

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «Дослідження втомних конструкційних сталей з антикорозійними покриттями машин внесення добрив і пестицидів»

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Федорович Максим Іванович
(Прізвище та ініціали)

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

Дубляни 2024

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

Федоровичу Максиму Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження втоми конструкційних сталей з антикорозійними покриттями машин внесення добрив і пестицидів»

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

затверджені наказом ЛНУП від 12 вересня 2024 року №616/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 літературних джерел за темою; 4.2. Методика досліджень; 4.3. Малоциклова корозійна втома конструкційних сталей з металізаційними покриттями; 4.4. Охорона праці та захист населення; 4.5. Економічна частина; Висновки і пропозиції; Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: зразки для випробувань на малоциклову втому; випробування на малоциклову втому в середовищі КАС на машині ІІІ-2;

результати досліджень зразків з металізаційними покриттями на МЦВ при деформації $\varepsilon=0,5\%$; загальний вигляд зразків після витримування в середовищі кас протягом 6 місяців; зломи зразків на повітрі; профілограми поверхні зразків; механічні властивості зварного з'єднання сталі 09Г2, металізованої алюмінієм; структура металу шва зварних з'єднань із сталі типу 09Г2; криві мцв гладких зразків сталі 45Г17Ю3; втомна тріщина, яка виникає під металізаційним покриттям; малоциклова витривалість зразків сталі 45Г17Ю3; висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	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 “ 16 ” вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Огляд літературних джерел за темою	04.10.24	
2	Методика досліджень	25.10.24	
3	Проведення досліджень по малоцикловій корозійній втомі конструкційних сталей з металізаційними покриттями	15.11.24	
4	Охорона праці та захист населення	22.11.24	
5	Економічна частина	29.11.24	
6	Оформлення пояснювальної записки	06.12.24	
7	Оформлення слайдів	10.12.24	

Студент

_____ (підпис)

Максим ФЕДОРОВИЧ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Андрій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

УДК 631.632.1

«Дослідження втоми конструкційних сталей з антикорозійними покриттями машин внесення добрив і пестицидів» Федорович М.І. – Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування – Дубляни, Львівський НУП - 2024.

55 с. текст. част., 15 рис., 4 табл., 15 слайдів, 21 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.....	6
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ.....	7
1.1. Вплив навантажень і агресивних середовищ на роботоздатність конструкційних сталей	7
1.2. Вплив добрив і пестицидів на довговічність конструкцій машин за літературними джерела.....	9
1.3. Технологічні методи підвищення роботоздатності конструкційних сталей.....	11
1.3.1. Механічна обробка.....	11
1.3.2. Поверхнєве пластичне деформування.....	13
1.3.3. Антикоровійні металічні покриття.....	14
1.4. Висновки до розділу	16
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
2.1. Обґрунтування вибору конструкційних сталей для досліджень.....	18
2.2. Методика оцінки корозії	18
2.2.1. Зміна маси зразка.....	18
2.2.2. Глибина корозійного ураження.....	18
2.3. Зразки для випробувань на малоциклову втому.....	20
2.4. Робочі середовища.....	21
2.5. Висновки до розділу	22
3. МАЛОЦИКЛОВА КОРОЗІЙНА ВТОМА КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ З МЕТАЛІЗАЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ.....	24
3.1. Довговічність бездефектних зразків з металізаційними покриттями.....	24
3.2. Довговічність напилених зразків із зварними з'єднаннями...	25

3.3. Витривалість напилених зразків з різними технологічними і конструктивними дефектами.....	28
3.4. Малоциклова втома двошарової конструкційної сталі марки КД2 (10ХСНД + Х18Н10Т).....	38
3.5. Висновки до розділу.....	38
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ.....	47
4.1. Вплив втоми конструкційних сталей на безпеку працівників та навколишнє середовище.....	47
4.2. Екологічні аспекти використання антикорозійних покриттів..	48
4.3. Висновки до розділу	49
5. АСПЕКТИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТЬ СТАЛІ.....	50
5.1. Висновки до розділу	52
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

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 контакт 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 антикорозійних покриттів деталей машин, які працюють в контакт з добривами і пестицидами.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ

1.1. Вплив навантажень і агресивних середовищ на роботоздатність конструкційних сталей

Для забезпечення будівництва сучасної техніки необхідне створення нових конструкційних сталей з високими фізико-механічними властивостями. До таких сталей, висуваються такі основні вимоги [7,8]: зварюваність; технологічна пластичність; рівень міцнісних властивостей; однорідність властивостей листів в різних напрямках; опір корозії в агресивних середовищах; опір циклічним навантаженням.

Втому металів під дією циклічних навантажень пов'язують з відносно невеликими напруженнями, на 20-60% нижчими границі пружності, які обумовлюють довговічність зразків чи деталей протягом багатьох мільйонів циклів до руйнування. Розрахунки деталей, які працюють на втому, у цьому випадку обумовлені положеннями теорії пружності, які уточнювалися із залученням експериментальних втомних випробувань зразків і реальних деталей. Базовою передумовою конструювання машин була необхідність забезпечення довготривалої роботоздатності. Однак, подібні принципи призводили до неоправдано великої ваги деталей в тому числі, коли реальна деталь мала обмежену довговічність.

Сучасний розвиток техніки характеризується тенденцією створення ряду машин і апаратів обмеженого терміну служби. У таких конструкціях припускається можливість появи напружень, які перевищують границю пружності, що дозволяє найбільш повно використати потенціальні міцнісні можливості матеріалу. Тому на сьогоднішній день питання, пов'язані з поведінкою матеріалів при деформуванні в пружно-пластичній області є важливими не тільки з наукової точки зору, але і актуальними для конструкторів.

Проблема втоми металів під дією порівняно невеликого числа циклів навантажень в пружно-пластичній чи пластичній областях набуває важливого значення в загальній проблемі втоми металів.

Явище руйнування під дією циклічних напружень, які викликають пластичну циклічну деформацію матеріалу, отримало назву «малоциклової» (low-cycle) чи пластичної (plastic strain) втоми, причому слово «мало» відноситься до числа циклів руйнування.

На відміну від звичайної, де довговічність обчислюється мільйонами циклів до руйнування, малоциклова втома передбачає довговічність не більшу 10^5 циклів. Такі випадки прикладення високих напружень чи деформацій характеризуються низькою частотою навантажень (від сто циклів за хвилину до одного циклу за добу і навіть в тиждень). Так корпус судна за 10 років служби витримує не більше 10^4 навантажень в пружнопластичній області, тобто тривалість циклу малоциклового навантаження вираховується декількома годинами і навіть добами.

Режим малоциклової втоми є підвищеною небезпекою для роботи різних корпусних деталей. Особлива небезпека малоциклової втоми, як показали подальші дослідження полягає в тому, що цей режим втоми створює сприятливі умови для переходу металу в крихкий стан, тобто збільшується небезпека крихкого руйнування металу, а позатак, обумовлює можливість аварій і катастроф виробів.

Тому для забезпечення надійності та довговічності корпусних виробів потрібно було виробити певні вимоги до матеріалів, які працюють в режимі малоциклової втоми і забезпечити контроль за їх виконанням зі сторони конструкторів-проектантів виробів, металургів-виробників, а також безпосередніх експлуатаційників виробів.

Довговічність матеріалів під дією повторно-статичних навантажень, які призводять до деформації металу за границею пружності на декілька порядків нижча, ніж при циклічному деформуванні в пружній області.

Руйнування при малоцикловій втомі найчастіше є катастрофічним і запобігання йому представляє серйозну технічну проблему.

Вплив активних рідких середовищ на витривалість при МЦВ сталей після різних рафінувальних обробок показаний в монографії [16], з якої виходить, що використання рафінувальних методів для очищення сталей від неметалевих включень призводить до підвищення малоциклової довговічності, і особливо, у корозійному та наводнювальному середовищі.

Вплив корозійного середовища на малоциклову втому конструкційних сталей різного рівня міцності вивчався в роботі [9-11,12,13], а накопичення пошкодження - [19]. Зменшення втомної міцності під впливом наводнювання було названо «водневою втомою» [13]; очевидно, і зниження витривалості при МЦВ під дією водню автори назвали «малоцикловою водневою втомою». Враховуючи актуальність вивчення впливу водню на МЦВ сталі, дослідники провели такі випробування [21], де відмічено, що руйнування зразків у середовищі водню відбувається в 2-3 рази швидше, ніж у вакуумі. Таке зниження пояснюється різким спадом пластичності приповерхневого шару внаслідок абсорбції водню. Вивчення впливу анізотропії властивостей конструкційних сталей наведені в [3].

З наведеного короткого літературного огляду із малоциклової втоми видно, що цьому виду втомного руйнування все більше і більше присвячується досліджень, проте багато питань ще не вивчено.

1.2. Вплив добрив і пестицидів на довговічність конструкцій машин за літературними джерелами

На сьогодні найбільш економічними, як зі сторони виробництва, так і на стадії використання, є рідкі комплексні добрива (РКД), рідкі азотні добрива: рідкий аміак, аміакати, аміачна вода, суміш концентрованих розчинів карбаміду і аміачної селітри (КАС).

Із зростанням виробництва рідких мінеральних добрив актуальним стало питання впливу їх на матеріал машин, які використовуються при

виробництві, зберіганні і внесенні рідких добрив. Одночасно з розробкою нових марок добрив конструюються машини для їх використання: агрегати ПЖУ для внесення, ОЗТП, ГКБ для транспортування рідких добрив і їх сумішей.

Багато розроблених машин для транспортування та внесення мінеральних і органічних добрив, отрутохімікатів мають слабкі вузли, на яких відсутні антикорозійні покриття. Окремі машини мають робочі органи, виготовлені з некорозійних матеріалів [6].

Корозійна дія рідких добрив на відповідну сільськогосподарську техніку та обладнання вивчена недостатньо.

Так Василенко І.М. [7] і ін. випробовували корозійну стійкість вуглецевої сталі Ст3, економлегованих сталей X18H10T, 08X22H6T, 08X21H6M2T в середовищах РКД марки 10-34-0 (ТУ 6-08-414-78) протягом 1000 год гравіметричним методом. В залежності від часу випробувань глибинний показник корозії змінюється і, отже, не може бути абсолютним критерієм оцінки корозійної стійкості сталі.

Вагові втрати спостерігались лише в перші 50...55 год випробувань. Металографічним дослідженням виявили на поверхні зразків захисний шар товщиною 3...4 мкм. Витримка зразків від 52 до 1000 год приводила до збільшення товщини захисного шару до 6...7 мкм.

Найбільш підходящим критерієм для оцінки корозійної стійкості Ст3 є величина втрат металу з одиниці площі за час формування захисного шару, а не ваговий чи глибинний показник, який не дає повного уявлення про поведінку вуглецевої сталі в РКД, через те, що величини цих показників в значній мірі залежать від тривалості випробувань.

Результати досліджень [11] корозійної стійкості сталі Ст3 в РКД марок 9-9-9 і 7-7-10, виготовлених на основі базового розчину 10-34-0 показали, що глибинний показник корозії сталі Ст3 в РКД марки 9-9-9 в 2...2,5 рази перевищує показник корозії в базовому розчині РКД, корозія металу в РКД марки 7-7-10 на порядок вища, ніж в базовому розчині і пояснюється це

наявністю в добривах хлориду калію, який сповільнює процес формування захисного фосфатного шару.

Солі мікроелементів $ZnSO_4 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Na_2B_4O_7$, $(NH_4)_6 MO_7O_{24} \cdot 4H_2O$, $Co(NO_3)_2$, введені в розчини добрив марок 10-34-0 і 9-9-9, значно впливають на корозійні властивості. Наприклад, в розчині РКД з 0,7...1,0% Мо зросли втрати металу за час формування захисного шару, збільшився і глибинний показник корозії, особливо в РКД марки 10-34-0. В РКД з 1,0% В протягом 18 діб не спостерігалось утворення захисного шару. Сірчаноокислий цинк, в кількості 0,2...1,0%, активізував процес формування захисного шару на поверхні зразків, корозійні втрати металу при цьому значно знизилися. Досліди показали, що економлеговані сталі мають високу корозійну стійкість в середовищах РКД з мікроелементами.

Проводили також випробування сталі Ст3 в РКД марки 10-34-0 на границі рідкої і газоподібної фаз в герметичній місткості протягом 1000 год [11]. Одночасно частину зразків досліджували окремо в рідкому і в газовому середовищах. Корозійні втрати сталі в газовому середовищі були незначними (швидкість корозії не перевищувала 0,0013 мм/рік) на поверхні відмічені невеликі плями корозії. На межі поділу фаз утворилися значні заглибини шириною 0,8 мм, причому поверхня металу в цій зоні не покривається захисним шаром і є місцем скупчення виразок і заглиблень, а швидкість корозії в 10...15 разів вища, ніж в рідкому середовищі.

1.3. Технологічні методи підвищення роботоздатності конструкційних сталей

1.3.1. Механічна обробка. Якість поверхні металу після механічної обробки характеризується показниками мікрогеометрії поверхні, а якість приповерхневих шарів - структурою і зміцненням приповерхневого шару, його міцністю і пластичністю, а також залишковими напруженнями.

