

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

На правах рукопису

ПОПОВИЧ ПАВЛО ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 631.33: 629.3.023.11

МЕТОДИ ОЦІНКИ РЕСУРСУ НЕСУЧИХ СИСТЕМ
ПРИЧІПНИХ МАШИН ДЛЯ ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ
З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант
Рибак Тимофій Іванович
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2014

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	2
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. НАДІЙНІСТЬ РОЗКИДАЧІВ ДОБРИВ, СТАН ПРОБЛЕМИ, ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
1.1. Тенденції розвитку сільськогосподарської техніки.....	15
1.2. Особливості корозійних пошкоджень техніки у сільському господарстві.....	39
1.3. Дослідження надійності тримких структур мобільних сільськогосподарських машин.....	53
1.4. Оцінка експлуатаційної навантаженості сільськогосподарської техніки.....	60
1.5. Корозійна стійкість матеріалів в середовищах добрив.....	67
1.6. Аналіз впливу корозійно - експлуатаційних факторів на залишковий ресурс елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин.....	80
1.7. Висновки та задачі досліджень.....	87
РОЗДІЛ 2. КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ В СЕРЕДОВИЩАХ МІНЕРАЛЬНИХ ТА ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ.....	
2.1. Аналіз втрат від корозійних пошкоджень сільськогосподарської техніки..	92
2.2. Атмосферна корозія сільськогосподарських машин і агрегатів.....	96
2.3. Особливості експлуатації і зберігання сільськогосподарських машин з позицій корозійної стійкості.....	100
2.4. Матеріали та методики досліджень електрохімічної і корозійної поведінки машинобудівних сталей у середовищах добрив.....	108
2.5. Особливості корозійної і електрохімічної поведінки сталей в мінеральних та органічних добривах.....	112
2.6. Висновки.....	128

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩ НА ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ ТА ЦИКЛІЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН.....	130
3.1. Режими експериментальних досліджень характеристик циклічної тріщиностійкості і втомного руйнування матеріалів несучих металоконструкцій розкидачів добрив в робочих середовищах.....	130
3.2. Матеріали і умови проведення випробувань.....	134
3.3. Методика втомних і корозійно - втомних досліджень матеріалів несучих структур машин для внесення добрив.....	137
3.4. Методика визначення характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості матеріалів елементів розкидачів добрив.....	141
3.5. Металографічні і фрактографічні дослідження механізмів руйнувань елементів металоконструкцій розкидачів	149
3.6. Вплив робочих агресивних середовищ на втомне руйнування матеріалів несучих систем машин для внесення добрив.....	155
3.7. Вплив добрив на циклічну тріщиностійкість матеріалів металоконструкцій сільськогосподарських машин.....	161
3.8. Висновки.....	165
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ.....	167
4.1. Вплив експлуатаційних середовищ і умов навантаження на поширення тріщин в матеріалах металоконструкцій сільськогосподарських машин.....	167
4.2. Окремі положення теорії електрохімічної корозії металів.....	186
4.3. Розрахункова модель визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій в агресивних середовищах при довготривалому статичному навантаженні.....	199
4.4. Визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій при дії циклічних навантажень і корозійно – агресивних середовищ	212

4.5. Поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій значних перетинів.....	220
4.6. Висновки	230

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ НЕСУЧИХ СИСТЕМ

РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КОРОЗІЙНО - АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	232
5.1. Основи методики визначення ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин.....	232
5.2. Визначення довговічності коритних профілів при дії циклічних навантажень і корозійно - агресивних середовищ добрив.....	241
5.3. Визначення періоду докритичного росту тріщин у балкових несучих системах відкритих профілів металоконструкцій причіпних розкидачів добрив.....	247
5.4. Визначення ресурсу замкнутих профілів несучих структур в робочих середовищах при циклічних згинальних навантаженнях.....	260
5.5. Висновки.....	290

РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧИХ СТРУКТУР ПРИЧІПНИХ РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ.....	291
6.1. Обґрунтування вибору режимів проведення експериментальних досліджень причіпного розкидача ПРТ - 10.....	291
6.2. Обґрунтування вибору обладнання для оцінки експлуатаційної навантаженості причіпних розкидачів добрив.....	293
6.3. Обґрунтування вибору датчиків для оцінки динаміки навантаженості машин в експлуатаційних умовах.....	300
6.4. Аналітичне моделювання напружено – деформованого стану несучої системи причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ – 10.....	303
6.5. Експериментальні польові випробування несучих конструкцій причіпних розкидачів добрив.....	325

6.6. Висновки.....	335
РОЗДІЛ 7. МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ НЕСУЧИХ СИСТЕМ РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВІВ АГРЕСИВНО - ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ.....	
7.1. Розрахунково – експериментальна оцінка ресурсу несучої структури розкидача добрив РТД - 9 з врахуванням корозійно - експлуатаційних чинників.....	336
7.2. Висновки.....	356
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	357
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	361
ДОДАТКИ.....	394

ВСТУП

Актуальність теми. Інтеграція України у Європейський економічний простір вимагає переведення вітчизняного аграрного виробництва на якісно новий рівень господарювання. Низька конкурентоспроможність вітчизняної техніки разом з прогресивними лізинговими та кредитними програмами призвела до нарощування обсягів придбання імпортних технічних засобів аграрного виробництва. За даними збірника «Сільське господарство України», річний обсяг продаж сільськогосподарської техніки складає біля 9,9 млрд. грн., у тому числі вітчизняного виробництва 1,55 млрд. грн., близько 26% загальної реалізації. Отже, існує необхідність збільшення виробництва і розширення частки продажу вітчизняних сільськогосподарських машин, відповідно до Концепції Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2020р. (розпорядження Кабінету Міністрів України №603-р.) до 70 – 75%.

Підвищення вимог до продуктивності і довговічності машин для внесення добрив пов'язане з забезпеченням надійності їхніх систем, вузлів і агрегатів. Внаслідок сумісного впливу агресивних середовищ і механічних навантажень, з ладу виходять до 70 % механізмів, з яких 20 ... 25% становлять поломки, спричинені робочими перевантаженнями внаслідок втрати міцності від корозійних пошкоджень. Незважаючи на існуючі дослідження впливів робочих агресивних середовищ на зниження міцності та надійності с/г технічних засобів, проблематика дослідження процесів корозійної і втомної пошкодженості несучих систем в середовищах мінеральних і органічних добрив вивчена недостатньо. Необхідність скорочення термінів проектування нової сільськогосподарської техніки і високі витрати на проведення експериментальних досліджень підвищують значення розрахунково - експериментальних методів оцінки міцності і

довговічності. Розробка та обґрунтування методів оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням агресивно – експлуатаційних факторів є комплексним завданням, яке вимагає поглибленого аналізу питань теорії розрахунків несучих металоконструкцій, обґрунтування нових розрахункових моделей корозійно - втомних руйнувань як функцій агресивно - експлуатаційних факторів, розробку і вдосконалення математичних методів, що в сукупності є значною науково - технічною проблемою, яка має важливе господарське значення і визначає актуальність даної дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності з пріоритетним тематичним напрямом «Перспективні технології агропромислового комплексу та переробної промисловості», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2011р. Результати дисертації пов'язані з науковими дослідженнями, які виконувались у Тернопільському національному технічному університеті ім. І. Пулюя: «Прогнозування ресурсу роботи типових конструкційних елементів мобільних сільськогосподарських машин», № д.р. 0100U000786; «Оптимізація несучих систем замкнутого профілю важконавантажених сільськогосподарських машин типу коренезбиральних комбайнів» № д.р. 0106U000129; «Оцінка експлуатаційної навантаженості обприскувачів класу ОВП 2000 з розробкою оптимізованої за довговічністю функціонально - несучої системи», № д.р. 0111U002588; «Розробка методики оцінки і покращення функціональних та несучих параметрів сільськогосподарських грейферних навантажувачів типу ПЕА-1.0», № д.р. 0113U000254.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних основ і аналітично - емпіричних методів оцінки та прогнозування ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивно - експлуатаційних факторів.

На основі ідентифікації відомих у літературі теоретичних і експериментальних досліджень міцності і довговічності несучих структур сільськогосподарських машин, вирішення даної проблеми зведено до розв'язку наступних фундаментальних та прикладних задач:

1. Дослідження механізмів корозійної та електрохімічної поведінки конструкційних сталей у агресивних експлуатаційних середовищах добрив.

2. Встановлення впливу робочих середовищ і фактичної експлуатаційної навантаженості на процеси та характеристики втомного руйнування та циклічної тріщиностійкості матеріалів несучих систем розкидачів добрив експериментальним шляхом.

3. Розробка моделі процесів корозії в тріщині шляхом опису нестационарного потоку водню в метал як функції концентрації іонів в електроліті, навантаженості та стандартного електродного потенціалу металу з урахуванням типу і закономірності утворення пасивувального шару, а також електрохімічних реакцій між вершиною і берегами тріщини в агресивних сільськогосподарських середовищах.

4. Розробка розрахункової моделі визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних наскрізних тріщин в тонкостінних елементах металоконструкцій с/г техніки на основі підходів термодинаміки нерівноважних процесів і механіки втомного поширення тріщин при дії статичних навантажень і агресивних середовищ.

5. Розробка математичної моделі визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій з наскрізними тріщинами у агресивно - експлуатаційних умовах.

6. Розробка математичних співвідношень у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних з обґрунтованими початковими і кінцевими умовами для визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів несучих структур розкидачів добрив з поверхневими тріщинами.

7. Розробка теоретичних основ методики визначення ресурсу тримких металоконструкцій причіпних розкидачів добрив за умов їх експлуатації.

Адаптація даної методики для визначення довговічності типових для даного типу с/г машин відкритих профілів при сумісній дії динамічних навантажень та середовищ органічних і мінеральних добрив.

8. Створення математичної моделі визначення залишкового ресурсу несучих систем розкидачів при циклічних згинальних деформаціях тонкостінних замкнутих профілів з поверхневими багаторозмірними корозійними пошкодженнями при агресивно - експлуатаційних впливах.

9. Розробка ефективного методу наближеного обчислення КІН при довільному навантаженні поверхневих тріщин в замкнутих профілях несучих структур розкидачів.

10. Розробка методики і проведення польових експериментальних випробувань з визначенням параметрів фактичної навантаженості причіпних розкидачів добрив.

11. Побудова розрахункових моделей НДС несучих металоконструкцій машин для внесення добрив з урахуванням експлуатаційної навантаженості.

