023. – 362 с.
5. Гавриш А. П., Киричок П. О., Підберезний М. П. Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів : монографія. – Київ : Наукова думка, 1995. – 748 с.
6. Клименко В. М., Шиліна О. П., Осадчук А. Ю. Технологія конструкційних матеріалів. Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво : навчальний посібник. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2005. – 486 с.
7. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник / В. В. Хільчевський, С. Є. Кондратюк, В. О. Степаненко, К. Г. Лопатько. – Київ : Либідь, 2002. – 712 с.
8. Пахаренко В. Л., Марчук М. М., Пахаренко О. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням) : навч. посібник. – 2-ге вид., перероб. і доповн. – Рівне : НУВГП, 2018. – 386 с.
9. Пістун І. П., Березовецький А. П., Березовецька О. Г. Небезпека аварійного руйнування машин для хімічного захисту // Охорона праці та соціальний захист працівників : зб. тез доп. міжнар. конф., м. Київ, 19-21 листопада 2008 р. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008

10. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тубальцев А. М. Малоциклова втома суднобудівних сталей (стан поверхні та приповерхневий шар): монографія. – Львів: Тріада плюс, 2009. – 332 с.
11. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В. О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навчальний посібник. – Львів: Тріада плюс, 2017. – Ч. І. – 640 с.
12. Погребова І. С. Інгібітори корозії металів : навчальний посібник. – Київ : Хай-Тек Прес, 2012. – 292 с.
13. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів та сплавів : монографія. – Львів : Сполом, 2008. – 664 с.
14. Похмурський В. І., Хома М. С., Куньч З. Д. Електродугові відновні та захисні покриття : монографія. – Львів : Сполом, 2005. – 547 с.
15. Похмурський В. І., Хома М. С., Білас І. В. Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій : монографія. – Київ : Наукова думка, 1995. – 312 с.
16. Савченко Т. В. Втомна міцність сталей в умовах агресивних середовищ // Матеріали III Міжнародної конференції з матеріалознавства. – Харків: ХНУРЕ, 2020.
17. Сахненко М. Д., Красовський А. І., Ільяшов М. І. Основи теорії корозії та захисту металів : навчальний посібник. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – 376 с.
18. Стельмах М. А. Антикорозійні покриття в аграрному машинобудуванні. – Харків: ХНАМГ, 2003.
19. Рубаненко В. О. Антикорозійні властивості матеріалів для сільськогосподарської техніки. – Полтава: ПНТУ, 2010.
20. Трембач О. М. Підвищення зносостійкості деталей із сталі 110Г13Л зміцненням вибухом : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. – Краматорськ, 2018.

21. Фальченко Ю. В., Дзюба С. Г., Нагану С. П. Лазерне зміцнення елементів машинобудівних конструкцій : монографія. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 396 с.
22. Федоренко О. С. Дослідження втомної міцності сталей в агресивних середовищах: проблеми та рішення // Механіка та матеріали. – 2022. – Т. 65, № 2.
23. Шиліна О. П., Клименко В. М. Практикум з конструкційних матеріалів : навчальний посібник. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 643 с.