При циклічних напруженнях мікрогеометрія має великий вплив на витривалість сталі, оскільки дефекти і сліди обробки є концентраторами

напружень. Найбільш суттєвим параметром, який визначає якість механічно обробленої поверхні з точки зору витривалості, є максимальна глибина нерівностей, які утворюються на поверхні, стають ефективними концентраторами напружень і служать однією із головних причин зниження циклічної міцності [14].

На сьогодні питання про вплив обробки на витривалість розглядають комплексно, у взаємозв'язку впливу мікрогеометрії і стану поверхневого шару металу. Механічна обробка, яка обумовлює різну ступінь шорсткості поверхні, величин залишкових напружень, а також глибину та інтенсивність зміцнення, значно впливає на витривалість сталі; із зменшенням шорсткості поверхні, збільшенням зміцнення і залишкових напружень стиску, зростає витривалість сталі. Стверджується, що різний вплив окремих видів механічної обробки на втомну міцність у цілому пояснюється різним фізико-механічним станом металу.

Особливо підвищується значення властивостей поверхні та приповерхневих шарів металу при одночасній дії на деталь циклічних напружень і зовнішнього активного середовища, оскільки всі середовища можуть впливати тільки через поверхню металу. Тому питання про вплив механічної обробки на фізико-механічні та електрохімічні властивості сталей дуже актуальні.

Дослідження [14] показали, що механічна обробка, змінюючи фізичний стан поверхні, суттєво впливає на хімічний опір і електрохімічні властивості сталі. У результаті неоднорідної пластичної деформації виникає електрохімічна гетерогенність поверхні, різко підсилюючи роботу корозійних мікроелементів. Різні способи обробки приводять до різного хімічного опору поверхні. Дослідження електрохімічних властивостей дозволили запропонувати найбільш оптимальні в цьому відношенні режими механічної обробки.

Отже, питання про вплив стану поверхні та приповерхневих шарів, отриманих у результаті механічної обробки при одночасній дії активного

середовища на мало циклову витривалість (МЦВ) ще недостатньо висвітлені в літературі.

1.3.2. Поверхнєве пластичне деформування. При механічній обробці головною метою є отримання деталей машин потрібних розмірів з певною шорсткістю поверхні, а створені при цьому зміцнення і залишкові напруження є немов би змушеним і нероздільним її наслідком. Для того, щоб навмисно і свідомо змінювати фізико-механічні властивості приповерхневих шарів, тобто створювати певне зміцнення і отримувати сприятливі залишкові напруження, використовують методи поверхневого пластичного деформування (ППД).

Метод зміцнення деталей машин ППД отримав на сьогодні широке розповсюдження. При ППД змінюються фізико-механічні властивості поверхневого шару металу, підвищується його твердість, створюється сприятливий розподіл залишкових напружень перерізу деталі, а також видозмінюється форма і орієнтація кристалічних зерен поверхневих шарів, так що опір цих шарів пластичній деформації і руйнуванню підвищується.

Що стосується впливу поверхневого зміцнення для підвищення циклічної міцності, то тут існує однозначна думка: поверхнєве зміцнення завжди підвищує довговічність металу.

Відомо, що зміцнені поверхні піддаються більш сильній дії зовнішніх активних середовищ [4,5], проте зміцнення значно підвищує довговічність сталі в активних середовищах при довготривалому циклічному навантаженні.

Поверхнєве зміцнення нейтралізує дію гострих надрізів, забезпечує найбільш сприятливий мікрорельєф поверхні і тим самим підвищує втомну міцність поверхневого шару. Коли при шліфуванні багато гострих і глибоких надрізів залишається, то після поверхневого зміцнення радіуси впадин мікронерівностей суттєво збільшуються, самі нерівності розорієнтовані, висота цих нерівностей набагато зменшується.

Так, автор [14] вказує, що при дії високих повторних навантажень (малоциклова область) і невеликій концентрації напружень роль залишкових

напружень стиску стає другорядною, а на перший план, особливо для високоміцних матеріалів, виступає мікрорельєф поверхні.

У роботах [16,19] показано, що пластична деформація від зовнішніх навантажень призводить до зменшення чи навіть повного зникнення початкових залишкових напружень, і, як наслідок, вплив залишкових напружень на витривалість може не проявитися. Автор [14], вивчаючи вплив ППД на опір малоцикловому руйнуванню конструкційних вуглецевих сталей при розтязі-стиску, вказує, що залишкові стискуючі напруження не можуть відігравати значної ролі у підвищенні малоциклової втоми, оскільки вони швидко релаксують в ході повторних навантажень.

1.3.3. Антикоровійні металічні покриття. Як уже відмічалось, якість поверхні виробу має важливе значення для її експлуатаційних властивостей. Крім розмаїтих механічних обробок та ППД стан поверхні може змінюватися і поверхневими покриттями іншими металами чи дифузійним насиченням поверхні металами і неметалами [19]. При цьому товщина покриття чи глибина насичення поверхневого шару різними елементами достатня для отримання нової якості поверхні.

Враховуючи велику кількість антикоровійних покриттів згідно єдиної системи захисту від корозії, старіння і біопшкодження [16], ми не мали змоги взяти повний перелік покриттів і перевірити їхню поведінку в режимі малоциклових навантажень. Зупинилися лише на звичайній металізації, плакуванні прокатуванням та вибухом і фрагментарно на плазмових покриттях.

Для захисту від корозії найбільш широко використовують покриття алюмінієм і цинком, які є анодами по відношенню до сталі в більшості корозійно-активних середовищах. Металізаційні покриття з успіхом використовуються в різних країнах для захисту від корозії в суднобудуванні [1-5]. Термін служби металізаційних покриттів конструкцій, які працюють в морській воді, прогнозується авторами [16] до 20-25 років. Деякі роботи

присвячені впливу металізаційних покриттів на корозійну стійкість зварних з'єднань суднокорпусних сталей.

У сучасному машинобудуванні безперервно росте потреба в конструкційних матеріалах з високою стійкістю в корозійних середовищах, із поєднанням високих механічних властивостей. Найбільш ефективним методом отримання заготовок і деталей з такими властивостями є створення їх у вигляді двох чи багат шарових композицій, в яких несучий шар виконується з недорогої вуглецевої чи низьковуглецевої сталі із заданим рівнем міцності, а поверхневий шар (чи шари), які взаємодіють з робочим середовищем, – із високолегованої сталі, кольорових металів чи сплавів на їх основі. Перспективне використання плакованих матеріалів приведено в монографіях та оглядах [8,14,16].

Аналізуючи вище приведені дані видно, що металізаційні покриття майже однозначно успішно захищають сталі конструкції від корозії, однак питання впливу металізаційних і плакованих захисних покриттів на довговічність сталі в умовах дії циклічних навантажень, особливо в пластичній області, вивчені мало і їх результати часто протирічливі.

На відміну від гальванічних покриттів, які, як правило, знижують опір втоми сталі навіть при звичайній втомі металізаційні покриття дають як позитивний ефект так і негативний [19,20].

Що стосується випробувань плакованих сталей на багатоциклічну втому, то підсумовуючи роботи [12-14] можна зробити висновок, що мікронеоднорідність деформації є важливим фактором у механізмі циклічного руйнування композитного матеріалу. Власне, гранична зона і плакований шар можуть створювати деякий підкріплювальний і гальмівний ефекти, які підвищують роботоздатність конструкційного матеріалу при поширенні в ньому втомних пошкоджень.

Що стосується малоциклової втоми де характерний розвиток активних пластичних деформацій, накопичення локальних пошкоджень, то звичайно покриття, що знижують пластичні властивості металу знижують і

витривалість [18]. Тому необхідно мати оцінку впливу біметалів отриманих різними методами на опір малоциклової втомі. Аналіз небагаточисельних джерел [20,21] майже однозначно стверджує, що в цілому приведені експерименти не спостерігали замітного зниження міцності плакованих сталей у порівнянні з основним металом при пластичному циклічному деформуванні.

1.4. Висновки до розділу

Резюмуючи проведений огляд літературних джерел з питань дослідження впливу фізико-механічного стану поверхні шарів на опір малоциклової втомі конструкційних сталей в агресивних середовищах, можна зробити висновки:

- Недосконало вивчені особливості деформування і руйнування в присутності корозійного середовища. Існує потреба в додаткових дослідженнях, які б уточнили механізми взаємодії корозійних процесів із структурними характеристиками сталей, особливо в умовах циклічного навантаження.

- Інформації про використання поверхнево-пластичної деформації для підвищення малоциклової втомі корпусних сталей недостатньо. Висновки про можливість її застосування багатьма дослідниками вважаються проблематичними, а роботи, які присвячені дослідженням впливу поверхнево-пластичного деформування (ППД) на малоциклову витривалість (МЦВ) сталі в активних рідинних середовищах, майже відсутні. Це вказує на необхідність розвитку нових підходів до застосування поверхневого зміцнення для підвищення експлуатаційної надійності сталі в умовах агресивних середовищ.

- Робіт, які б вивчали вплив зміцнювальних обробок на опір малоциклової втомі конструкційних сталей з експлуатаційними дефектами (корозійні ураження та втомні тріщини), зовсім обмаль. Це створює прогалину у науковому розумінні та обґрунтуванні таких методів зміцнення в

умовах реальних експлуатаційних навантажень, особливо для сталей із первинними ушкодженнями.

Єдиної думки про ступінь впливу зміцнення на МЦВ сталі немає, що потребує додаткового теоретичного й експериментального обґрунтування з урахуванням умов експлуатації.

Металізаційні покриття майже однозначно успішно захищають сталеві конструкції від корозії, однак питання впливу металізаційних і плакованих захисних покриттів на довговічність сталі в умовах дії циклічних навантажень, особливо в пластичній області, вивчені мало і їх результати часто протирічливі. Це свідчить про необхідність розробки комплексних методів оцінки стійкості таких покриттів у різних експлуатаційних умовах, що включає аналіз мікроструктурних змін.

Питання про можливість і доцільність використання поверхневого зміцнення для деталей, які працюють в режимі малоциклового навантаження, повинні кожного разу вирішуватися конкретно з урахуванням сукупного впливу багатьох факторів: властивості сталі (її міцності, пластичності тощо), напруженого стану, рівня і виду навантаження, дії зовнішнього середовища і зміни мікрорельєфу поверхні. Подальші дослідження у цій галузі мають бути спрямовані на розробку інтегрованих підходів до оптимізації поверхневих обробок, які б враховували специфіку експлуатаційних умов та дозволили підвищити надійність і довговічність сталевих конструкцій в агресивних середовищах.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування вибору конструкційних сталей для досліджень

Багато технічних засобів, задіяних для виробництва сільськогосподарської продукції, експлуатуються за складних виробничих умов. Механізми піддаються циклічним навантаженням, працюють під впливом агресивних середовищ. Для забезпечення безперебійної роботи такої техніки, для її виготовлення потрібні високолеговані якісні сталі і інші спеціальні конструкційні матеріали.

Через кризову ситуацію в Україні сільськогосподарське машинобудування не забезпечується такими конструкційними матеріалами, а поступають на будівництво таких машин низькосортні дешеві вуглецеві сталі.

Виходячи з вище сказаного, нами досліджувались такі конструкційні сталі: сталь вуглецева звичайної якості Ст3; якісні вуглецеві сталі 20, 35, 45; сталь високоміцна 30ХГСНА; аустенітна марганцевиста сталь 45Г17Ю3; сталі корпусні 10ХСНД, 09Г2 та ін.

Як модельний матеріал вибрали типову для роботи з малоцикловими навантаженнями маловуглецеву сталь 20.

2.2. Методика оцінки корозії

2.2.1. Зміна маси зразка. Стійкість конструкційних матеріалів проти корозії за зміною маси зразка. Визначення корозійної стійкості матеріалів за зміною маси є простим і надійним способом, бо безпосередньо вказується кількість прокородованого металу. Проте таким методом користуються коли корозія є рівномірною. Найчастіше його використовують при спостереженні за протіканням корозії маловуглецевих сталей.

Вираховують масу корозійних втрат зразка в г/м^2 або в мг/см^2 за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S} \quad (2.1)$$

де m_0 - маса зразка початкова;

m_1 - маса зразка після очищення від продуктів корозії;

S - площа зразка початкова (до випробування).

Тоді швидкість корозії в г/(м²·год) буде:

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot \tau} \quad (2.2)$$

де τ - час.

Зважували зразки вагою квадрантною лабораторною моделі ВЛКТ-500г-М 4-го класу з механізмом компенсації тари.

2.2.2. Глибина корозійного ураження. При сильно нерівномірній корозії показник зміни маси доповнюють показником, що характеризує фактичну глибину корозійного проникнення.