12. Розробка методики комплексної розрахунково-експериментальної оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням агресивно - експлуатаційних факторів.

Об'єкт дослідження. Процеси руйнування в корозійних середовищах несучих структур машин для внесення добрив.

Предмет дослідження. Методи моделювання і оцінки ресурсу роботи тонкостінних несучих систем причіпних розкидачів добрив та удосконалення їх конструкцій з метою підвищення ресурсу.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на основах термодинаміки, теорії пружності, теоріях втомного поширення тріщин і механіки руйнування матеріалів та сучасних уявленнях про механізми руйнування складнонавантажених несучих систем, методах теорії надійності машин і конструкцій. Експериментальні дослідження НДС і динаміки навантаження несучих металоконструкцій причіпних розкидачів добрив в польових умовах здійснювались методами тензометрії.

Методологічною основою досліджень корозійно - втомних руйнувань матеріалів в середовищах добрив є одночасне врахування механічних та електрохімічних чинників, що визначають руйнування: експериментальні методи статичних механічних і втомних випробувань матеріалів; металографічний аналіз та електронно - мікроскопічна фрактографія для встановлення особливостей і характеру руйнування металу при дії агресивних робочих середовищ; методами механіки руйнування визначались кінетичні діаграми росту тріщино подібних дефектів залежно від умов випробувань досліджуваних сталей. Для визначення особливостей корозійної і електрохімічної поведінки машинобудівних сталей у середовищах органічних і мінеральних добрив використовувалися ваговий і потенціостатичний методи оцінки процесів корозії. Статистичне опрацювання даних здійснено з використанням регресійного аналізу в Matlab. При побудові розрахункових моделей використано програмне забезпечення SolidWorks, ЛИРА. Отримання й візуалізація експериментальних даних здійснювалися в ППП Kriator.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі проведеного комплексу наукових досліджень розроблена теорія опису процесів руйнувань несучих систем причіпних розкидачів добрив в умовах дії експлуатаційних циклічних навантажень і корозійно - агресивних середовищ. В основу покладено оригінальні розрахункові моделі.

На цій підставі:

- на основі законів термодинаміки нерівноважних станів розроблено розрахункову модель визначення періоду докритичного росту наскрізних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій при сумісній дії статичних навантажень і корозійно - агресивних сільськогосподарських середовищ, яка адаптована до двох видів корозійних впливів: для випадку ефективних та неефективних анодних процесів;

- розроблено аналітичну модель для визначення залишкового ресурсу тонкостінних несучих систем розкидачів добрив з наскрізними тріщинами при дії циклічних навантажень і корозійно - агресивних середовищ, яка базується на

законах термодинаміки і положеннях механіки втомного поширення тріщин;

- отримано сукупність математичних співвідношень у вигляді нелінійного диференціального рівняння в часткових похідних з обґрунтованими початковими і кінцевими умовами для визначення ресурсу при дії сільськогосподарських корозійно - експлуатаційних середовищ на елементи конструкцій з поверхневими тріщинами у трьохвимірних тілах, запропоновано ефективний метод розв'язку вказаної задачі;

- сформульовано основні положення методики оцінки ресурсу несучих металоконструкцій розкидачів добрив при експлуатаційних умовах з адаптацією для застосування при визначенні залишкового ресурсу типових у с/г машинобудуванні відкритих профілів в робочих середовищах;

- розроблено методику обчислення довговічності несучих елементів замкнутих профілів металоконструкцій розкидачів добрив з урахуванням особливостей зародження корозійно - втомних тріщин на поверхнях при циклічному навантаженні в агресивних середовищах добрив;

- за результатами проведеного математичного моделювання і експериментальних досліджень запропоновано наукову концепцію розрахунково - експериментального прогнозування і оцінки ресурсу несучих систем причіпних розкидачів добрив з врахуванням фактичних експлуатаційних умов.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані методи та отримані результати мають прикладне значення і дають змогу виконати оцінку ресурсу з визначенням раціональних параметрів та матеріалів несучих систем причіпних машин для внесення добрив при урахуванні впливу агресивно - експлуатаційних факторів, що дає змогу покращити показники міцності і довговічності, підвищити корозійну стійкість розкидачів.

Експериментальним шляхом визначено показники корозійної стійкості, також встановлено особливості впливів сільськогосподарських робочих середовищ на втомне руйнування і параметри циклічної тріщиностійкості ряду машинобудівних сталей при характерних для даного класу машин параметрах

навантаження. Удосконалено методику моделювання, яка з високою точністю забезпечує попередню оцінку НДС просторово навантажених несучих систем розкидачів.

На основі проведених аналітичних і експериментальних досліджень, методик та рекомендацій, здійснено модернізацію несучих систем розкидачів добрив РТД –9, РРД –12 (ПАТ «Ковельсільмаш»), удосконалено несучі металоконструкції сільськогосподарських причепів ПТС-4, ПТС-8, напівпричепа АСП-25 (ПАТ «Рівнесільмаш»), навантажувача ПЕА-1.0 (ВАТ «Коломиясільмаш»).

Теоретичні і експериментальні результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя на кафедрі технічної механіки, сільськогосподарських машин і транспортних технологій при вивченні навчальних курсів «Методи проектуванні сільськогосподарських машин» та «Пошукове конструювання у сільськогосподарському машинобудуванні».

Покладені в основу дослідження є подальшим кроком розвитку теорії надійності і довговічності техніки для розкидання добрив.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації виконано здобувачем самостійно, постановку завдань, аналіз і трактування отриманих результатів – спільно з науковим консультантом. У технічних рішеннях частка всіх співавторів однакова.

Результати роботи викладені одноосібно автором у друкованих працях [194, 208]. У публікаціях що виконані у співавторстві, дисертантові належить: [26, 193]– визначення впливу органічних та мінеральних добрив на корозійні і електрохімічні характеристики конструкційних сталей; [22, 59, 60, 182] – постановка задач, визначення характеристик циклічної тріщиностійкості машинобудівних сталей у середовищах добрив; постановка задач, розробка математичних моделей для розрахунку ресурсу роботи несучих металоконструкцій сільськогосподарської техніки при поширенні поверхневих корозійно - втомних тріщин в агресивних робочих середовищах при статичному

[25, 207] та циклічному [187, 191] навантаженнях; [205] – обґрунтування напрямків досліджень за впливами середовищ; [160, 204, 209] – систематизація причин руйнувань металоконструкцій с/г машин при експлуатації; [183, 188, 189, 192, 206] - розробка аналітичних моделей НДС несучих систем; [229, 232] – вибір критеріїв оцінки надійності мобільної с/г техніки; [236, 287]- обґрунтування раціональних напрямків схематизації нерегулярних навантажень мобільної с/г техніки; [184, 210] – адаптація параметрів режимів експлуатаційної навантаженості для проведення лабораторних досліджень елементів несучих систем; [93] – формування розрахункової схеми підвіски причепа; [190] - розробка методики розкриття статичної невизначеності елементів несучих систем с/г машин; [233] - обґрунтування аналітичних залежностей для обчислень міцності при стендових випробуваннях елементів металоконструкцій розкидачів добрив; [174, 176, 185, 211] – розробка розрахункових залежностей для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень першого роду; [150, 198, 196, 202, 209] – постановка задач, розробка моделей НДС базових несучих структур сільськогосподарської техніки; розробка моделі навантаження бітера розкидача добрив [195]; обґрунтування напрямків досліджень довговічності несучих систем розкидачів добрив [262, 186].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях: «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (Харків, ХНТУСГ, 2008р., 2012р., 2014 р.); «Технічний сервіс АПК, техніка та технологія у сільськогосподарському машинобудуванні» (Харків, ХНТУСГ, 2013р.); «Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин» (Тернопіль, ТДТУ, 2004р.); «International Symposium of Croatia Metallurgical Society», Croatia (Хорватія, Šibenik, 2010р., 2012р.); «Mechanical engineering technologies'04» (Болгарія, Varna 2004р.); «Иновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (Мінськ, БГАТУ, 2011р.); «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, ИМЕТ РАН, 2011р.); «Пошкодження

матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль, ТНТУ, 2009р.); «Современные проблемы машиностроения» (Томськ, НИТПУ, 2010р.); «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (Рубцовськ, 2011р.); «XIX Петербургские чтения по проблемам прочности» (Санкт-Петербург, 2010р.); «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, ГГТУ, 2010р.); III та IV міжнародних конференціях «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN (Москва, 2009р, 2011р.); 9 і 10 міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2009р., 2010р.). Дисертаційна робота у повному обсязі доповідалась і одержала позитивну оцінку на 8 науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 2014р.).

Публікації. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано у 44 наукових працях, з них 26 публікацій у наукових фахових виданнях України, з яких 7 публікацій у виданнях, включених до наукометричних баз, 5 з яких мають імпаکت - фактор, 3 патенти України на корисні моделі, 15 матеріалів і тез наукових конференцій.

РОЗДІЛ 1

НАДІЙНІСТЬ РОЗКИДАЧІВ ДОБРИВ, СТАН ПРОБЛЕМИ, ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Тенденції розвитку сільськогосподарської техніки

Інтеграція України у Європейський економічний простір потребує переведення вітчизняного аграрного виробництва за рахунок необхідного рівня технічного і технологічного забезпечення на якісно новий рівень господарювання. Для відтворення та оновлення машинно-тракторного парку щорічні обсяги продажу сільськогосподарської техніки, запасних частин та обладнання, у тому числі для переробної промисловості, мають становити 32-37 млрд. грн. Втрата позицій вітчизняного сільськогосподарського машинобудування на ринку призвела до різкого зменшення обсягів виробництва [39].

Низька конкурентоспроможність вітчизняної техніки призвела до нарощування обсягів продажу імпоротної техніки. Так, наприклад, у 2008 р. було продано сільськогосподарської техніки майже на 9,9 млрд. грн., обсяги продажу техніки виробництва України становили близько 1,55 млрд. грн., або 26% загальної реалізації. Отже, існує проблема змін на ринку с/г машин та обладнання, підвищення частки продажу техніки вітчизняного виробництва на ринку країни до 70-75% і зниження частки продажу імпоротної техніки до 25-30%, як це передбачено Концепцією розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу, схваленою Кабінетом Міністрів України (постанова № 536 від 16.09.1992 р.). За даними Держмитслужби обсяги продажу імпоротної техніки зросли із 140 млн. доларів у 2000 р. до 2,5 млрд. доларів у 2008 р. Подальше збереження даної тенденції призведе до втрати

вітчизняного виробничого та науково-технічного потенціалу, зростання безробіття, відтоку з економіки України значних фінансових ресурсів, технічної та економічної залежності агропромислового комплексу від зарубіжних фірм. Основною причиною ситуації, що склалася на ринку сільськогосподарської техніки є низька конкурентоспроможність вітчизняних сільськогосподарських машин та обладнання, яка, передусім, зумовлена її невідповідністю сучасному рівню науково-технічного прогресу: низька надійність, значні питомі витрати паливо - мастильних матеріалів на виконання робіт; невідповідність основних параметрів с/г техніки сучасним вимогам виробництва, також майже відсутня автоматизація контролю і керування виконанням технологічних процесів. Розвитку машинобудування в Україні, зокрема агропромислового комплексу, приділено значну увагу в нормативно-правових актах Кабінету Міністрів України та публікаціях науковців в яких розвиток галузі визнано пріоритетним завданням державної технічної політики [37, 39, 61, 94, 95, 96, 110, 124].

Очевидно, комплексною актуальною проблемою є відродження і розвиток вітчизняного сільськогосподарського машинобудування, підвищення конкурентоспроможності продукції аграрного виробництва. Вирішення таких завдань може бути досягнуто за рахунок підвищення рівня наукоємності, технологічності, надійності, економічності, ергономічності техніки у аграрному виробництві. Також необхідно забезпечити розвиток фундаментальних і прикладних досліджень в галузевому машинобудуванні, для раціональної уніфікації сприяти створенню та освоєнню виробництвом сучасної елементної бази і конструкційних матеріалів, що здатні забезпечити високу надійність і довговічність сільськогосподарської техніки, зниження ресурсоємності при виконанні технологічних процесів. Доцільно виділити пріоритетні напрями розвитку галузі у сфері наукових розробок, що стосуються мобільних с/г машин та агрегатів [37, 39, 110]:

- розробки, спрямовані на технологічний розвиток і технічне переоснащення досліджуваної галузі машинобудування;

- пропозиції щодо створення перспективних конструкцій сільськогосподарської техніки, що повною мірою задовольнятиме вимоги агрозоотехнологій до якості робіт та відповідатиме вимогам виробництва щодо надійності, паливної економічності, а також ергономічності;
- наукові розробки, спрямовані на створення компонентів конструкцій сільськогосподарської техніки нового покоління, уніфікованої елементної бази;
- комп'ютеризація на всіх етапах створення аграрної техніки і контролю параметрів якості на всіх етапах виробництва та експлуатації;
- максимальна інформатизація та матеріально-технічне забезпечення наукової і науково-технічної діяльності.

Щодо проблематики переоснащення АПК технічними засобами очевидно, агропромисловий комплекс України потребує термінових змін в частині підвищення техніко-технологічного забезпечення рівня виробництва. Стан технічного забезпечення не відповідає сьгоднішнім потребам відповідно до завдань, визначених програмою економічних реформ на 2010-2014 рр. Президента України «Заможне суспільство, конкурентоспроможна економіка, ефективна держава». В контексті завдань та реформ, технічне переоснащення має забезпечити ключову роль у системному виконанні основних технологічних етапів виробництва сільськогосподарської продукції з дотриманням якості, економічності та екологічності процесів [31, 124]. За твердженнями авторів [31, 124], спрацьованість матеріально-технічної бази сільськогосподарських підприємств та використання фізично і морально застарілої техніки є одним з основних чинників втрат (16-24%) урожаю. За розрахунками, у найкращий для сільгосптоваровиробників України 2011 р., коли було зібрано рекордний урожай у 56,7 млн. тонн за фактичної урожайності 37 ц/га і біологічної 44 ц/га, втрати на кожному гектарі становили 7ц/га. При біологічному урожаї в 2011 р. на рівні 67,5 млн. тон загальні втрати зернових на етапі збирання становили 10,8 млн. тонн. На етапі збирання урожаю

сільськогосподарські виробники України за останні чотири роки втратили близько 45 млн. тонн зерна. За сьогоднішніми цінами це дорівнює вартості приблизно 50 тис комбайнів класу «Дон-1500Б», або 27 тис комбайнів класу «Lexion-570» «Claas», або 34 тис. комбайнів «John Deere-9570», що відповідає потребі зернового господарства України в зернозбиральній техніці. Від рівня технічного забезпечення і досконалості машин, ступеня їх інтелектуалізації та універсалізації залежать витрати енергії на виробництво одиниці продукції у аграрному виробництві (рис. 1.1), які в нас до 4 разів вищі ніж у розвинених країнах Європи. Відсутність машин 2 та 3 поколінь, інженерних систем управління виконання технологічних процесів (обробітку ґрунту, диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин, тощо) обумовлюють погіршення якості стану ґрунтів, їх родючості та екологічного стану довкілля [31].

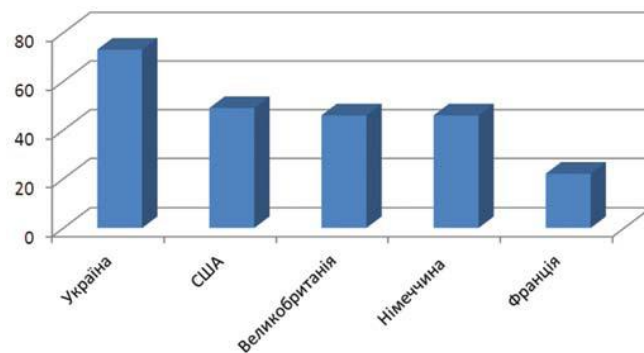


Рис. 1.1. Витрати енергії на виробництво одиниці продукції зернових (кВт год/ц) в різних країнах світу

За даними ННЦ «Інституту ґрунтознавства і агрохімії імені О.Н. Соколовського», близько 20 % території України забруднено шкідливими металами, значна частина орних земель зазнає впливу водної (13,2 млн. га) і вітрової ерозії [110, 123, 124, 125]. Навіть при низькій урожайності сільськогосподарських культур дефіцит основних елементів живлення в ґрунті досягає 110 кг/га, щороку відбувається на 0,5-0,6 т/га зниження вмісту гумусу, обсяги вапнування ґрунтів порівняно з 1990 р. скорочено майже у 18 разів, гіпсування – у 12 разів. З цих причин передові аграрії у пошуку новітніх

техніко-технологічних рішень частіше звертаються до іноземних виробників. До пріоритетного переліку сільськогосподарської техніки 2-3 покоління, яка вкрай необхідна для реалізації сучасних агротехнологій в АПК України, відносяться [110, 123, 124, 125, 243-245]:

- енергетичні засоби;
- комбайни самохідні та причіпні;
- машини і обладнання для виробництва та зберігання продукції рослинництва;
- технічні засоби і комплекси для переробки сільськогосподарської продукції;
- машини і обладнання для механізації процесів у тваринництві;
- технологічні комплекси малогабаритних машин і знарядь для механізації робіт в кооперативних та присадибних господарствах.

Більш детальний перелік техніки формує Міністерство аграрної політики та продовольства України за результатами розвитку новітніх технологій та випробування машин в Державній науковій установі УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого [123, 124, 125]. Основні напрямки та наукові концепції розвитку сільськогосподарської техніки і аграрного виробництва розглянуто в наукових працях учених Адамчука В.В., Аніловича В. Я., Бойка А.І., Босого Е.С., Булгакова В.М., Бакума М.В., Василенка П.М., Войтюка Д.Г., Гукова Я.С., Гевка Б.М., Дубровіна В.О., Дідуха В.Ф., Заїки П.М., Козаченка О.В., Кравчука В.І., Лінника М.К., Мироненка В.Г., Надикто В.Т., Погорілого Л.В., Пастухова В. І., Рибачка Т.І., Рогатинського Р.М., Сенчука М. М., Сидорчука О.В., Сала В.М., Цурпала І.А., Шабельника Б.П., Шевченка В.В., та ін. За твердженням В.В. Адамчука, сучасний парк техніки для внесення мінеральних добрив більше, ніж на 96 % сформований на базі машин, що здійснюють внесення добрив кидальним способом. При цьому машини відомих моделей вносять добрива з нерівномірністю 23 % і більш при робочій ширині захвату більше 10 % за напрямком руху агрегату, що не відповідає вимогам до

якості їх роботи, розкидачі мають відносно низьку продуктивність за годину змінного часу [37].

В Україні розкидачі для внесення твердих органічних добрив виробляються ДП “Агромаш” ННЦ “ІМЕСГ“, ВАТ “Ковельсільмаш”, ВАТ “Білоцерківсільмаш”. ВАТ “Ковельсільмаш” виготовляє розкидачі МТО-7, РТД-7А, РТД-9, РТД-14, МТО-4, для внесення рідкої органіки РТД-12; ДП “Агромаш” ННЦ “ІМЕСГ“ виробляє розкидачі типу МТТ, та для внесення рідкої органіки МЖТ-Ф-11, МЖТ-Ф-6. ВАТ “Білоцерківсільмаш”: РОУ-6. Іноземні розкидачі твердих органічних добрив виробляються фірмами “Міро”, “Ролланд”, “Лебоулх”, “Джантіль”, “Брімонт” (Франція); “Бергманн”, “Фріке”, “Кемпер”, “Вельгер”, “Теббе”, “Аннабургер”, “Хаве”, “Кухманн” “Еберхардт-Менгеле”, “Кеенан”, “Штраутманн” (Німеччина); “Унія”, “Пол-Мот-Варфама” (Польща).СР, ”Аг-Хем” (Нідерланди); ЗДТ, “Агрострой-Пельгримов” (Чехія), “Джі-Еф”, “Самсон” (Данія), “Фармтех” (Словаччина), “Агрік-Бемвіч” (Іспанія), “Поттінгер” (Австрія). Закордонні виробники виготовляють машини у широкому спектрі типорозмірів, кількість моделей від 4 до 17, місткість кузова змінюється в межах від 5 м³ до 30 м³, споживана потужність – від 30 кВт до 130 кВт. Ходова частина виконується одно і двохвісною, також як тридемом. Типи робочих органів: горизонтальні одновальні і двохвальні бітери з розташованими нижче розкидаючими дисками, вертикальними двохвальними, або чотирьохвальними бітерами, вертикальним диском, який встановлений в передній частині кузова [11, 37]. Горизонтальне розміщення робочих органів поширене у виробників “Аннабургер”, “Вельгер”, “Кухманн”, “Еберхардт - Менгеле”, “Теззе”, “Сапфір”, “Штраутманн”, “Хаве” (Німеччина), СР (Нідерланди), “Джантіль” (Франція), “Агрік” (Іспанія), “Пол Мот Верфама” (Польща), “Фармтех” (Словаччина). Розкидачі з горизонтальними бітерами використовуються при розкиданні традиційного підстилкового гною при ширині розкидання (6...8) м. Для збільшення продуктивності машин нижче горизонтальних лопатевих валів розміщуються два диски великого діаметру з лопатками. Це виробники СР (Нідерланди),