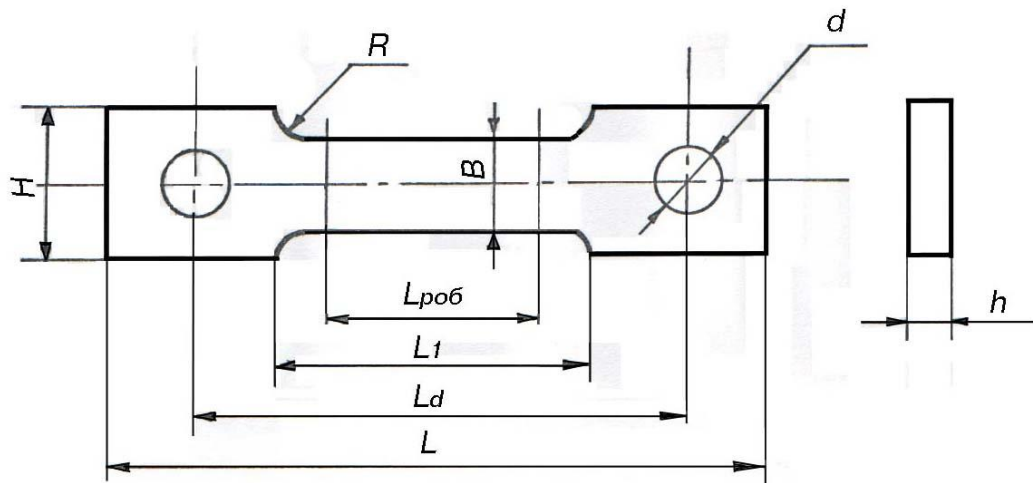
Використовують для вимірювання глибини корозійних уражень головки індикаторні, які мають пристрій фіксації вихідного стану. Більш досконалими пристроями є різні типи профілографів.

2.3. Зразки для випробувань на малоциклову втому

Для випробувань на малоциклову втому використовували листові зразки товщиною 2,5; 6; 12; 20 мм. Розміри зразків і їх форма подані на рис.2.1.

Для більшості дослідів, що мали на меті принципові питання якості досліджень, використовували зразки товщиною 2,5 мм. Коли вирішувалися прикладні питання, пов'язані з вибором матеріалів і інші, випробування здійснювали на зразках фактичних товщин (6, 12, 20 мм), таким чином імітували розміри об'єктів, які експлуатуються в умовах малоциклової втоми.

Виготовлені зразки піддавали різним зміцнювальним обробкам, покриттям.



Основні розміри (мм)				Допоміжні і габаритні розміри (мм)				
H	B	R	L _{роб.}	H	L ₁	d	L _d	L
2.5	6	10	15	12	27	8	45	57
6	30	30	77	40	110	10	130	160
12	60	60	152	70	200	20	230	320
20	100	100	70	120	110	25	270	420

Рис. 2.1 - Зразки металів для випробувань на МЦВ

2.4. Робочі середовища

Дослідження на корозійно-втомний опір конструкційних сталей проводили в контактi з мінеральними добривами і пестицидами..

З мінеральних добрив брали водний аміак, карбамід- аміачна селітра (КАС), рідкі комплексні добрива (РКД) а також тверді (сипучі).

Аміак водний випускають із вмістом азоту 16 і 20%. Вносять його для підкислення ґрунту. Зберігають і перевозять його у герметично закритих сталевих резервуарах.

КАС – це суміш розчинів аміачної селітри і карбаміду, в якій міститься 26 – 36% азоту. Добриво перспективне, бо на його виробництво і перевезення йде менше затрат, як для інших рідких і твердих добрив.

Виробництво рідких комплексних добрив (РКД) на 20% дешевше від добрив твердих. Використання їх також потребує менших затрат, бо відсутність вільного аміаку не потребує герметизації при зберіганні і внесенні. Вносити РКД можна разом з поливом при умові, якщо попереджено стікання поливної води в канави. Рідке комплексне добриво не токсичне, вибухо-пожежо безпечне, не летке. Коли діє на поверхню металу, утворює фосфатну плівку, яка попереджає корозію. РКД випускають з різним вмістом поживних речовин. Базове РКД 10-34-0 містить 10% азоту і 34% фосфору. Взявши базове за основу, готують збалансовані розчини з різним вмістом азоту, фосфору і калію у відсотках: РКД 9-9-9, РКД 18-18-0, РКД 9-15-12, РКД 3-9-12.

Проте розчинність окремих елементів азоту, фосфору чи калію в таких збалансованих РКД є обмеженою і щоб усунути цей недолік виготовляють суспензії, в яких добрива є у нерозчиненому стані. Для дослідження корозійно-механічних властивостей сталей брали суспендовані добрива СРКД 15-15-15, СРКД 20-20-0, СРКД 15-10-20, СРКД 5-15-20.

2.5. Висновки до розділу

1. Вибір сталей для досліджень зумовлений необхідністю забезпечення міцності та довговічності сільськогосподарської техніки, що експлуатується в агресивних умовах. Використання доступних матеріалів, таких як Ст3, сталь 20, 35, 45, 30ХГСНА та аустенітна марганцевиста сталь 45Г17Ю3, дає змогу оцінити їхню придатність для машинобудування в умовах нестачі високолегованих матеріалів.

2. Для визначення стійкості конструкційних матеріалів до корозії застосовувалося оцінювання за зміною маси зразка, що є надійним способом вимірювання рівномірної корозії. Водночас для випадків нерівномірної корозії використовувалося вимірювання глибини корозійного проникнення, що дозволяє отримати точніші результати.

3. Використання зразків різної товщини, включаючи 2,5 мм для загальних досліджень та 6, 12, 20 мм для прикладних випробувань, дозволило моделювати реальні умови експлуатації деталей сільськогосподарських машин, що піддаються малоцикловим навантаженням. Це сприяє більш точному прогнозуванню їхньої поведінки в експлуатації.

4. Дослідження корозійно-втомного опору сталей проводились в контакті з різними добривами, такими як водний аміак, КАС, рідкі комплексні добрива та інші. Характеристики цих середовищ дозволяють оцінити їх вплив на сталі, що використовуються у сільськогосподарському машинобудуванні, і допомагають зрозуміти механізми корозійного впливу добрив на конструкційні матеріали.

Таким чином, застосована методика досліджень дозволяє комплексно оцінити придатність різних конструкційних сталей для роботи в агресивних умовах, що сприятиме обґрунтованому вибору матеріалів для виготовлення сільськогосподарської техніки, підвищуючи її надійність та довговічність.

3. МАЛОЦИКЛОВА КОРОЗІЙНА ВТОМА КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ З МЕТАЛІЗАЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ

3.1. Довговічність бездефектних зразків з металізаційними покриттями

Випробування зразків товщиною 2,5 мм на МЦВ проводили на установках ІІ-2. Поверхню зразків перед металізацією обробляли чавунним дробом марки ДЧК з розмірами частинок 0,8...1,2 мм дробоструминним апаратом АД-1. Покриття наносили електродуговим металізаційним апаратом ЕМ-14М. Вихідним матеріалом для нанесення служив алюмінієвий дріт марки СВА 5 діаметром 1,6 мм. Міцність зчеплення алюмінієвого покриття із сталлюю підкладкою ≈ 260 МПа.

Аналіз результатів показав (табл.3.1), що напилення гладких шліфованих зразків із сталі типу 12ХН3А (АК-32) знижує малоциклову довговічність в 1,5 - 1,7 рази, як на повітрі, так і в КАС.

В традиційних випробуваннях на малоциклову втому контакт середовища з металізаційними покриттями надто короткочасний: в цих дослідженнях він рівняється біля 10 год. Щоб у повній мірі проявити захисні властивості покриття, частину зразків витримували без навантажень в КАС 150 і 300 діб з наступним випробуванням на втому. Дані випробувань (табл.3.1) показують, що напилення при витримці протягом 150 діб знижує МЦВ, правда, менше ніж без витримки; довговічність напилених зразків після витримки 300 діб уже підвищується до 2 разів.

Візуальний огляд зразків показав, що на металізованих алюмінієм поверхнях спостерігається незначна кількість продуктів корозії алюмінієвого покриття (гідроокису алюмінію). За весь період випробувань будь-яких руйнувань алюмінієвого покриття, а також слідів корозії не спостерігалось. Зразки, які не мають алюмінієвого покриття, піддавалися інтенсивній корозії. Ці результати пов'язані зі швидкістю корозії:

швидкість корозії зразків без покриття $0,0420 \text{ г/м}^2\text{год}$, з покриттями вона складає $0,0034 \text{ г/м}^2\text{год}$.

Таблиця 3.1 - Результати досліджень зразків з металізаційними покриттями на МЦВ 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 (150 діб)	після попередньої корозії (300 діб)	без попередньої корозії	після попередньої корозії (150 діб)	після попередньої корозії (300 діб)
Шліфування (вихідний)	28688	17526	6799	20662	14633	5021
Шліфування+ обробка дробом+ металізація	18897	13377	13060	11835	10485	10153

Після видалення продуктів корозії були виявлені корозійні ураження у вигляді виразок, канавок і плям, особливо після витримок протягом 300 діб, які локалізують пластичну деформацію і є джерелом втомних тріщин (рис. 3.1, 3.2). Корозія обумовила різке збільшення мікронерівностей рельєфу зразків. Так, висота нерівностей (R_a) зразків, витриманих в КАС, протягом 300 діб досягла 65 мкм (вихідна - 0,15 мкм) (рис.3.3).

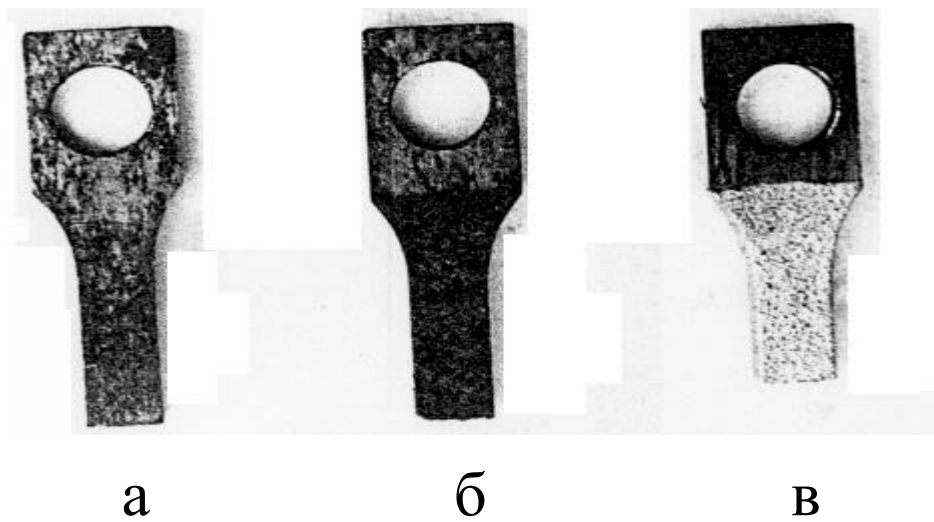


Рис. 3.1 - Загальний вигляд зразків після витримання в середовищі КАС протягом 6 місяців: а-вихідний зразок; б-після дробоструменевої обробки; в-напилений алюмінієм

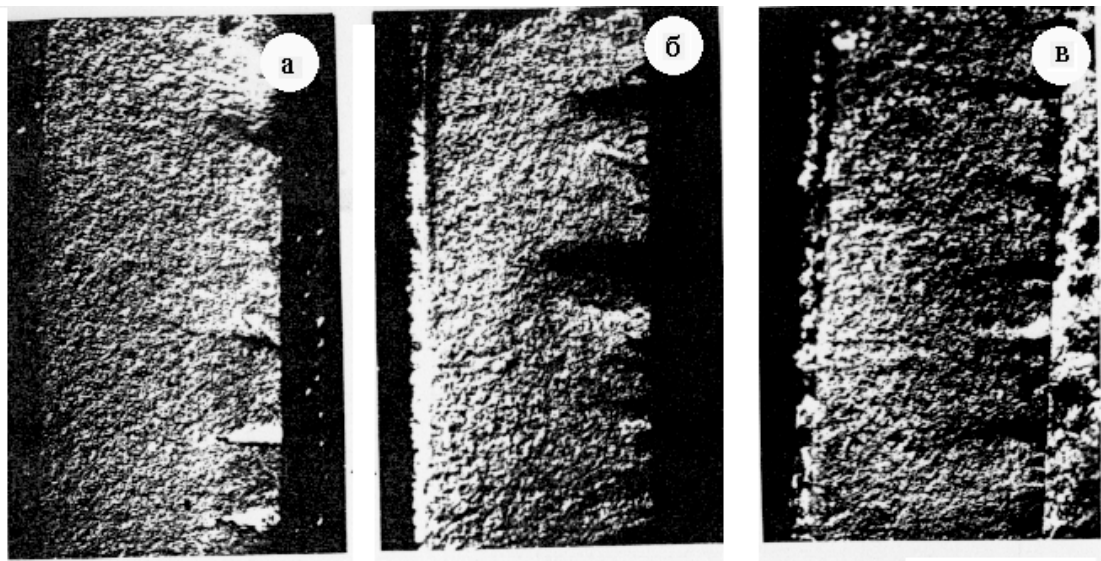


Рис. 3.2 - Зломи зразків на повітрі: а) без покриття і попередньої корозії; б) без покриття з попередньою корозією; в) з покриттям і попередньою корозією