“Міро” (Франція), “Кемпер”, “Куксманн” (Німеччина), “Фармтех” (Словаччина), “Поттінгер” (Австрія). Розкидачі твердих органічних добрив з вертикальними дво - чи чотирилопатеви́ми бітерами більш якісно вносять розсипчастий перегній. Вертикально розташовані робочі органи виконуються у вигляді лопатевих валів або шнеків: “Хаве” (Німеччина), “Лебоулх”, “Ролланн”, “Джантіль”, “Міро” (Франція), “Самсон” (Данія), “Аннабургер”, “Штраутманн”, “Поттінгер” (Австрія) [11, 37]. Часто перед робочими органами встановлюється шибер, що переміщується перпендикулярно до напрямку руху машини, запобігаючи перевантаженням механізму розкидання. Відомі основні недоліки розкидачів твердої органіки - значні вібрації робочих органів, низька щільність розкидання добрив.

Відомо, до 50% приросту врожаю сільськогосподарських культур отримується за рахунок внесення добрив. Органічні добрива (гній, компости, сидерати, гноївка) є ефективними, сприяють утворенню гумусу, зменшенню шкідливої дії отрутохімікатів і радіоактивних речовин. Їхнє застосування є складовою органічного (екологічно чистого) виробництва продукції рослинництва. Основними видами твердих органічних добрив є різновиди гною. В зв'язку з його дефіцитом, актуальним також є використання компостів: торфо - гноївкових, торфо - гноєвих, торфо - гноєво - мінеральних. Компости готуються пошаровим і вогнищним способами. При пошаровому способі на шар торфу товщиною 40-50 см укладається шар гною 25-30 см, далі за чергою, поки загальна висота бурту не досягне 2 м. В нижній частині ширина має бути до 3-4 м. При необхідності, на нижній шар торфу розкидачами вносяться мінеральні добрива. При вогнищному способі компостування гній вкладається на подушку з торфу окремими купами на відстані близько 1 м. Проміжки між ними засипаються торфом. У міру готовності компост буртується бульдозером, навантажується у транспортні засоби і вивозиться на поле, або навантажується в розкидачі і вноситься під основний обробіток ґрунту. Як органічне добриво використовують також торфо – гноївковий компост. Для його приготування слід використовувати торф вологістю 45-55%. На тонну торфу, залежно від

його вологості, потрібно 0,5-1 т гноївки. Якість компостів поліпшується, якщо на кожну тонну додати до 20 кг фосфорних і 5-10 кг калійних добрив. Після поглинання торфом гноївки всю масу перемішують бульдозером і буртують у штабель. При літній заготівлі дозрівання таких компостів відбувається протягом 1-1,5 місяця [11]. Залежно від наявності типу машин, відстані доставки органічних добрив до поля, норм внесення, застосовуються технологічні схеми прямоочна, перевантажувальна, перевалочна. При найбільш поширеній прямоочній технології органічні добрива завантажуються в транспортно-технологічні засоби (розкидачі), доставляються у поле і вносяться. З вітчизняних найчастіше застосовуються машини виробництва підприємств ВАТ «Борекс», НВФ «Агрохіммаш», ВАТ «Коломиясільмаш», ВАТ «Червона Зірка», ВАТ «Харківський тракторний завод», ВАТ «Сальськсільмаш», ВАТ «Хмільниксільмаш» (рис. 2, рис. 3) [11, 37]. З країн дальнього зарубіжжя, наприклад, компанії MANITOU (Франція), CLAAS (Німеччина), табл. 1.1 - 1.3 [11, 37].

Таблиця 1.1

Технічні характеристики поширених машин для внесення твердих органічних добрив виробництва країн СНД

№ з/п	Показник	Марка розкидача							
		МТО - 6	МТО - 7	РТД - 7	РТД - 9	РТД - 14	МТТ - 9	МТУ - 13	
1.	Вантажопідйомність, т	6	7	7	9	14	9	13	
2.	Доза внесення добрив, т/га	15,30,45		15,30,45			10...60		
3.	Робоча ширина захвату, м	4-8	6-9	6-9	8-12	8-12	5-8	5-8	
4.	Агрегатується з трактором, кл	1, 4			2, 3	3	2,3	3	
5.	Виробник	ВАТ «Ковельськільмаш»					ВАТ «Бобруйськ-агромаш»		



Рис. 1.2. Розкидач твердих органічних добрив РТД - 9

Конструктивними відмінностями машин моделей РТД є вертикальне розміщення робочих органів для розкидання добрив. У розкидачів моделей МТО, МТТ і МТУ робочі органи розміщені горизонтально. Машини виробництва ВАТ «Ковельсьільмаш» можуть використовуватись як тракторні причепи для транспортування сільськогосподарських вантажів при умові встановлення заднього борту замість розкидаючих робочих органів.



Рис. 1.3. Розкидач твердих органічних добрив МТТ - 9

Машини для внесення органічних добрив підприємств дальнього зарубіжжя (табл. 1.2 і 1.3) відрізняються оригінальними конструктивними рішеннями за рахунок значних фінансових інвестицій у виробництво техніки.

Таблиця 1.2

Технічна характеристика імпортованих машин для внесення твердих органічних добрив боковими і вертикальними робочими органами

№ з/п	Показник	Марка, модель розкидача					
		8114	8124	8150	ORION 60PRO	ORION	130TPRO
	Об'єм кузова, м	4,7	9,1	18,9	5,0	8,0	10,7
2.	Вантажопідйомність, т	6800	10900	22680	4430	5300	9100
3.	Робоча ширина захвату, м	8-9	10-12	8-9	9-10		
4.	Робочі органи	Боковий ротор з молотками			4 вертикальні вали з сегментними лопатками		
5.	Маса машини конструктивна, кг	2087	3538	8909	1570	2700	3900
6.	Необхідна потужність від ВВП, кВт	60	88	165	3	59	74
7.	Виробник	Група KUHN, Франція			SIP Sempeter, Словенія		

Особливостями машин з системою PROTWIN SLINGER (рис.1.4) є універсальність. Вони обладнані транспортером і ротором із підвішеними молотками, за допомогою яких технологічний матеріал (гній, підстилка для тварин, пісок) розкидається на лівий бік за ходом руху агрегату.



Рис.1.4. Розкидач KUHN з системою PROTWIN SLINGER

Машини ORION (рис. 1.5) обладнані транспортером і чотирма вертикально встановленими валами з сегментними лопатками для розкидання гною чи компосту по поверхні поля. При демонтажі валів і встановленні

заднього борту (засувки) розкидач може використовуватись як тракторний причіп. Французька група компаній KUNH пропонує також оригінальні розкидачі органічних добрив типу ProPush 2000 чотирьох моделей вантажопідйомністю 13т і 16 т. Характерною відмінністю їх є наявність у кузові додаткової передньої штовхаючої стінки, яка подає органічні добрива до розкидаючих робочих органів. Час повного проходження стінки дорівнює 35с-45с. Конструктивними особливостями машин ORION 130TH PRO і HTS 20.4 є наявність двох горизонтальних ступінчасто розміщених валів зі знімними зубами. Під валами знаходиться площадка з двома роторами тарілчаного типу, як у машин для внесення мінеральних добрив. У результаті ширина захвату агрегату збільшується у два-три рази (з 8м-12м до 18м-24 м) [11].



Рис.1.5. Розкидач ORION 130TH PRO

Таблиця 1. 3

Технічна характеристика імпортованих машин для внесення твердих органічних добрив дисковими робочими органами

№ з/п	Показник	Марка, модель розкидача	
		ORION 130TH PRO	HTS 20,4
1.	Об'єм кузова, м	10, 7	17,0
2.	Вантажопідйомність, кг	8900	2100
3.	Робоча ширина захвату, м	18-24	18-24
4.	Довжина, м	7,64	9,20
5.	Ширина, м	2,30	2,60
6.	Висота, м	3,02	3,00
7.	Агрегується з трактором, кл	2-3	3

При прямоточній технології внесення добрив значна частина робочого часу витрачається на транспортні роботи. Так, наприклад, при нормі внесення добрив 30 т/га, робочій ширині захвату агрегату 8 м, робочій і середньотехнічній транспортній швидкості руху, рівній відповідно 10 км/год і 18 км/год, відстанях перевезень 1 км - 5 км, співвідношення між часом транспортування (руху до поля і назад) і внесення добрив для різних машин знаходиться у межах (табл. 1.4) [11]: для МТО-6 – 4,7-22; РТД-9 – 3-14,3; РТД-14 – 2-9,4.

Таблиця 1.4

Співвідношення між часом транспортування і спорожнення при внесенні органічних добрив

Марка розкидача	Відстань до поля, км	Час транспортування, хв	Шлях спорожнення кузова, м	Час спорожнення кузова, хв	Відношення часу транспортування до спорожнення, разів
МТО - 6	1	7	250	1.5	4.7
	3	20	250	1.5	13.5
	5	33	250	1.5	22.0
РТД - 9	1	7	375	2.3	3.0
	3	20	375	2.3	8.7
	5	33	375	2.3	14.3
РТД - 14	1	7	583	3.5	2.0
	3	20	583	3.5	5.7
	5	33	583	3.5	9.4

При даних умовах найбільш обґрунтовано економічно вигідними можна вважати наступні граничні віддалі для випадку прямоточної роботи при внесенні добрив для машин: МТО-6 – 1 км; РТД-9 – 3 км; РТД – 14-5 км.

Усунути транспортну операцію машинного агрегату для внесення добрив, а отже значно збільшити його продуктивність, можна за рахунок впровадження перевантажувальної технології внесення твердих органічних добрив. Органічні добрива транспортуються тракторами з причепами, або автомобілями-самоскидами і буртуються на краю поля. За потребою, при основному обробітку ґрунту, добрива навантажуються у розкидачі і вносяться на поверхню поля. Відстань перевезень добрив розкидачами при перевалочній технології обмежується, у середньому, половиною довжини гону поля. Для цього використовують розкидачі типу РПО (ВАТ «Ковельсільмаш»). Добрива з гноєсховища, або польового бурту навантажуються у самоскидні транспортні засоби вантажопідйомністю до 6 т, доставляються до місця внесення і перевантажуються у розкидач. Ширина захвату агрегату який складається із трактора МТЗ-80 і машини РПО-6 становить 10 м - 12 м, продуктивність за годину основного часу – до 10 га. При внесенні рідких органічних добрив основною є прямоточна технологія внесення добрив із використанням самозавантажувальних цистерн - розкидачів (табл. 1.5, рис. 1.5, 1.6). При великих відстанях перевезень (більше 4-6 км) і нормах внесення (40 т/га і більше) добрива вносять за потоково-перевалочною технологією [11]. Їх доставляють транспортувальником - перевантажувачем на базі автомобіля, або трактора, також звичайними цистернами-розкидачами типу МЖТ (РЖТ) у пересувну польову місткість – компенсатор типу ЕЖУ-25 вантажопідйомністю 22 т. Для внесення рідких органічних добрив разом із РКД, або аміачною водою передбачено додатковий бак місткістю 1,4 м³. При необхідності добрива забирають цистернами-розкидачами МЖТ, МЖУ, РЖТ, вносять на поверхню поля і заробляють у ґрунт. Розрив у часі внесення і зароблення повинен бути не більше 2 годин.

Таблиця 1.5

Технічна характеристика машин для поверхневого внесення рідких органічних добрив

№ з/п	Показник	Марка, модель розкидача					
		МЖТ – Ф-6	МЖТ – 6Ш	МЖТ – Ф-11	МЖУ – 16	РЖТ - 3	РЖТ – 4М
1.	Вантажопідйомність, кг	6	6	11	16	3	5.5
2.	Час самозавантаження, хв	4-7	4-7	4-7	4-7	3-6	3-6
3.	Робоча ширина захвату, м	6-12	12	6-12	6-12	6-12	6-12
4.	Доза внесення, т/га.	10-60	10-60	10-60	10-60	10-60	10-40
5.	Глибина забирання рідини при самозавантаженні, м	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
6.	Довжина, м	6.5	6.5	8.0	8.9	4.2	6.1
7.	Ширина, м	2.5	2.5	2.5	2.8	2.1	2.1
8.	Висота, м	3.5	3.8	3.4	3.6	2.5	2.5
9.	Агрегатується з трактором, кл	1.4	1.4	2-3	3	1.4	1.4-2
10.	Виробник	ВАТ «Бобруйськагромаш»				ВАТ «Оршагропромаш»	



Рис. 1. 5. Цистерна-розкидач типу МЖТ

Крім технології роздільного поверхневого внесення і зароблення рідких добрив у ґрунт використовується технологія і відповідна техніка для суміщення таких технологічних операцій (табл. 1.6). Добриво заробляється у ґрунт культиваторними стрілочастими лапами, цим запобігаються можливі втрати від випаровування в атмосферу [11]. Представником закордонного виробника машин для внесення рідких органічних добрив є відома компанія JOSKIN.

Таблиця 1.6

Технічна характеристика машин для внесення рідких добрив

Показник	Марка (модель)		
	АВА - 8	QUADRA	EUROLINER
Призначення для добрив	Рідкі комплексні, КАС, аміачна вода, гноївка	Гноївка	Гноївка
Об'єм місткості для добрив, м ³	4	20	26
Ширина захвату, м	8	9-18	9-18
Робоча швидкість руху, км/год	6-12	8-12	8-12
Глибина зароблення добрив у ґрунт, см	6-12	12-15	12-15
Агрегується з трактором, клас	3	3	3-4
Виробник	ВАТ «Уманьфермаш»	Компанія JOSKIN (Бельгія)	



Рис.1.6. Машина для внесення рідких добрив Joskin серії QUADRA

У зв'язку зі значним зменшенням поголів'я великої рогатої худоби, а отже органічних добрив тваринного походження, актуальними є використання органічних добрив рослинного походження (соломи бобових культур, гички цукрових буряків, стебел кукурудзи, соломи зернових колосових). Проте для

компенсації азоту, який витрачається на перепрівання тонни соломи, необхідно внести 10 кг діючої речовини азотних добрив. Тонна маси сидеральних культур (ріпак, гірчиця, та ін.), подрібнена і зароблена в ґрунт, рівноцінна тонні твердих органічних добрив при в 3-5 разів менших витратах праці і коштів. Ефективність використання сидерату як органічного добрива значно збільшується на віддалених від гноєсховища полях. Основним рослинним органічним добривом є подрібнена солома. Тонна подрібненої соломи внесена на поверхню поля за поживністю рівноцінна 3,5 т - 4 т гною. Для її подрібнення використовують подрібнювачі рослинних решток вітчизняного (ПН-2,0, ПН-4,0 (ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ); ПРН-4,5 (Красилівський машинобудівний завод)) і зарубіжного (John Deere 120, моделей RC і RM відповідно компаній RHINO і KUHN) виробництва.

Лідерами у розробці і виготовленні розкидачів мінеральних добрив є фірми "Sulky Burel S.A." (Франція), "KVERNELAND" (Норвегія), "KUHN", "AMAZONE", "RAUCH", (Німеччина), "AGROMET", (Польща). Домінуючим напрямком розвитку машин для внесення мінеральних добрив є підвищення ефективності за рахунок покращення якості внесення, підвищення продуктивності, впровадження комп'ютерних систем контролю і управління технологічним процесом. Аналіз конструкцій машин для внесення мінеральних добрив та їх робочих органів з точки зору ефективності застосування в керованому землеробстві свідчить, що вони мають ряд недоліків – точність внесення заданої норми і точність з позиції просторової орієнтації, зокрема, це стосується машин з дисковими робочими органами. Основні недоліки вказаних машин: висока нерівномірність розподілу мінеральних добрив за шириною захвату машини, нестабільність ширини захвату, довільний перерозподіл мінеральних добрив в межах ширини захвату та неможливість регулювання траєкторії польоту частинок мінеральних добрив після їх сходження з розсіювального диска. Також дані робочі органи чутливі до зміни рельєфу поверхні поля і погодних факторів, зокрема вітру. Вказані недоліки роблять недоцільним застосування технології змінних норм внесення мінеральних

добрив на машинах з дисковими робочими органами. Основні вимоги, які ставляться до таких машин в керованому землеробстві – це стабільність ширини захвату та можливість контрольованого перерозподілу мінеральних добрив у напрямку руху енергозасобу і по ширині захвату сільськогосподарської машини відповідно до визначених характеристик поля стосовно конкретної його ділянки. Більшою мірою даним вимогам відповідають агрегати для локального внесення мінеральних добрив (тукові сівалки) та машини з штанговими робочими органами. При цьому машини для локального внесення твердих мінеральних добрив за своїми агротехнічними характеристиками поступаються машинам з штанговими робочими органами. В свою чергу, тукові сівалки мають невелику ширину захвату, тому використання їх у широкозахватних агрегатах має негативні наслідки з причин низької маневреності. Таким чином, для використання в керованому землеробстві пріоритет мають машини з штанговими робочими органами. Вони мають сталу ширину захвату та досить високу рівномірність внесення мінеральних добрив і менш чутливі до змін рельєфу поверхні поля, їхні робочі органи більш придатні для застосування контрольованого перерозподілу мінеральних добрив по ширині захвату машини [309]. Машини для внесення твердих мінеральних добрив (рисунок 1.7, 1.8) складаються з вузлів: рами, бункера, подавального і дозувального пристроїв, туковисівних апаратів, механізму регулювання норми висіву, приводу робочих органів, зворушувача, сітки і тенту.



Рис. 1.7. Машина для внесення твердих мінеральних добрив МРД – 4



Рис. 1.8. Машина для внесення твердих мінеральних добрив МРД – 5М

Рама машин є просторовою зварною трубчастою конструкцією, на якій кріпляться бункер, механізми приводу машини та керування дозувальними заслінками. Бункер є ємністю для добрив і має форму перевернутого зрізаного конуса, або піраміди з відбортовкою верхнього краю. В дні бункера розміщені два випускних вікна, ззовні приварена планка з пазом для фіксації дозувальних заслінок. Подавальний пристрій призначений для безперервної подачі добрив на туковисівний апарат. Дозувальний пристрій з механізмом регулювання норми висіву забезпечує задану норму висіву шляхом зміни розмірів випускних вікон і складається з поворотного важеля, гідросистеми, тяги та рукоятки. Керування гідроштовхачем відбувається з кабіни трактора. Механізм регулювання норми внесення використовується для встановлення заданої норми. Туковисівний апарат дисковий, зворушувач ексцентрикового типу. Для запобігання попадання сторонніх предметів у подавальний пристрій встановлюється сітка. Механізм приводу складається з одноступінчатого редуктора та телескопічного карданного вала. Привід здійснюється від вала відбору потужності трактора [286].

Машини для розкидання добрив призначені для поверхневого внесення твердих мінеральних добрив у гранульованому і кристалічному вигляді, сівки сидератів в усіх ґрунтово-кліматичних зонах, на полях з схилом до 8 градусів. Розкидачі з більшою місткістю бункера забезпечують вищу продуктивність

роботи за змінним часом за рахунок зменшення затрат часу на переїзди до місця завантаження. Розкидачі фірми KUHN (Франція), марки MDS 935Q обладнані пристроєм QUANTRON M, в якому використовуються електричні датчики для керування заслінками. Розкидачі виготовляються з ємністю бункера від 900 літрів до 4000 літрів, окремі комплектуються обладнанням для двохповерхневого розкидання добрив в садах і виноградниках, а також семирядним обладнанням для обробітку в рядках з міжряддям до 90 см. Розкидачі моделі MDS 1132K, MDS 1142R, MDS 1132 QM та MDS 1142 QM передбачають установку додаткового обладнання для збільшення об'єму бункера до 3200 літрів, а також навантажувачем для великих мішків (LEVSAK). Напівпричіпні розкидачі фірми BREDHAL (Данія) з пневматичними гальмами мають розкидальні диски збільшеного діаметра, щоб надати гранулам добрива якомога більшу швидкість на виході з розкидача для мінімізації впливу вітру. Розкидачі марки K135 монтуються на двомісному шасі, всі інші моделі – на одновісному шасі з різними типами шин. Розкидачі фірми AGROMET (Польща) моделі N042, N029, N029/E, N012, N012/S виготовлені у формі зрізаного конуса, ємність бункерів –190 кг, 220 кг, 300 кг та 4000 кг. Розкидачі моделі N039/M, N041, N053 виготовлені у формі двох зрізаних пірамід із надставками. Привід розкидачів здійснюється від ВВП трактора.