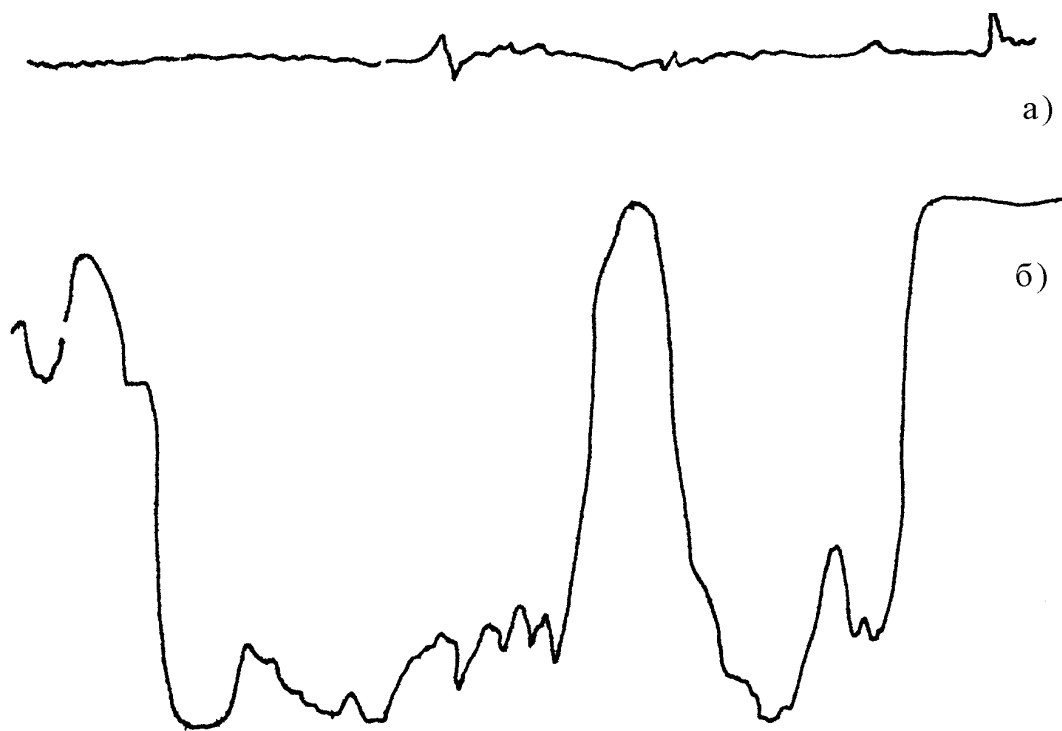


Рис. 3.3 - Профілограми поверхні зразків: а - вихідний зразок; б - після витримки в корозійному середовищі протягом 6 місяців

Таким чином, традиційні випробування на корозію втому конструкційних матеріалів з металізаційними покриттями є недостатньо об'єктивними. Більш правдивим є використання методики, яка передбачає попередню витримку зразків в середовищах з наступним їх випробуванням на втому. В цьому випадку чіткіше простежується позитивний вплив металізаційного покриття на витривалість сталі.

3.2. Довговічність напилених зразків із зварними з'єднаннями.

При вивченні впливу металізаційного покриття на опір втомі зварних з'єднань потрібно враховувати два випадки: 1) метал зварюють, а потім з'єднання покривають металізаційними покриттями; 2) для підвищення продуктивності процесу металізації його проводять прямо в металургійних прокатних цехах, а зварюють покриті листи. Тому, як впливає,

металізаційний алюмінієвий шар на подальшу працездатність зварної деталі є дуже важливим моментом.

Для першого випадку металізація зварних з'єднань приводить до підвищення корозійно-втомних характеристик зварних швів.

Для другого випадку випробовували плоскі стикові зварні зразки із сталі 09Г2 ($t=12$ мм) і 10ХСНД ($t=20$ мм), попередньо покриті алюмінієм різної товщини.

З аналізу результатів випробувань сталі 09Г2 (табл.3.2) видно, що зварювання листів з металізаційними покриттями товщиною 0,2 мм не знижує опір малоцикловій втомі. Відмічено, навіть, підвищення опору втомі особливо в корозійному середовищі в порівнянні із зварними зразками з листа без попередньої металізації. Таке підвищення в корозійному середовищі частково пояснюється зміною електрохімічного стану сталей з покриттями (табл.3.3).

Таблиця 3.2 - Механічні властивості зварного з'єднання сталі 09Г2, металізованої алюмінієм

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 - Стаціонарні електродні потенціали сталей 10ХСНД та 09Г2 і швидкість корозії з металізаційними алюмінієвими покриттями товщиною 0,3 мм

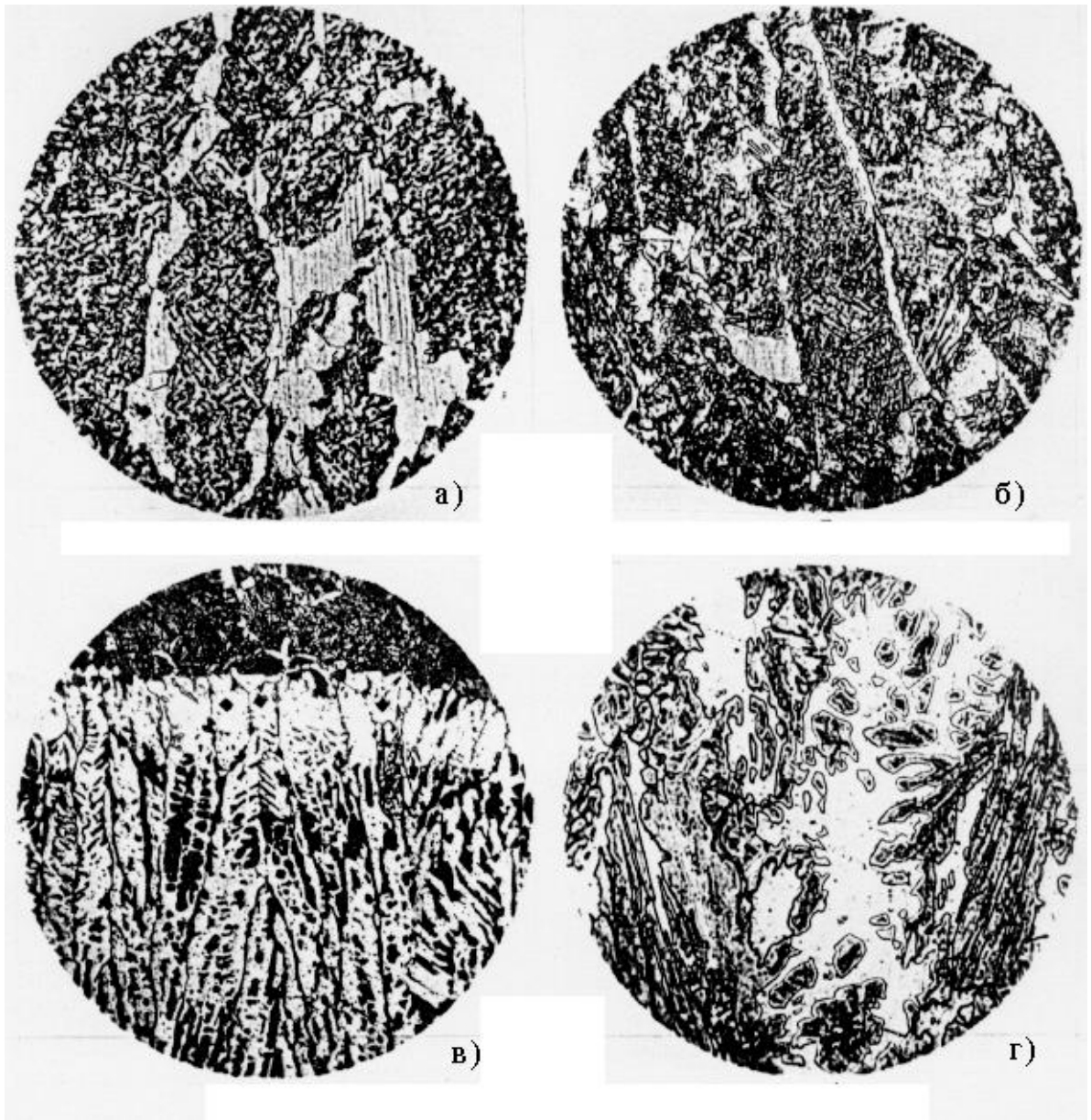
Стан зразка	Сталь 10ХСНД		Сталь 09Г2	
	Стаціонарний електродний потенціал, мВ	Швидкість корозії, г/м ² ·год	Стаціонарний електродний потенціал, мВ	Швидкість корозії, г/м ² ·год
Без покриття	- 450	0,0626	-440	0,0626
З покриттям, δ=0,3 мм	- 780	0,0028	-760	0,0016

Малоциклова довговічність зварних зразків (t=12 мм) із листа напиленого шаром товщиною 0,5 мм нижча за довговічність зразків із листів напилених шаром товщиною 0,2 мм, що вирогідно викликана підвищенням в зварному шві концентрації алюмінію (рис.3.4), який попадає в зону плавлення, а товщина листів невелика. Це підтвердили і механічні випробування, які показали, що механічні властивості зварних зразків із листів напилених (0,2 мм) залишаються на рівні властивостей основного металу, в цей час, як зварні зразки з листа напиленого (0,5 мм) знизили свої пластичні властивості і параметри ударної в'язкості.

Випробування на опір малоциклової корозійній втомі серії зварних зразків сталі 10ХСНД товщиною 20 мм показали, що зварювання напилених алюмінієм листів практично не змінює довговічності зразків у порівнянні із зразками, виготовленими з ненапилених листів (рис. 3.5). Руйнування всіх зварних зразків (як сталі 09Г2, так і 10ХСНД) проходить шляхом зародження і поширення втомної тріщини на лінії сплавлення.

Отже, при нанесенні металізаційного алюмінієвого покриття товщиною 0,2 мм на листи перед зварюванням малоциклова довговічність при випробуваннях в корозійному середовищі не знижується, а відмічене

підвищення пов'язане, як з електрохімічною захисною дією покриття, так і з більшою гетерогенністю властивостей переходу ЗТВ і основного металу через сприятливу попередню обробку листів дробом. Оптимальна товщина покриття повинна визначатися окремо в кожному випадку в залежності від товщини листів, які зварюються, технології підготовки кромки та зварювання.



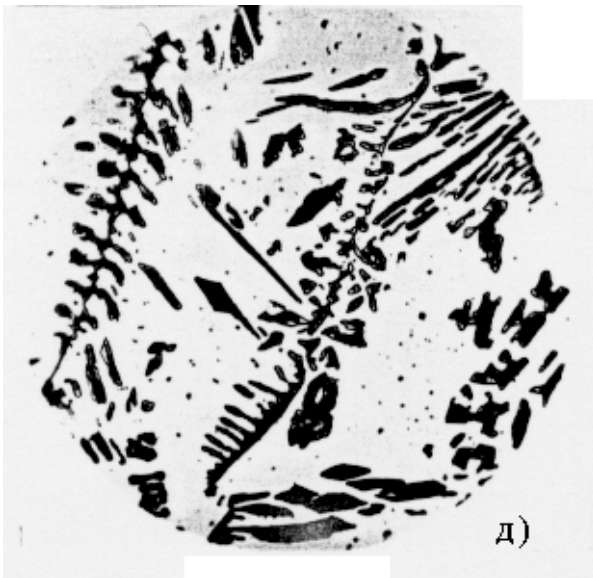


Рис. 3.4 - Структура металу шва зварних з'єднань із сталі типу 09Г2 (x300): а - неметалізована сталь; б - сталь, металізована алюмінієм товщиною 0,1 мм; в - сталь, металізована алюмінієм товщиною 0,2 мм; г - сталь, металізована алюмінієм товщиною 0,3 мм; д - сталь, металізована алюмінієм товщиною 0,5 мм.