Для механізованого завантаження машин розроблено завантажувач Біг-Бег Т441 вантажопідйомністю 1000 кг, максимальна висота підйому – 4,75 м, виліт стріли – 2,3 м, маса – 300 кг. Розкидачі N039, N041 можуть комплектуватися універсальним двоколісним візком масою 320 кг, з шириною колії від 1500 мм до 1800 мм. Крім навісних розкидачів, фірма виготовляє напівпричіпні на одновісному та двовісному шасі. Розкидачі моделі N011, N014, N016/1, N046, N035, N032, N032/1 змонтовані на одновісному шасі, N052 – на двовісному шасі. Розкидачі N032, N032/1 обладнані пневматичною системою внесення мінеральних добрив, на всіх інших моделях застосовується відцентровий розкидальний пристрій. Мінеральні добрива подаються транспортером до дисків. За типом агрегування розкидачі поділяються на

навісні та причіпні. Робоча ширина – від 10 м до 42 м. Ємкість бункерів – від 4000 л до 3200 л., частота обертання дисків – 980 об/хв. Крім навісних розкидачів, фірма виготовляє напівпричіпний розкидач міндобрив TWS 7000 (TWS 7000). Конструкція розкидача базується на комбінації стандартного розкидача міндобрив з трьохточковою навіскою і транспортним візком великої місткості.

Розкидачі AMAZONE типу ЕК (Німеччина) з місткістю бункера 200 л. та 400 л. мають форму зрізаного конуса, поверненого меншою основою донизу. Навісні дводискові розкидачі ZF-XW, ZA-X, ZA-M/S мають форму зрізаної піраміди, поверненої меншою основою донизу. Крім навісних розкидачів мінеральних добрив, фірма AMAZONE виготовляє напівпричіпні розкидачі на одновісному та двовісному шасі з двохмагістральною гальмівною системою. Ходова частина може бути з жорсткою підвіскою, або підресореною [286, 309]. Бункери виготовляються з боковим підсиленням (рис.1.9).



Рис. 1.9. Розкидач AMAZONE - ZG-B 8200 Ultra Hydro

На відцентрових розкидачах AMAZONE для регулювання та контролю дози внесення добрив встановлюються електричні системи, що забезпечують стабільність дози внесення добрив за будь-якої швидкості руху агрегату та ширини його захвату. Причіпний пневматичний розкидач добрив DTP 12 фірми "НОДЭ ГУЖИС" (Франція) має систему розподілення добрив з неіржавіючими чистиками, а також коробку передач із зміною норми внесення добрив незалежно від швидкості руху розкидача. Крім цього, фірма випускає причіпний шнековий розкидач мінеральних добрив DE 528. Розкидачі фірми KVERNELAND (Норвегія), зокрема Penton RS-M 700, є причіпними з об'ємом бункера 7000 л. Переміщення добрива всередині бункера на розсіювальні лопаті здійснюється за допомогою шнека. Рух шнека здійснюється за допомогою гідравлічного приводу, швидкість забезпечується за допомогою гідростатичного приводу і регулюється в залежності від кількості добрив. Шнек самостійно налаштовується у відповідний момент часу на запуск і зупинку транспортування на розсіювальні диски для отримання оптимального розподілення добрив всередині бункера. Відмінністю розкидачів фірми KVERNELAND є спосіб подавання добрива від дозувального пристрою на лопаті з центральної ротаційної обертової камери. Кількість лопатей – 18 шт. Гранули добрив надходять на лопаті вже находячись в рухомому стані. Такий розгін гранул перешкоджає їхньому руйнуванню при попаданні на лопаті розсіювального диска, тим самим зберігаючи якість добрив. Особливістю конструкції розкидачів фірми Sulku Burel S. A. (Франція) є те, що вони мають пристрої для збільшення об'єму бункера, а також вібраційну мішалку, яка запобігає утворенню налипання грудочок добрив. Керування заслінками доз внесення добрив здійснюється з кабіни трактора. Розкидачі даної фірми виготовляються з місткістю бункера від 2000 л. до 3200 л. Причіпний пневматичний розкидач добрив моделі S80, S120, S160M фірми SULKY BUREL (Франція) має об'єм бункера 6400 л., 9100 л., 1450 л., а також пасову систему приводу робочих органів для згладжування ривків та ударів. Машина для внесення добрив фірми Challenger (США) марки TerraCator 8103 обладнана кузовом для мінеральних

добрив, які розподіленні на три секції: для азотних, фосфорних та калійних добрив [286, 309]. Вантажопідйомність TerraCator 8103 з причепом становить 24 т. (рис.1.10).



Рис.1.10. Розкидач TERRAGATOR

Внесення добрив здійснюється через штангову сівалку. Добрива транспортуються матеріалопроводами за допомогою стиснутого повітря. На машині TerraCator 8103 розміщено Differential GPS, що дозволяє вносити добрива в залежності від потреби рослини в поживних речовинах. У пневматичних розкидачах фірми Nodet Gouqis застосовується бункер W-подібної форми, на днищі якого встановлено два ряди індивідуальних котушок дозаторів для кожного з 36 проводів. Доза внесення добрив регулюється шляхом зміни частоти обертання котушок за допомогою коробки 82 передачами. Для очищення котушок від вологи добрив застосовуються очисні скоби з неіржавіючої сталі. Норма внесення гранульованих добрив регулюється в межах від 40 кг/га до 1600/га кг, а мікрогранульованих – від 2 кг/га до 95 кг/га. Ширина захвату штанги становить 18 м і складається з п'яти частин, шарнірно з'єднаних між собою. На штанзі встановлено компенсуючі пружини, які забезпечують полегшення переведення машини з робочого положення в транспортне і навпаки, а також амортизують поштовхи під час руху машини нерівностями полів. В результаті опрацювання інформації від іноземних фірм – виробників про тенденції розвитку та технічний рівень машин

для внесення твердих мінеральних добрив встановлено, що основними напрямками розвитку розкидачів з позиції підвищення продуктивності є [286, 309]:

- застосування електронних пристроїв керування заслінками;
- встановлення на розкидачах надставок для збільшення об'єму бункера;
- розміщення вібраційних мішалок або зворушувачів ексцентрикового типу для запобігання утворенню склепінь в добривах;
- застосування лазерних сенсорів для визначення недостачі поживних речовин;
- застосування в пневматичних розкидачах систем розподілення добрив з неіржавіючими чистиками;
- переміщення добрив в бункері на розсівні лопаті за допомогою шнека;
- подавання добрив від дозувального пристрою на лопаті з центральної ротаційної камери;
- гідростатичний привід шнека;
- застосування пневматичних або гідравлічних гальмівних систем в напівпричіпних розкидачах;
- використання розкидних дисків збільшеного діаметра для надання гранулам добрив більшої швидкості на виході для мінімізації впливу вітру;
- завантаження добрив в розкидач за допомогою механізованого завантажувача;
- комплектування розкидачів універсальними двоколісними візками;
- комплектування розкидачів обладнанням для рядкового внесення добрив;
- розміщення на самохідних розкидачах кузовів, поділених на три секції: для азотних, фосфорних та калійних добрив;
- застосування глобальної системи позиціонування Differential GPS;
- транспортування добрив стиснутим повітрям через штангову сівалку.

За проведеними дослідженнями [13] ринок «Розкидачі органічних та неорганічних добрив» є консолідованим, виробничі потужності зосереджено на менш ніж 10 підприємствах. Виробництво продукції асортиментного ряду «Розкидачі органічних та неорганічних добрив» в Україні в 2012 р. складало суму порядку кілька тисяч гривень, даний ринок є стабільним, але в зв'язку з

нещодавнім виходом з ринку деяких виробників ситуація може швидко змінитися. Сектор в цілому є імпортозалежним. Така ситуація зберігається зокрема на протязі останніх півроку. Імпорт продукції асортиментного ряду «Розкидачі органічних та неорганічних добрив» в Україну в 1 кв. 2013 р. склав понад 2 млн. 400 тис. USD, що на 1785% більше у порівнянні з попереднім кварталом. Сектор демонструє зростання споживання на внутрішньому ринку. Виробничі потужності виробників машин для внесення добрив зосереджені на малій кількості підприємств, ринок «Машин для внесення добрив» консолідований. Виробництво продукції даного асортиментного ряду в Україні у 2012 р. становить більше 8 млн. 200 тис. грн., у порівнянні з минулим роком ріст 17%. Імпорт продукції у 1 кв. 2013 р. склав 2 млн. 400 тис. USD, що на 1785% більш в порівнянні з попередніми показниками, ринок залежить від іноземних підприємств (рис. 1.11).

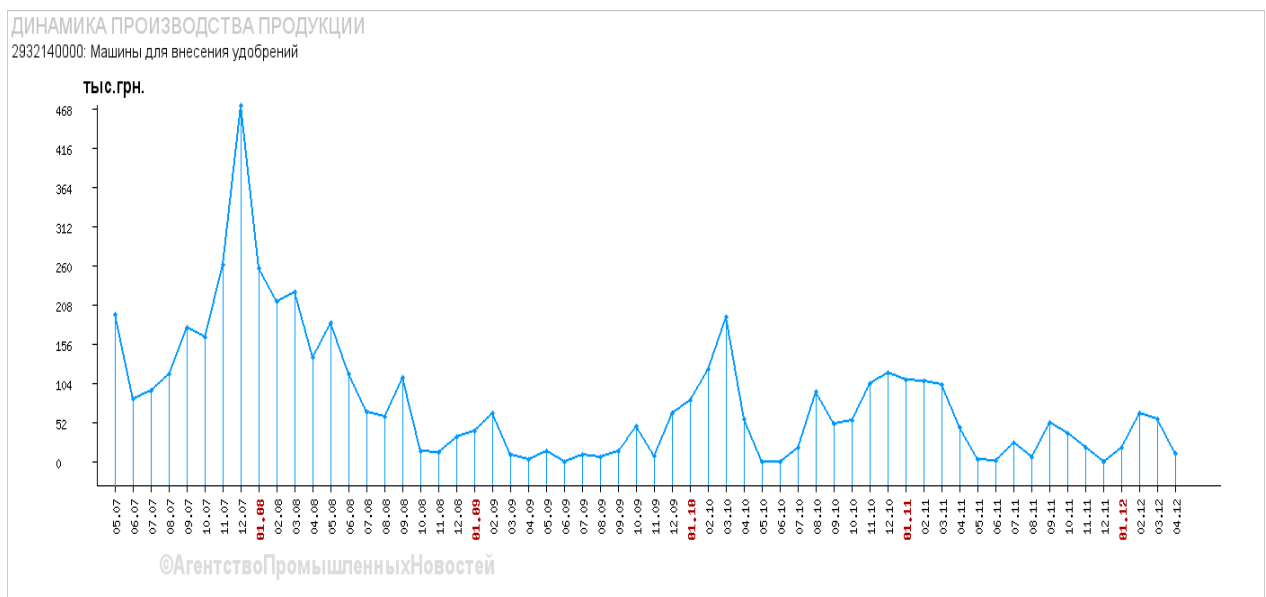


Рис.1.11. Динаміка виробництва в Україні машин для внесення добрив

Тенденції розвитку сучасної сільськогосподарської техніки у розвинутих країнах свідчать про помітне підвищення економічної ефективності. За останні роки потужність пропонованих провідними виробниками нових моделей сільськогосподарських машин зростає до двох разів, що підвищує їхню продуктивність, сприяє зниженню втрат урожаю при підвищенні якості

виконання робіт і показників надійності. Очевидно, на сьогодні тенденціями розвитку сільськогосподарських машин в Україні також є обладнання техніки електронними системами керування технологічними процесами, впровадження енергозберігаючих технологій. При цьому удосконалення аграрних технологій, підвищення продуктивності машин за рахунок збільшення ширини захвату і пропускної здатності машин призводить до ускладнення конструктивно-компонувальних схем машин, габаритних розмірів, як наслідок збільшення маси, актуальним є забезпечення показників надійності і довговічності сільськогосподарської техніки.

1.2. Особливості корозійних пошкоджень техніки у сільському господарстві

На швидкість корозійних руйнувань сільськогосподарської техніки впливає ряд факторів, які типово поділяються на внутрішні і зовнішні [73, 103, 138, 245, 246]. Внутрішні фактори корозії пов'язані з природою і структурою металів, конструктивними особливостями складових одиниць, деталей, ін. Зовнішні фактори визначають протікання корозійних руйнувань під впливом навколишнього середовища. Атмосферна корозія металів є найбільш поширеним видом корозії – 80% металевих конструкцій експлуатуються в атмосферних умовах. Умови протікання корозійного процесу визначаються кліматичними факторами, знаходячись в прямій залежності від кліматичних зон України. Також на стан техніки великий вплив чинять способи її зберігання, у залежності від методу зберігання техніка може знаходитися в наступних мікроумовах [73, 103, 138, 245, 246, 272, 273]:

1. На відкритій площадці, або під навісом. Характерно: відсутність ділянок з нерухомим повітрям, значні добові перепади температури з конденсацією

вологи, сонячна радіація, вплив на техніку опадів у вигляді дощу, снігу, туману.

2. Сховища без опалення. Характерно: періодичний обмін повітря (провітрювання), наявність зон з застоями повітря, високі добові перепади температури, конденсація вологи, тривалий контакт з одним і тим же повітрям.
3. Сховища з опаленням. Характерно: температура повітря $5^{\circ}\text{C} \dots 20^{\circ}\text{C}$, допустима відносна вологість - 85%, допустимий добовий перепад температур – не більше 12°C , відсутність конденсату.

Швидкість атмосферної корозії сільськогосподарської техніки зв'язана з кліматичними параметрами регіонів, також ступенем забруднення атмосфери пиловидними частинками органічного та неорганічного походження, корозійно-активними газами. Вибором методу зберігання техніки можна впливати на ступінь дії середовища, оцінкою якої є швидкість корозії. Протикорозійний захист має велике значення для забезпечення працездатного стану техніки і зниження витрат на ремонт і технічне обслуговування. Надзвичайно важливим є вирішення проблематики протикорозійного захисту сільськогосподарської техніки у аграрному виробництві, гострою є необхідність всебічних досліджень процесів корозії, корозійної втоми і корозійно-механічного зносу, про що свідчать дослідження вчених Баранова В. Є., Курочкина В.Н., Латишенка М. Б., Мітягіна В. А., Меламеда М. Н., Поцкалева А. Ф., Прохоренкова В. Д., Петрашева А. І., Пучина Е. А., Пасечнікова Н. М., Простоквашина В. Г., Сєверного А. З., Сєвернева М. М., Спектра А. Г., Синявського І. А., Щукіна А.Р., Яковлева Б. П., ін. У наукових працях сформульовано загальні принципи системного забезпечення збереженості машинно - тракторного парку, розроблено технологічні та технічні методи виконання робіт з забезпечення протикорозійного захисту сільськогосподарської техніки [1, 9, 17, 18, 19, 73, 139, 246, 274, 276]. Також, на сьогоднішній день, користуються нормативами ГОСНИТИ, ВИИТиН, ВИМ, основоположними нормативними документами ГОСТ 7751-85 «Техника,

используемая в сельском хозяйстве: правила хранения», «Руководство по консервации и противокоррозионной защите машинно-тракторного парка», ін.

Наслідки економічної кризи для сільськогосподарських товаровиробників виявилися катастрофічними. Низькими темпами триває оновлення МТП. Характерною ознакою сьогодення стало використання техніки, фактичний термін служби якої перевищив нормативний в рази. У зв'язку з вищесказаним, багаторазово зростає необхідність проведення заходів, спрямованих на підтримку ресурсу діючих машин, в тому числі виконання робіт щодо забезпечення збереженості та протикорозійного захисту МТП. Для захисту сільськогосподарської техніки від корозії, корозійної втоми і корозійно-механічного зносу передбачено ряд відомих заходів. Проте на практиці існує великий дефіцит матеріалів з ряду причин [73, 269, 274, 276]:

- недостатня за наповненням наукова концепція розробки захисних матеріалів, в результаті чого вони мають низьку ефективність, обмеження в застосуваннях і відсутність поліфункціональних властивостей;
- відсутня концепція підвищення рівня корозійно - втомної пошкоджуваності сільськогосподарських машин, зокрема мобільних, в результаті чого техніка має низький рівень надійності внаслідок пошкоджень даного типу. Втрати в економічній ефективності з причини ряду обмежень у застосуванні;
- обмежений випуск протикорозійних матеріалів великими підприємствами, з причин, що рентабельність їхнього виробництва не може конкурувати з прибутком від виробництва паливо – мастильних матеріалів.

Також мають місце проблеми з придбанням технічних засобів для нанесення консерваційних матеріалів в'язкості в широкому спектрі при знижених температурах навколишнього середовища.

Перед фермерськими господарствами проблема зберігання машин стоїть гостріше, в порівнянні з агрохолдингами, які у роботі застосовують коштовні імпорتنі матеріали і техніку. Невеликі господарства в аграрному виробництві використовують техніку в межах 50 днів на рік, причому часто повністю відсутні криті майданчики і стоянки з опаленням та твердим покриттям для

зберігання машин. У багатьох с/г підприємствах бракує фахівців, здатних займатися підготовкою до зберігання, обслуговуванням під час зберігання і зняття техніки із зберігання. Це призводить до завищених витрат коштів на відновлення машин до працездатного стану, скорочує термін служби техніки [73, 274, 276, 284].

Аналіз умов роботи розкидачів органічних і мінеральних добрив, зернозбиральних комбайнів, тракторів, іншої техніки дозволив виявити основні фактори, які викликають руйнування деталей, складальних одиниць і з'єднань [174, 176, 198, 273, 274]:

- агресивність і абразивність зовнішнього середовища, що зумовлено наявністю ґрунту і добрив на поверхнях сільськогосподарських машин;
- вплив температури і атмосферних опадів, що сприяє утворенню поверхневої вологої плівки;
- нерегулярні динамічні навантаження;
- початковий стан поверхонь: шорсткість, твердість і т. д.

Постійний вплив комбінацій вказаних факторів викликає корозійні пошкодження і руйнування найбільш типовими видами яких є: атмосферна корозія, корозійно-механічний знос, корозійна втома, корозійне розтріскування, фретинг - корозія. Дослідження стану сільськогосподарської техніки, особливо мобільної, після 1 ... 3 років експлуатації дозволяє зробити висновок: корозійного впливу в тій чи іншій мірі зазнають більше 70 ... 80% складових одиниць і деталей машин. Отже, корозійні пошкодження і корозійно - втомне руйнування є об'єктивним і закономірним результатом впливу оточуючого середовища, динамічних навантажень, термодинамічної нестійкості металевих матеріалів з яких виготовлені деталі сільськогосподарських машин. Корозійні руйнування викликають втрату в масі, інтенсифікують зношування з'єднань, змінюють величину шорсткості поверхонь деталей, знижують втомну міцність, викликаючи появу різноманітних тріщин і розривів металу, особливо в тонкостінних металоконструкціях і зварних з'єднаннях. Внаслідок цього

знижується працездатність і ресурс машин та їх елементів, зростають затрати на ремонт, усунення наслідків відмов [73, 204, 205, 273, 274, 276].

Аналіз критеріїв граничного стану систем, агрегатів і складових одиниць зернозбирального комбайна СК-5 показав, що такі ресурсні відмови, як граничні деформації корпусів жатки, похилої камери і молотильного апарата, зношування, тріщини з'єднань і складальних одиниць основних систем викликані сумісним впливом механічних і кліматичних навантажень оточуючого середовища і супроводжуються корозією металу. Для комбайнів СК-5 і тракторів К-701, що надійшли в перший капітальний ремонт після 2 - 3 років експлуатації корозійними руйнуваннями пошкоджено 224 найменувань складальних одиниць комбайна 150 складальних одиниць трактора. Площа корозійних пошкоджень кожної деталі чи складальної одиниці становила від 15 до 90% поверхні [73].