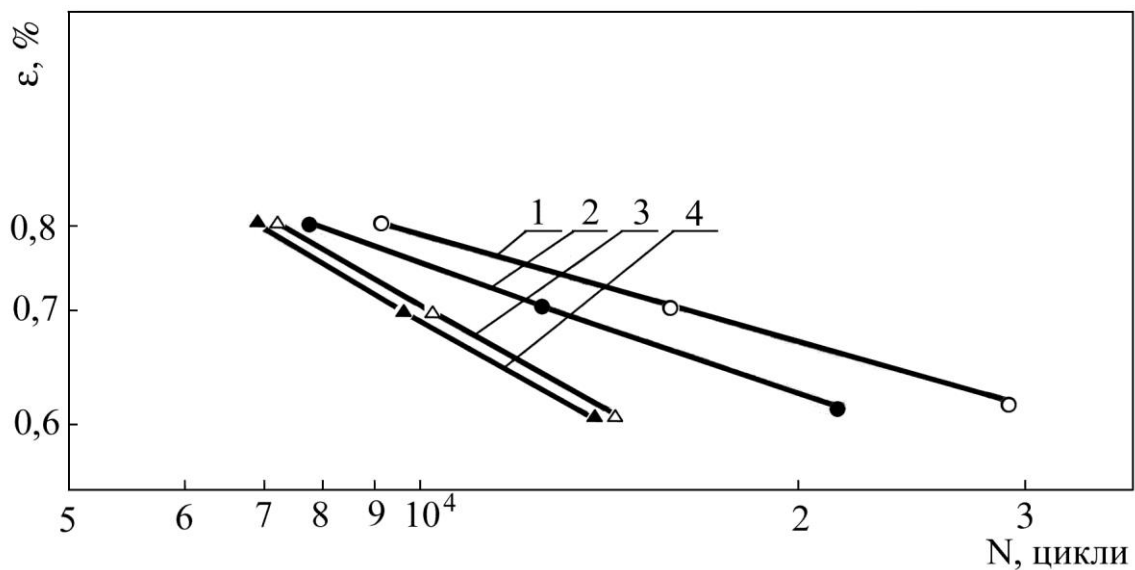


Рис. 3.5 - Криві МЦВ гладких зразків сталі 45Г17ЮЗ: 1 – вихідний (повітря); 2 – вихідний (КАС); 3 – дробоструминна обробка + напилення (повітря); 4 – дробоструминна обробка + напилення (КАС).

Думали, що ефект зниження малоциклової витривалості гладких шліфованих зразків викликаний раннім утворенням втомної тріщини в покритті. Приймали, що металізаційний шар є менш міцний, пористий, до того ж частинки напиленого металу в процесі свого польоту до металізованої

поверхні окислюються і обволікаються шаром окисленого металу, що створює в покритті тонку проміжну зону крихких інтерметалідних з'єднань, тому втомна тріщина повинна утворюватися в цьому шарі і тим самим, створюючи локалізовану концентрацію напружень в основному металі, знижує втомну витривалість. Проте, алюмінієве покриття є досить пластичним і, як показали дослідження, зародження втомної тріщини як на повітрі, так і в корозійному середовищі починається з-під металізаційного шару (рис.3.6). Тому зниження довговічності зразків пов'язане з поверхневим шаром підкладки.

Таблиця 3.4 - Результати випробувань зразків товщиною 2,5 мм із сталі АК-29 на малоциклову втому

Тип зразків та покриття	Відносна деформація, %	Витривалість, тис. циклів до руйнування	
		повітря	КАС
Без покриття	0,5	35,3	17,4
Покриття цинком		17,0	10,9
Покриття алюмінієм		13,8	7,7
Без покриття	0,75	6,7	5,1
Покриття цинком		4,0	2,6
Покриття алюмінієм		3,5	2,2
Без покриття	1,63	0,830	0,713
Покриття цинком		0,530	0,375
Покриття алюмінієм		0,460	0,300

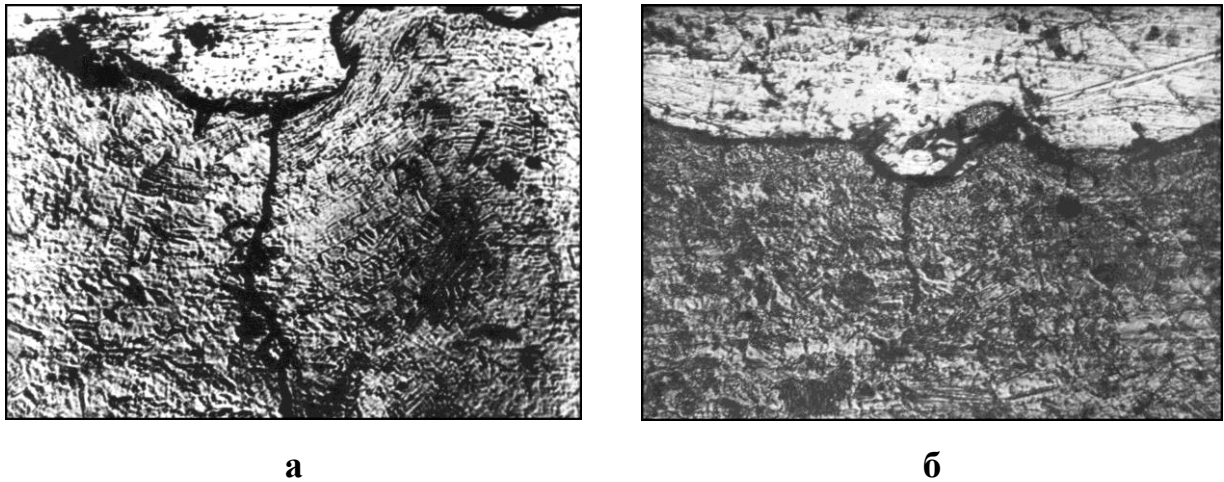


Рис. 3.6 - Втомна тріщина, яка виникає під металізаційним покриттям. Випробування зразків сталі 45Г17ЮЗ товщиною 5 мм при $\varepsilon=0,8\%$: а) на повітрі; б) у корозійному середовищі, x400

Таким чином, на основі проведених досліджень, можна зробити висновок, – використання металізаційного покриття на гладких шліфованих бездефектних поверхнях зразків є невиправданим, і в таких випадках слід використовувати технології покриття, які не погіршують якість поверхневих шарів підкладки. Що стосується впливу металізаційних напилень на звичайну втому, тобто багатоциклову, нами був отриманий позитивний ефект. На рахунок впливу металізаційного покриття на малоциклову втому були проведені додаткові випробування за іншою методикою.

3.3. Витривалість напилених зразків з різними технологічними і конструктивними дефектами.

Досліджували на малоциклову втому гладкі зразки товщиною 5 мм сталі 45Г17ЮЗ, зразки цієї ж партії з напавкою, яка імітує термічний цикл зварювання та надрізом з металізаційним алюмінієвим напиленням [10].

Аналізуючи результати (рис.3.7) видно, що при металізації поверхонь з дефектами типу концентраторів напружень, зварних швів та ін., коли негативні ефекти від обробки гострокутним дробом нівелюються впливом самих дефектів, а позитивні сторони обробки (створення стискаючих

залишкових напружень і підвищення твердості) дозволяють підвищити малоциклову втому. Аналогічні результати отримані на зразках сталі 45Г17ЮЗ товщиною 6мм з поверхнею після вальцювання – витривалість напильних зразків при деформації $\varepsilon=0,5\%$ у корозійному середовищі підвищилася з 14,4 до 19,3 тис. циклів. Зразки сталі АК-29 товщиною 25 мм з привареною втулкою (імітація приварених конструктивних елементів) після напильня підвищили малоциклову витривалість в корозійному середовищі на 30%.

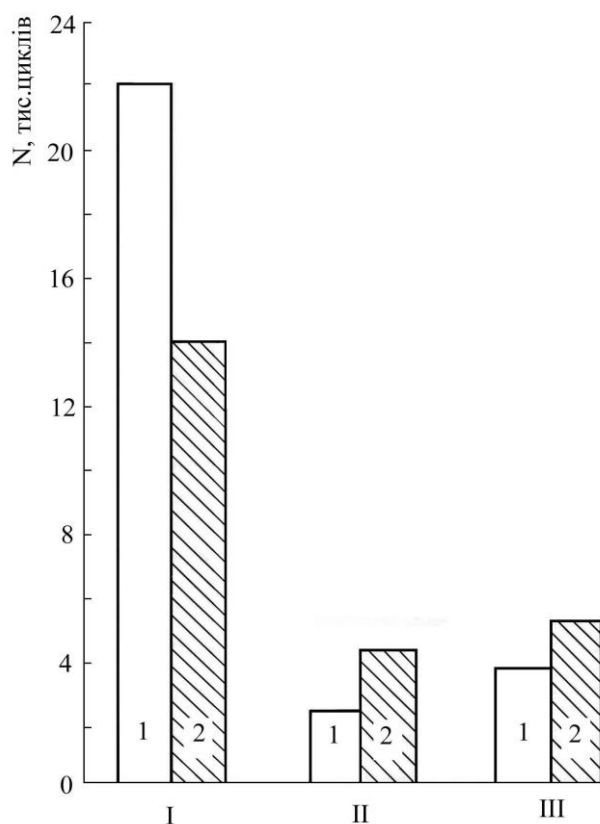


Рис. 3.7 - Малоциклова витривалість зразків сталі 45Г17ЮЗ товщиною 5 мм без покриття (1) і з алюмінієвим металізаційним покриттям (2) у корозійному середовищі при циклічній деформації $\varepsilon=0,6\%$: I - зразки гладкі шліфовані; II - наплавлені; III - з надрізом .

Як видно із результатів випробувань, швидкість корозії зразків з алюмінієвими покриттями на порядок нижча від аналогічних незахищених зразків, а опір сталі корозійному розтріскуванню в багато разів вищий.

Таким чином, при пружно-пластичному деформуванні в корозійному середовищі використання алюмінієвого металізаційного покриття сталевих виробів, які мають різні технологічні і конструктивні концентратори напружень є ефективним.

Отже, при нанесенні металізаційного алюмінієвого покриття товщиною 0,2мм на листи перед зварюванням, малоциклова витривалість при випробуваннях у корозійному середовищі не знижується, а відмічене підвищення пов'язане, як з електрохімічною захисною дією покриття, так і з більшою гетерогенністю властивостей переходу ЗТВ і основного металу через сприятливу попередню обробку листів дробом. Оптимальна товщина покриття повинна визначатися у кожному окремому випадку в залежності від товщини листів, які зварюються, технології підготовки кромки та зварювання.

Одним із ефективних і перспективних способів захисту металу від корозії і корозійно-механічного руйнування є введення в корозійне середовище невеликих кількостей домішок спеціальних речовин, так званих інгібіторів корозії, які знаходять все більш широке використання на практиці. Як інгібітори корозії використовуються декілька тисяч різних хімічних речовин і їх сумішей. Проте багато ефективних інгібіторів корозії, які випускаються промисловістю, здатні гальмувати корозійні процеси в статичних умовах, тобто загальну корозію металу без навантаження. Тому одним із завдань було створення інгібіторів для гальмування корозійно-механічного руйнування. Інгібітори корозійно-механічного руйнування повинні задовільняти такі вимоги: забезпечувати високу ефективність при порівняно невеликих концентраціях, запобігати не тільки розчиненню, але і наводненню металу; гальмувати як утворення, так і поширення тріщин, що особливо важливо в наводнювальних середовищах, які сприяють виникненню пітінгів, що служать зародками корозійно-механічних тріщин; створювати міцні адсорбційні чи фазові плівки; зберігати ефективність в потрібному температурному інтервалі; не руйнуватися при довготривалому використанні; бути технологічними у використанні; розроблятися на основі доступної і дешевої сировини; відповідати санітарно-гігієнічним вимогам. Для створення інгібіторів корозійно-механічного руйнування крім вищеописаних основних вимог, необхідні всесторонні дослідження, які

найбільш точно враховують умови експлуатації (температуру, тиск, навантаження, можливості наводнення, пасивацію металу та ін.). Особливі вимоги до інгібіторів при навантаженні вище границі пружності (малоциклова втома), коли значно інтенсифікуються такі процеси, як корозія, руйнування пасиваційних плівок та ін. Враховуючи всі ці рекомендації нами були створені наступні інгібітори: А – "Інгібітор малоциклової корозійної втоми і водневого окрихчення" А.с. № 603244 (бензолсульфонат 2,4 – діалкілфеніл – полі (етилендіоксі) метил діетилметиламонія); Б – "Інгібітор малоциклової корозійної втоми сталі" А.с. № 629781 (тетраціаномолибдат (о) калія); В – "Інгібітор малоциклової корозійної втоми сталі" А.с. № 623404 (гексаціанарутенат (II) калія); Г – "Інгібітор малоциклової корозійної втоми сталі" А.с. № 622297 (прівітій сополімер метілакрилата з нітролігніном).

Нові розробки в області піско- і дробоструминної очистки поверхні металів перед нанесенням покриття показують ефективність "мокрої обробки". Обробка металу виконується абразивними частинками в струмені прісної води під невеликим тиском $8,27 \cdot 10^5$ Па. При виконанні мокрої дробоструминної обробки не вимагається заводити судна в сухі доки. Ще однією перевагою цього методу є можливість видалення з поверхні металу корозійно-агресивних солей, наприклад хлоридів, у тому числі і із глибини існуючих на листі виразок і пітингів.

З огляду на сказане, були використані наші розроблені інгібітори корозії, які вводилися в абразиви, що транспортувалися водним середовищем. У результаті чого підвищилася малоциклова витривалість сталі 45Г17Ю3 обробленою інгібіторами корозії перед металізаційним напиленням.

Цікаво, що з ростом амплітуди напружень захисні властивості інгібіторів збільшуються і при достатньо високих напруженнях інгібітор не тільки усуває агресивну дію середовища, але і зміцнює сталь. Тому при високих рівнях напружень витривалість зразків у корозійних середовищах навіть вища, ніж на повітрі.

Отримані дані можна пояснити тим, що з ростом амплітуди циклічної деформації внаслідок зсувних процесів стається сильна активація поверхневих шарів металу. Це приводить до взаємодії інгібітора з поверхневими шарами металу, з утворенням хімічних сполук (плівок), які мають зміцнювальну дію. З іншого боку можлива дифузія окремих складових частин інгібіторів у тонкі поверхневі шари металу, особливо на ювенильних поверхнях, що веде до зміни структури металу і покращання його фізико-хімічного стану. Дія двох факторів підсилюється з ростом амплітуди циклічної деформації, що обумовлює зростання опору металів корозійно-втомному руйнуванню.

Захисна дія інгібіторів при корозійній втомі пояснюється тим, що підвищуючи перенапруження анодної і катодної поєднаної реакцій вони гальмують виникнення корозійних пітингів, які є зародками корозійно-механічних тріщин. До вершини виникнення тріщин великі органічні гідратовані молекули потрапити не в стані. З цієї причини ефект адсорбційного розміщення не проявляється.

Захисні властивості інгібіторів в умовах корозійно-механічного руйнування залежать не тільки від їх здатності гальмувати анодні реакції, тобто реакції розчинення металу, але і від здатності гальмувати процес наводнення. Це слід враховувати при роботі в середовищах з низьким значенням рН, тобто в кислих середовищах різної концентрації, де поряд з корозійно-механічним фактором – електрохімічної локальної корозії, активованої механічними напруженнями не менш важливу роль відіграє водневе окрихчення.

3.4. Малоциклова втома двошарової конструкційної сталі марки КД2 (10ХСНД + Х18Н10Т)

Вузли машин і механізмів при експлуатації піддаються дії агресивних середовищ, що призводить до їх корозійних руйнувань. Найбільш інтенсивної корозії зазнають корпусні вузли, особливо на лінії стику середовищ. Інтенсивність (глибина) корозії в цій частині може досягти 0,3...0,5 мм у рік.

У зануреній частині в агресивне середовище теж має місце інтенсивна корозія, головним чином щілинна.

Корозія внутрішніх поверхонь місткостей, де може міститися агресивні середовища є також значною.

Боротьба з корозією займає значне місце при експлуатації різних машин і механізмів. В окремих машинах є важкодоступні, а інколи зовсім недоступні місця, які неможливо систематично оглядати і де важко відновлювати лакофарбні покриття. У цих місцях їх необхідно надійно захищати від корозії на весь період експлуатації.

Використання конструкційних сталей загального призначення для роботи в активних робочих середовищах (добрива, пестициди) є проблематичним, бо витривалість таких сталей у 3...7 разів знижується.

Використання корозійностійких металів, наприклад, нержавіючих сталей, обмежено такими причинами. Найкраще відповідають роботі сталі аустенітного класу, які вміщують 16-20% хрому, 8-15% нікелю, 0,5-1,0% титану а іноді до 3% молібдену. Однак ці сталі мають два серйозні недоліки: дороговизна (високий вміст дефіцитного нікелю, а іноді і молібдену, зварювання також повинне проводитися присадним матеріалом, який вміщує не менше 15% нікелю) і понижена міцність. Границя текучості вказаних сталей складає 200-220 МПа, границя міцності – 550-580 МПа. Конструкційні сталі, які зараз використовуються у машинобудуванні мають границю текучості 300-450 МПа, тому заміна на низькоміцні аустенітні нержавіючі сталі викличе значне підвищення ваги машин і різних конструкцій, що недопустимо.

Єдиним матеріалом, який поєднує високу корозійну стійкість з достатньою міцністю є плакована сталь, яка представляє собою конструкційну сталь, покриту з одного чи з двох сторін нержавіючою сталлю чи будь яким іншим корозійностійким металом (мідь, нікель, титан, алюміній чи їх сплавами). Необхідна корозійна стійкість досягається підбором відповідного плакувального шару, а міцність – підбором марки сталі для основного шару. Плакована сталь може розглядатися як єдиний в сучасних умовах метал, здатний забезпечувати потрібну корозійну стійкість поверхневого шару і загальну міцність.

Таким чином, поєднання високоміцних недефіцитних вуглецевих і високопластичних агресивно-стійких сталей і сплавів дозволяє створити дешеві і високонадійні конструкційні матеріали. Вивчали втому листової двошарової сталі КД2 плакованої вальцюванням і співставляли з малоцикловою втомою сталі основного шару (10ХГСНД) і сталі плакованого шару (Х18Н10Т). Зразки для випробувань з робочим перерізом 6 x 30 мм вирізувалися з листів товщиною 6 мм. При виготовленні зразків їхня поверхня більше не оброблялася. Товщина плакованого шару в зразках із двошарової сталі склала 1,2; 1,8 та 2,5 мм.

Механічні характеристики сталей та біметалу:

10ХГСНД ($\sigma_T=490$ МПа, $\sigma_B=670$ МПа, $\delta, \%=240$ МПа)

КД2(t=1,2) ($\sigma_T=500$ МПа, $\sigma_B=680$ МПа, $\delta, \%=230$ МПа)

КД2(t=1,8) ($\sigma_T=450$ МПа, $\sigma_B=600$ МПа, $\delta, \%=270$ МПа)

КД2(t=2,5) ($\sigma_T=460$ МПа, $\sigma_B=600$ МПа, $\delta, \%=230$ МПа)

Х18Н10Т ($\sigma_T=290$ МПа, $\sigma_B=550$ МПа, $\delta, \%=550$ МПа).

Ударна в'язкість, кгм/см² при +20°C (надріз по основному металу – 17,8, надріз по плакованому шару – 19,5) при –40°C (надріз по основному металу – 12,4, надріз по плакованому шару – 15,8).

Мікроструктура двошарової сталі (рис.3.8): основний шар (перлітно-феритна, ферит рівномірно розподілений); плакований шар (крупні рівноосні зерна аустеніту); перехідна зона зі сторони основного шару (феритно-

перлітна рівноосна структура шириною до 0,2 мм) і перехідна зона зі сторони плакованого шару (зерна аустеніту середніх розмірів, ледь витягнутих, величина зони до 0,15 мм).

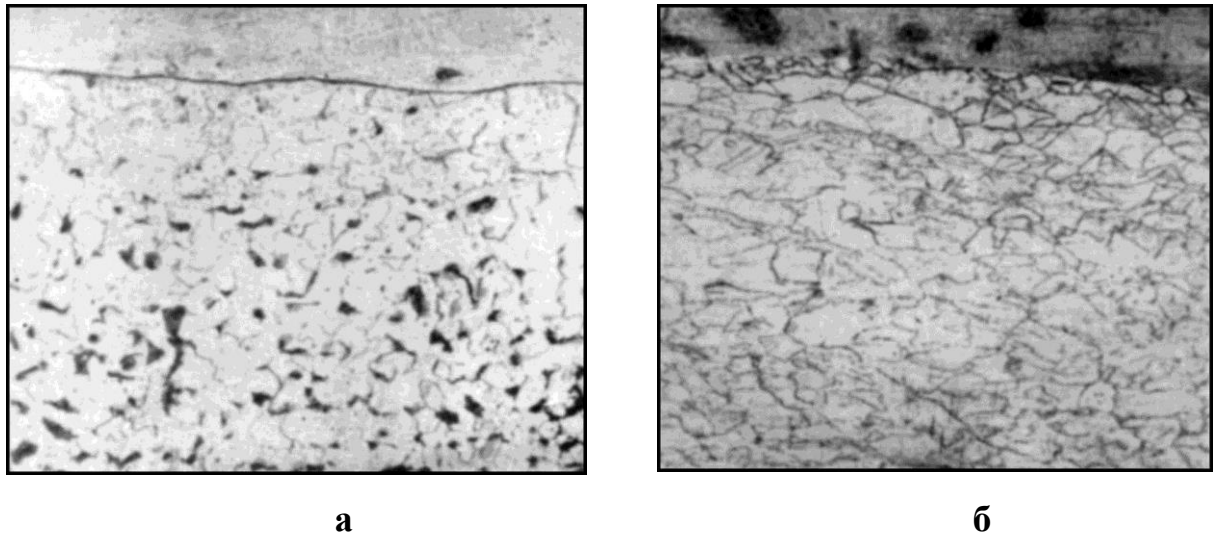


Рис. 3.8 - Мікроструктура двошарової сталі: x300

а – мікроструктура основного шару сталі в зоні, яка прилягає до границі плакованого шару;

б – мікроструктура плакованого шару в зоні, яка прилягає до границі основного металу.

У всіх випадках при випробуванні шляхом згину зразок розтягували зі сторони плакованого шару.

У зразках з плакованої сталі КД2, які передбачені для випробувань в корозійному середовищі, з метою виключення протектування плакованого шару сталлю основного шару, плоскі і торцеві поверхні замальовували спеціальною фарбою. Зразки з гомогенної сталі марок 10ХГСНД і Х18Н10Т піддавали дії корозійного середовища зі всіх сторін.

Аналіз випробувань зразків на повітрі (рис.3.9а) показує, що в області деформацій ($\varepsilon=0,6 - 1,0\%$) максимальну витривалість має корозійна високопластична сталь Х18Н10Т. Із зниженням величини деформації співвідношення витривалості досліджуваних сталей змінюється і при деформації приблизно дорівнює 0,57% криві малоциклової втоми для сталей КД2 і Х18Н10Т пересікаються. Подальше зниження деформації обумовлює

перевагу двошарової сталі КД2. Дослідження малоциклової втоми в корозійному середовищі дають якісно аналогічну картину (рис.3.9б).

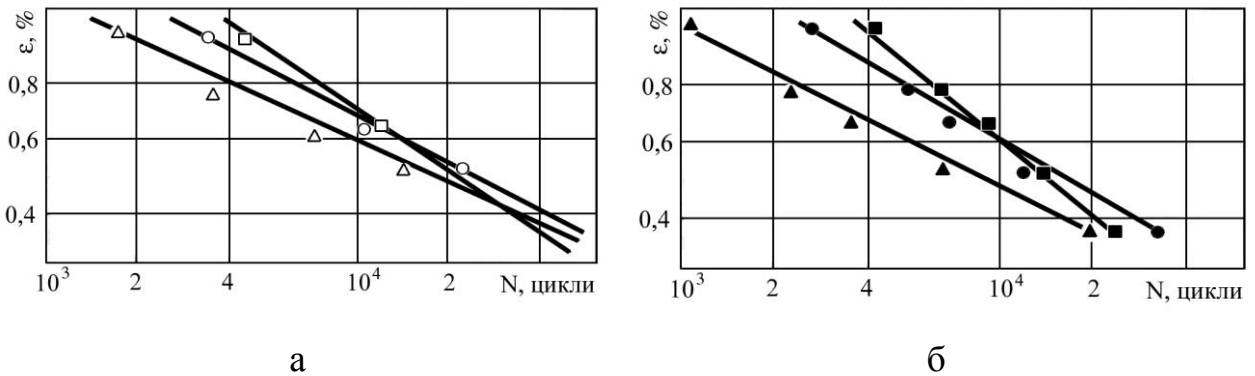


Рис. 3.9 - Малоциклова витривалість сталей 10XГСНД (Δ), КД2 (\circ) і Х18Н10Т (\square) на повітрі (а) і в корозійному середовищі (б).

Наявність корозійного середовища (КАС) при малоциклових випробуваннях знижує витривалість всіх сталей, проте для різних сталей по-різному. Очевидно, що в корозійному середовищі максимально зменшилася втома сталі 10XГСНД, а мінімально - втома нержавіючої сталі Х18Н10Т. Це видно з величини коефіцієнта впливу середовища (рис.3.10).

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

де $N_{\text{пов.}}$ – витривалість на повітрі;

$N_{\text{сер.}}$ – витривалість в корозійному середовищі.

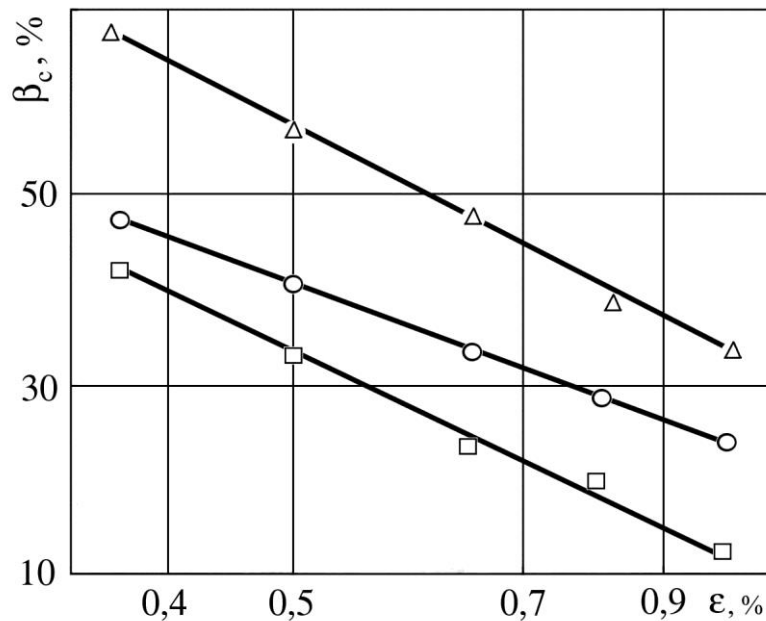


Рис. 3.10 -
Залежність коефіцієнта впливу середовища від амплітуди циклічної деформації для сталей 10ХГСНД (Δ), КД2 (\circ) і Х18Н10Т (\square).

Що стосується плакованої сталі, то її показники несуттєво (на 3-9%) відрізняються від показників нержавіючої сталі, тим самим підтверджуючи доцільність використання цієї сталі як корпусного матеріалу для експлуатації в корозійному середовищі.

Очевидно, що використання плакованої сталі більш вигідне при малоцикловій втомі в корозійному середовищі, а не на повітрі (рис.3.11). Особливий інтерес представляє факт підвищення переваги плакованої сталі із збільшенням амплітуди циклічної деформації, про що свідчить величина коефіцієнта плакування, вирахованого за формулою:

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

де $N_{\text{пл.}}$ – витривалість плакованої сталі;

$N_{\text{осн.}}$ – витривалість основи.

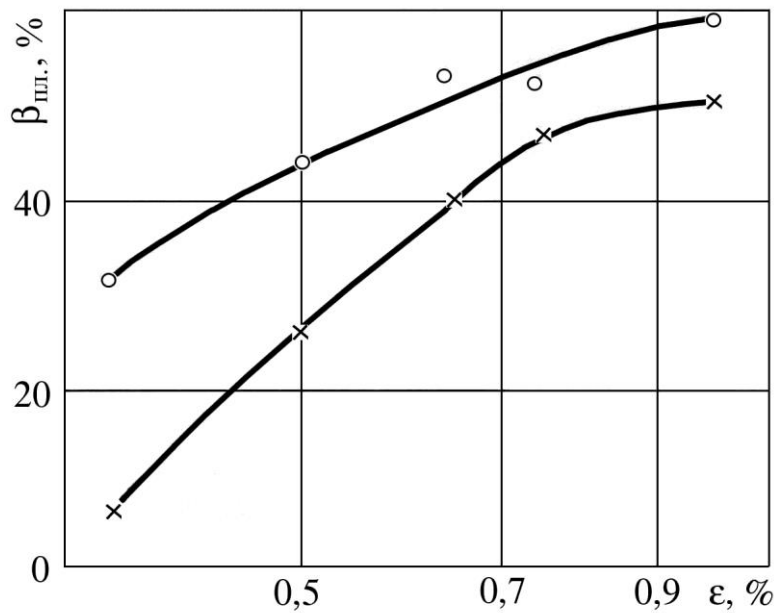


Рис.3.11 -
Залежність коефіцієнта
плакування від
амплітуди циклічної
деформації на повітрі
(X) і в корозійному
середовищі (O).

При великих пружно-пластичних циклічних деформаціях, де вирішальним фактором стає рівень пластичності металу, найкращий опір втомі має найбільш пластична із всіх випробуваних сталь X18H10T, найгірші показники у сталі 10XГСНД з мінімальними показниками пластичності.

Із зменшенням рівня напружень(деформацій) перевага сталі X18H10T перед іншими сталями зменшується, а показники втомі сталі 10XГСНД, наближаються до аналогічних показників інших сталей. При деформації $\epsilon = 0,37\%$ показники сталі X18H10T стають вже найгіршими.

У проміжних умовах перевагу будуть мати двошарові сталі. Більше того, товщина плакованого шару стає дуже важливим показником, який має вплив на криві статичного згину і на малоциклову втому (рис.3.12 - 3.13). Коли експлуатація обшивки буде здійснюватися за наявності суттєвих перевантажень (тобто більших за величину деформації 0,6%), тоді вигідно використовувати двошарову сталь з більшою товщиною плакованого шару.

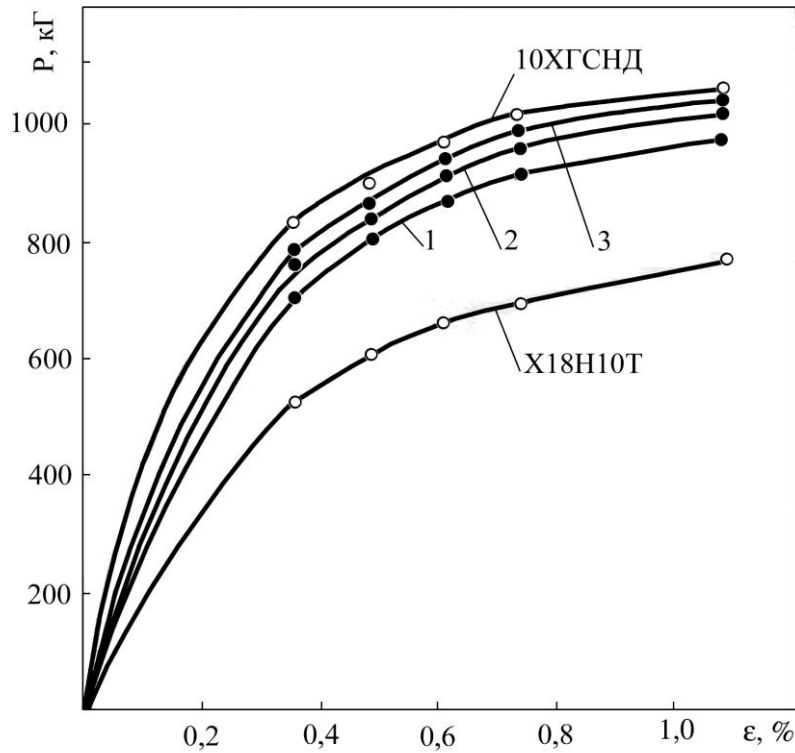


Рис. 3.12 - Криві статичного згину зразків сталі 10ХГСНД, Х18Н10Т та 1 - КД (товщ. шару 1,2 мм); 2 - КД (1,8 мм); 3 - КД (2,5 мм).

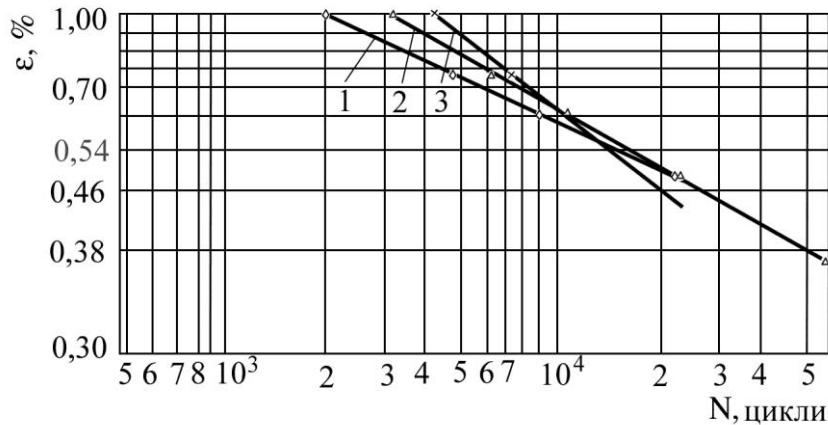


Рис. 3.13 - Криві втоми сталі КД-2 1,2(1); 1,8(2); 2,5(3)мм; N, цикли на повітрі при випробуваннях на малоциклову втому.

Спостерігається добра кореляція показників витривалості з показниками пластичності δ , інтегральним критерієм $\sigma_B \cdot \delta \psi^2 / 1 - \psi$, а також з величиною, оберненою межі міцності σ_B (тобто обернена пропорційна залежність від σ_B) (рис.3.14).

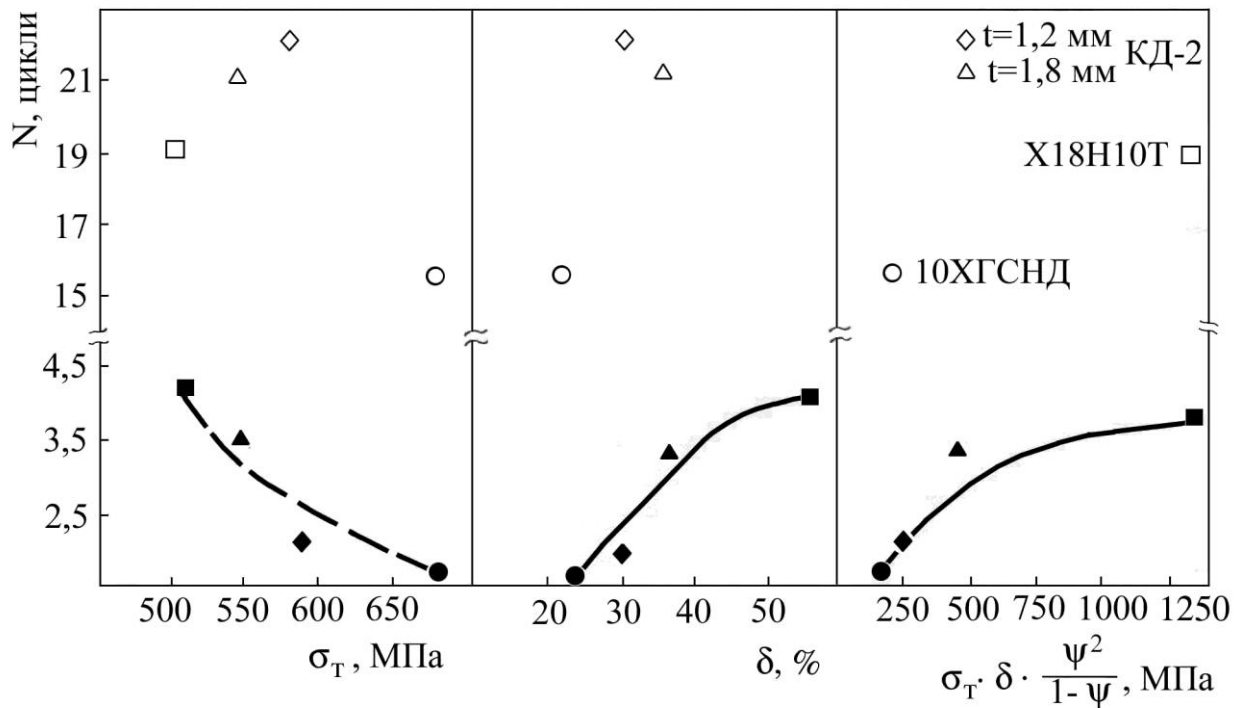


Рис. 3.14 - Залежність малоциклової витривалості на повітрі досліджуваних сталей при відносній деформації 1,0% від показників міцності і пластичності, отриманих при дослідженнях на розтяг.

Концентратор напружень у вигляді надрізу знижує малоциклову витривалість досліджуваних сталей в 1,7-4,7 рази, тобто доволі суттєво. Максимальний вплив надрізу в сталі X18H10T при низьких у сталі 10ХГСНД і КД при високих деформаціях. Коефіцієнт впливу концентрації напружень у сталі КД-2 менший аналогічних показників сталі 10ХГСНД у рідких добрив.

3.5. Висновки до розділу

1. Алюмінієві металізаційні покриття демонструють високу корозійну стійкість у корозійних середовищах (наприклад, КАС). Випробування показали, що зразки з покриттям мають знижену швидкість корозії в порівнянні з незахищеними зразками, що значно підвищує їх довговічність у корозійних умовах. Зразки без покриття швидко піддаються корозії, що призводить до появи тріщин і зменшення витривалості.

2. Металізаційне покриття алюмінієм товщиною 0,2 мм зберігає витривалість зварних зразків в умовах корозійної втоми. Оптимальна товщина покриття залежить від умов експлуатації та товщини зварюваних листів. Для зварних з'єднань попереднє напилення забезпечує кращі антикорозійні та антивтомні властивості.

3. Металізаційне покриття на зразках з дефектами (концентраторами напружень) є ефективним для захисту від корозійно-механічного руйнування, збільшуючи витривалість у порівнянні з незахищеними зразками. Результати підтверджують, що при корозійній втомі покриття діє як бар'єр, що захищає від появи тріщин.

4. Двошарова сталь (КД2), плакована корозійностійким шаром, показує високу корозійну стійкість і механічну міцність. У порівнянні зі звичайною сталлю, двошарова сталь ефективніша в умовах корозійного середовища при високих циклічних навантаженнях. Плакована сталь є перспективним матеріалом для корпусних вузлів, які піддаються дії агресивних середовищ.

Отже, нанесення металізаційних покриттів на конструкційні сталі є ефективними методами підвищення довговічності сталей в агресивних умовах, а двошарова сталь КД2 є надійним матеріалом для роботи у корозійних середовищах завдяки високій стійкості до корозійно-механічного руйнування.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ І ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ

4.1. Вплив втоми конструкційних сталей на безпеку працівників та навколишнє середовище

Проведені дослідження втоми конструкційних сталей, що використовуються в машинах для внесення добрив і пестицидів, підтвердили необхідність суворого контролю за станом обладнання, особливо за наявності антикорозійного покриття. Зношення та втома конструкційних матеріалів підвищують ризик механічних пошкоджень під час експлуатації, що може призвести до неконтрольованого викиду хімічних речовин, небезпечних для працівників і населення.

Використання антикорозійних покриттів значно підвищує стійкість обладнання до агресивного впливу хімічних речовин, однак необхідно враховувати вплив покриттів на міцнісні характеристики сталей. Недотримання вимог щодо товщини і якості покриття може призвести до передчасного зносу, що підвищує небезпеку руйнування обладнання в процесі роботи. Отже, регулярна перевірка покриттів є ключовим заходом для запобігання аварійним ситуаціям.

Обслуговування обладнання для внесення добрив і пестицидів має проводитися з дотриманням високих стандартів безпеки. Працівники повинні проходити спеціалізоване навчання щодо методів роботи з антикорозійними покриттями та оцінки втоми конструкційних матеріалів. При ремонті або технічному обслуговуванні необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту, включаючи респіратори, рукавиці та захисний одяг, щоб уникнути можливого контакту з агресивними речовинами.

Для запобігання викиду небезпечних речовин важливо забезпечити постійний контроль за станом машин для внесення добрив і пестицидів, адже будь-яке руйнування внаслідок втоми матеріалу може спричинити витік небезпечних речовин. Це становить ризик для навколишнього середовища, оскільки добрива і пестициди можуть негативно

впливати на ґрунти, воду та повітря. Запобігання забрудненню передбачає регулярне технічне обслуговування, своєчасну заміну зношених компонентів і використання антикорозійних покриттів, що відповідають встановленим екологічним вимогам.

Щодо організаційних заходів для підвищення рівня безпеки, організації, що займаються виробництвом, обслуговуванням та експлуатацією машин для внесення добрив і пестицидів, повинні розробити внутрішні інструкції з охорони праці [17]. Це включає правила поведінки з обладнанням, що має антикорозійне покриття, проведення регулярних технічних перевірок, а також запровадження індивідуальних засобів захисту для працівників. Крім того, важливо встановити системи моніторингу, які дозволяють оперативно оцінювати рівень зношення матеріалів і приймати рішення щодо їхньої заміни.

4.2. Екологічні аспекти використання антикорозійних покриттів

Антикорозійні покриття відіграють значну роль у забезпеченні тривалої експлуатації обладнання в умовах агресивного середовища, однак під час зношення вони можуть виділяти в навколишнє середовище шкідливі компоненти. Тому, важливо ретельно обирати види покриттів, що мають мінімальний вплив на природу, та передбачати їхню утилізацію згідно з екологічними нормами.

Для забезпечення безпечної експлуатації машин внесення добрив і пестицидів рекомендується здійснювати постійний моніторинг стану антикорозійних покриттів та конструкційних сталей. Дослідження втомі матеріалів є важливим етапом для запобігання поломкам, а також для зниження ризиків, пов'язаних з отруєнням та забрудненням. Регулярне проведення інспекцій та впровадження новітніх матеріалів з підвищеними антикорозійними властивостями дозволять підвищити рівень безпеки працівників та захистити навколишнє середовище.

4.3. Висновки до розділу

1. Робота із засобами хімізації сільського господарства вимагає чіткого дотримання заходів безпеки, адже вона пов'язана з численними травмонебезпечними ситуаціями.

2. Розробка та дотримання структурно-функціонального аналізу технологічного процесу, що включає завантаження, транспортування, перевантаження та внесення мінеральних добрив, дає змогу виявити основні фактори ризику, серед яких технічні несправності обладнання, наявність сторонніх осіб у зоні роботи та порушення правил експлуатації.

3. Також важливим є регулярний технічний огляд та обслуговування техніки, що використовується при внесенні добрив. У випадку виявлення несправностей негайно вживаються заходи для їх усунення, що дозволяє уникнути аварійних ситуацій та знизити ризик травмування працівників. Зокрема, під час зчеплення причепів або навісних машин до трактора необхідно дотримуватися координації дій та уникати наявності сторонніх осіб поблизу.

4. Впровадження медичного огляду працівників та інструктажу з надання першої допомоги у випадках отруєнь хімічними речовинами сприяє підвищенню рівня безпеки та охорони праці. Таким чином, комплексний підхід до охорони праці знижує ризик нещасних випадків та забезпечує збереження здоров'я працівників у процесі виконання робіт із внесення добрив.

5. Цей розділ підсумовує ключові аспекти охорони праці та захисту населення для роботи з конструкційними сталлями з антикорозійними покриттями у сільськогосподарській техніці.

5. АСПЕКТИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТЬ СТАЛІ

Економічна ефективність антикорозійних покриттів сталі при малоциклових навантаженнях є актуальною темою, особливо для галузей, де металева техніка та обладнання піддаються частим циклам навантаження, що спричиняє корозію і знижує термін служби конструкцій.

Антикорозійні покриття захищають метал від агресивного середовища та знижують рівень зносу поверхні. Це дозволяє значно зменшити частоту ремонтів і витрати на підтримку обладнання в робочому стані, а це сприятиме зниженню витрат на обслуговування та ремонт.

Покриття, які захищають сталь від корозії, дозволяють продовжити термін експлуатації конструкцій і обладнання, що знижує потребу у частій заміні техніки. Це призводить до зниження капітальних витрат на закупівлю нових матеріалів або техніки і продовжить експлуатаційний термін обладнання.

Захист металевих поверхонь допомагає уникнути позапланових зупинок виробництва, викликаних корозійними пошкодженнями. Це важливо, оскільки зупинка виробництва, пов'язана з ремонтом обладнання, може завдати значних збитків.

У промислових умовах, де малоциклові навантаження є частим явищем, антикорозійне покриття дозволяє забезпечити стабільнішу роботу техніки. Це сприяє підвищенню продуктивності та надійності, а також зменшенню витрат, пов'язаних із непередбачуваними поломками. Підвищить продуктивність та надійність.

Вибір і використання оптимальних антикорозійних матеріалів сприятиме економічним вигодам. Інвестиції в ефективні антикорозійні покриття можуть окупитися завдяки значній економії на ремонті та заміні обладнання. Оптимальні матеріали дозволяють зменшити витрати на

покриття та забезпечити тривалу службу сталі при малоциклових навантаженнях.

Отже, використання антикорозійних покриттів при малоциклових навантаженнях є економічно доцільним рішенням, що сприяє зниженню загальних витрат, підвищенню надійності та довговічності сталевих конструкцій.

5.1. Висновки до розділу

Застосування антикорозійних покриттів для сталі, особливо в умовах малоциклових навантажень, є економічно обґрунтованим рішенням, що забезпечує низку переваг для промислових галузей. Антикорозійні покриття знижують рівень зносу та захищають метал від агресивних середовищ, що дозволяє скоротити частоту ремонту і витрати на підтримку обладнання, знижуючи загальні витрати на його обслуговування.

Продовження терміну експлуатації обладнання завдяки захисним покриттям також зменшує потребу в частій заміні техніки, що призводить до економії капітальних витрат. До того ж, антикорозійні покриття допомагають уникнути незапланованих зупинок виробництва, викликаних корозійними пошкодженнями, і зменшують витрати, пов'язані з аварійними ремонтами, забезпечуючи стабільність і безперервність робочих процесів.

Економічна ефективність від інвестицій в оптимальні антикорозійні матеріали виражається через значну економію на ремонті та продовження експлуатаційного терміну техніки. З огляду на це, використання антикорозійних покриттів для сталі в умовах малоциклових навантажень сприяє підвищенню надійності, довговічності конструкцій і загальному зниженню витрат, що є вагомим перевагою для підприємств.

ВИСНОВКИ

1. З огляду літературних джерел металізаційні покриття майже однозначно успішно захищають сталеві конструкції від корозії, однак питання впливу металізаційних і плакованих захисних покриттів на довговічність сталі в умовах дії циклічних навантажень, особливо в пластичній області, вивчені мало і їх результати часто протирічливі. Це свідчить про необхідність розробки комплексних методів оцінки стійкості таких покриттів у різних експлуатаційних умовах, що включає аналіз мікроструктурних змін.

2. Питання про можливість і доцільність використання поверхневого зміцнення для деталей, які працюють в режимі малоциклового навантаження, повинні кожного разу вирішуватися конкретно з урахуванням сукупного впливу багатьох факторів: властивості сталі (її міцності, пластичності тощо), напруженого стану, рівня і виду навантаження, дії зовнішнього середовища і зміни мікрорельєфу поверхні.

3. Алюмінієві металізаційні покриття демонструють високу корозійну стійкість у корозійних середовищах (наприклад, КАС). Випробування показали, що зразки з покриттям мають знижену швидкість корозії в порівнянні з незахищеними зразками, що значно підвищує їх довговічність у корозійних умовах. Зразки без покриття швидко піддаються корозії, що призводить до появи тріщин і зменшення витривалості.

4. Металізаційне покриття алюмінієм товщиною 0,2 мм зберігає витривалість зварних зразків в умовах корозійної втоми. Оптимальна товщина покриття залежить від умов експлуатації та товщини зварюваних листів. Для зварних з'єднань попереднє напилення забезпечує кращі антикорозійні та антивтомні властивості.

5. Металізаційне покриття на зразках з дефектами (концентраторами напружень) є ефективним для захисту від корозійно-механічного руйнування, збільшуючи витривалість у порівнянні з

незахищеними зразками. Результати підтверджують, що при корозійній втомі покриття діє як бар'єр, що захищає від появи тріщин.

6. Двошарова сталь (КД2), плакована корозійностійким шаром, показує високу корозійну стійкість і механічну міцність. У порівнянні зі звичайною сталлю, двошарова сталь ефективніша в умовах корозійного середовища при високих циклічних навантаженнях. Плакована сталь є перспективним матеріалом для корпусних вузлів, які піддаються дії агресивних середовищ.

Отже, нанесення металізаційних покриттів на конструкційні сталі та застосування інгібіторів корозії є ефективними методами підвищення довговічності сталей в агресивних умовах, а двошарова сталь КД2 є надійним матеріалом для роботи у корозійних середовищах завдяки високій стійкості до корозійно-механічного руйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fatigue of Metals and Structures. – New York: Springer, 2010.–340 p.
2. Totten, G. E., West, S. R. Corrosion and Corrosion Control of Agricultural Equipment. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 276 p.
3. Corrosion Science and Technology. Protective Coatings and Their Role in Fatigue Performance of Steel Structures // Corrosion Science and Technology. – 2018. – Vol. 17, No. 3. – P. 213-220.
4. Influence of Corrosive Environments on Fatigue Behavior of Steels. // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 45, No. 6. – P. 120-130.
5. Fatigue Performance of Structural Steel with Advanced Coatings for Harsh Agricultural Applications. // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2019. – Vol. 36, No. 2. – P. 145-153.
6. Афанас'єв О. П. Дослідження впливу агресивних середовищ на втомну міцність сталей // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2017. – № 856.
7. Василенко І. М. Втома і тріщиностійкість конструкційних матеріалів. – Київ: Наукова думка, 1998.
8. Гігіняк Ф. Ф., Лебедев А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наукова думка, 2003. – 342 с.
9. Гринько Ю. Г. Втома конструкційних матеріалів в агресивних середовищах // Науковий вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2016. – № 844.
10. Дьяків М. І. Аналіз втоми сталей в умовах агресивного середовища // Механіка композитних матеріалів. – 2019. – Т. 54, № 3.
11. Іванченко Ю. В. Вплив агресивних середовищ на втому металів в агропромисловому комплексі. – Вінниця: ВНТУ, 2012.

12. Лукашенко І. О. Вплив агресивних середовищ на втомну поведінку сталей // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2021. – № 52.
13. Назаренко О. С. Малоциклова втома сталевих конструкцій: вплив агресивних середовищ // Науковий вісник Одеського національного політехнічного університету. – 2018. – № 1.
14. Петренко Ю. І. Механізми втоми та корозії конструкційних матеріалів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2019. – № 855.
15. 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.
16. 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.
17. 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. I. – 640 с.
18. Рубаненко В. О. Антикорозійні властивості матеріалів для сільськогосподарської техніки. – Полтава: ПНТУ, 2010.
19. Савченко Т. В. Втомна міцність сталей в умовах агресивних середовищ // Матеріали III Міжнародної конференції з матеріалознавства. – Харків: ХНУРЕ, 2020.
20. Стельмах М. А. Антикорозійні покриття в аграрному машинобудуванні. – Харків: ХНАМГ, 2003.
21. Федоренко О. С. Дослідження втомної міцності сталей в агресивних середовищах: проблеми та рішення // Механіка та матеріали. – 2022. – Т. 65, № 2.