Для дослідження характеру та особливостей корозійних руйнувань відібрано 141 типову деталь комбайна [275]. За критерій відбору взято площу корозійного пошкодження 25% і більше для кожної деталі. В номенклатуру увійшли найбільш вражені корозією деталі різального апарата, кріплень, ланцюгів, шківів, зірочок, а також деталі з тонколистової сталі, які при ремонті потребують заміни, або ремонтних робіт, також проведення додаткових протикорозійних заходів (ПКЗ). Перелік корозійних руйнувань, корозійно - механічного зношування (КМЗ) перед першим капітальним ремонтом типових складових комбайна СК-5 та трактора К-701 представлено в табл. 1.7 і табл. 1.8. Наслідки корозійних пошкоджень деталей і з'єднань зернозбирального комбайна оцінюються показниками шорсткості поверхонь. Профілограми, зняті з деталей машин, показують, що максимальна глибина корозійного ураження на сталених поверхнях може досягати 220 мкм [73, 273, 275]. В табл. 1.7 представлено дані про корозійні пошкодження кришки кожуха з листової сталі звичайної якості елеватора комбайна СК-5 і бака вентиляторного обприскувача ОВТ, визначено корозійні пошкодження в межах 30 - 220 мкм, клас шорсткості 6 [275], причому у результаті різких перепадів зміни шорсткості поверхні

деталей, вони не забезпечують технічні вимоги за чистотою обробки. Для тонколистових металоконструкцій загальновідома умова $\delta_{\min} \geq 0,5\delta_{\text{п}}$, де δ_{\min} , $\delta_{\text{п}}$ – мінімальна і початкова товщина металу, мм. При її недотриманні корозійні пошкодження вважаються небезпечними [73, 275].

Таблиця 1.7

Зміна шорсткості поверхні тонколистових сталевих конструкцій у залежності від технології очистки і зберігання

Назва деталі	Глибина корозії через 12 місяців, мкм		
	Залишки нітрофоски і розчину сульфату амонію на поверхні	Залишки пилу, продуктів обмолоту на поверхні	Поверхня очищена в умовах відкритого атмосферного середовища
Бак вентиляторного обприскувача ОВТ	180...200	-	50...60
Кришка кожуха зернового елеватора СК-5	-	50...70	32...35

Корозійні руйнування сільськогосподарської техніки, встановлені при першому капітальному ремонті

Назва (номер за каталогом)	Місце розташування і причини корозійних руйнувань	Площа враження корозією, %	Характер, вид і механізм корозійних руйнувань
Комбайн СК-5 «Нива»			
Ріжучий апарат (Р230.00.000)	Сегменти, палець, головка, спинка, шнеки і зірочки: дія АФ і АС, стирання; ненадійний ПКЗ	84,17	КМЗ, загальна щілинна корозія
Привід ножа (Н069.02.000-01)	Аналогічно	51,67	КМЗ, загальна щілинна корозія
Мотовило (54-1-1 А) з Механізмом регулювання	Робоча поверхня роликів-ексцентриків, їхні осі в місцях тертя: наявність АС і відсутність ПКЗ, стирання. Місця приєднання планок: контакт різномірних матеріалів	54	КМЗ, контактна корозія
Похила камера (А54-1-4)	Корпус похилої камери в місцях кріплення циліндрів, внутрішня поверхня і транспортер по робочих поверхнях планок і ланцюгів: дія АС, стирання ланцюгів, відсутні ПКЗ	44,5	Контактно-щілинний ефект КМЗ
Транспортер (54-1-4-А)	Аналогічно	70,83	КМЗ
Підшипник з разовим мастилом	Ущільнення підшипників: ненадійна герметизація, витікання мастила, проникнення вологи (особливо при очистці)	13	Загальна корозія робочої поверхні, КМЗ
Різьбові з'єднання випускного тракту	Періодичне охолодження і нагрівання, АФ і газу:	100	Газова корозія
пальчикового механізму жатки, молотарки, похилої камери і копичника	АС в місцях кріплення Поверхні болтів і різьби: дія АФ і АС, розтягуючі зусилля, відсутні ПКЗ	72 87,28	Контактно-щілинний ефект Щілинна корозія

<p>Ланцюгові передачі</p> <p>ланцюги 44-2-22,6; 54-2-25-БА; ПР-19,05-2500; ПР-12,7-900, ін.</p> <p>Зірочки молотарки</p> <p>Шків</p> <p>Тонколистова обшивка молотарки, жатки</p> <p>Шнек жатки (А54-1-2-2-1)</p> <p>Циліндро - поршнева група</p>	<p>Робочі поверхні ланцюгів і зірочок:</p> <p>дія АС, стирання, відсутні ПКЗ</p> <p>Аналогічно</p> <p>Робоча поверхня і посадкові місця шківів: дія АС, стирання, ненадійні ПКЗ</p> <p>Днище жатки, внутрішні поверхні бункера і боковин молотарки, внутрішні поверхні кожуха зернового і колоскового елеваторів, кожухи шнеків, кожух вентилятора, зварні з'єднання : стирання ЛФП, механічні навантаження, наявність АС, ненадійні ПКЗ при зберіганні</p> <p>Всередині шнека, по кожуху зовні, кріплення центральній частині : дія АС, стирання</p> <p>Внутрішня поверхня гільз циліндрів, впускного і випускного клапанів, посадочних місць, днище поршня и канавки кілець: повна або часткова розгерметизація двигунів</p>	<p>90,9</p> <p>65,2</p> <p>61,98</p> <p>38,33</p> <p>61,67</p> <p>42,75</p>	<p>КМЗ, щілинна корозія</p> <p>КМЗ, загальна корозія</p> <p>КМЗ</p> <p>Загальна корозія, КМЗ</p> <p>КМЗ в центрі, щілинна корозія в зонах зварних з'єднань</p> <p>КМЗ, точкова загальна корозія</p>
Трактори К-701			
<p>Різьбові з'єднання ведучого моста</p>	<p>Робочі поверхні різьб, болтів, гайок і шпильок: вібрація, бруд, щілини, напруження розтягу, порушення, або відсутність ПКЗ</p> <p>Вся поверхня і місця з'єднань:</p>	<p>58,8</p>	<p>Контактно-щілинний ефект, корозійне прихоплення</p>

випускного тракту	періодичні охолодження, нагрівання, вплив вихлопна газів , ненадійні ПКЗ	73,57	Високотемпературна (газова) корозія, корозійне прихоплення
Різьбового з'єднання «кришка - розширювальний бак»	Поверхня різьби і місце приварки втулки до бака : АС , щілини і раковини	61,38	Щілинна корозія, корозійне прихоплення
Навісного обладнання	Вся поверхня і місця різьбових з'єднань : АФ , щілини , бруд , ненадійні ПКЗ	48,52	Контактно-щілинний ефект, корозійне прихоплення
Деталі тормозного механізму Ведучих мостів	Місця кріплення дашків , зона контакту осі в гальмівній колодці і супорті гальм , гальмівний барабан по робочих поверхнях: контакт різнорідних матеріалів, АФ , бруд , стирання (накладки, барабан), негерметичність	60,52	Контактно-щілинний ефект, корозійне зчеплення осі тормозних колодок в супорті, КМЗ барабана і накладок тормозних колодок
Тонколистова обшивка трактора	Кабіна , облицювання капота , місця кріплення передніх і задніх крил, внутрішня поверхня (вм'ятини , в місцях заварювання тріщин) : бруд , порушення ЛФП, вібрація	33,04	Рівномірна, поверхнева, щілинна корозія
Контейнер акумуляторних батарей	Внутрішня поверхня і нижня частина контейнера: розлив електроліту , скупчення бруду , атмосферних опадів	75,71	Рівномірна, виразкова корозія
Електрообладнання	Місця контакту електропроводки і кріплення приладів: контакт різнорідних матеріалів , старіння і руйнування ізоляції (під дією органічних і неорганічних продуктів , сонячної радіації)	61,29	Контактна корозія, біокорозія і старіння ізоляції
Деталі механізму навісного обладнання			

пальці (700.34.00.012-1, 700.46.28.210.259, 700.46.28.098 та інші.) Важелі верхнього вала (700.28.046/047)	Поверхня пальців: дія АС, стирання , низька якість мастила , відсутність ПКЗ	63,98	КМЗ, загальна корозія
Циліндро - поршнева група	З'єднання в місці підставки важелів під верхній вал : АС, велика площа контакту, ненадійний ПКЗ Внутрішні і зовнішні поверхні гільз циліндрів , впускний і впускний клапани, їхні сідла , поршень і кільця: розгерметизація , ненадійна підготовка до зберігання	66,17	Контактна корозія, корозійне прихоплення
Деталі системи охолодження	Крильчатка, вал водяного насоса, водяні труби дизеля , отвори водяної сорочки головки блоку і ін. : дія АС , порушення правил експлуатації	28,91	Загальна контактна точкова корозія, КМЗ, кавітаційна Корозія по зовнішній поверхні
Деталі котла обігріву	Крильчатка, вал водяного насоса, водяні труби дизеля , отвори водяної сорочки головки блоку і ін. : дія АС , порушення правил експлуатації Зовнішні поверхні котла в місцях прогорання і порушення ЛФП. Поверхня труб: вплив газів , періодичне охолодження	68,61	Кавітаційно-виразкова корозія
		48,96	Загальна і газова корозія

Примітка: ПКЗ - протикорозійний захист, АС - агресивне середовище, АФ - атмосферні фактори, КМЗ – корозійно-механічне зношування, ЛФП–лакофарбові покриття.

Отже, елементи с/г техніки які знаходяться в умовах агресивних середовищ навіть без дії навантажень, наприклад кришка кожуха зернового елеватора комбайна, через 3...4 роки можуть бути вибракувані з причини недостатньої міцності. В табл. 1.9 представлено величини корозійних руйнувань деталей К-701, які впливають на ресурс і роботоздатність машини [275]. За даними М. М. Севернева [269, 270] виходять з ладу внаслідок спільного впливу атмосферної корозії і механічних навантажень 70 ... 80% деталей машин, з них 20 ... 25% припадає на частку поломок від робочих перевантажень внаслідок втрати міцності з причин атмосферної корозії.

У конструкціях с/г машин, зокрема розкидачів органічних і мінеральних добрив, значна частина металоконструкцій знаходиться під впливом агресивних середовищ у поєднанні з динамічними навантаженнями, виникаючими при виконанні технологічних процесів. Це призводить до суттєвих корозійних і корозійно - втомних пошкоджень. Отже, за оцінкою експлуатаційних даних відносно корозійних пошкоджень і руйнувань агрегатів, деталей і з'єднань металоконструкцій сільськогосподарських машин, найбільш схильні до корозії тонколистові металоконструкції, обшивка машин, зуби зірочок ланцюгових передач, шківни, сегменти ріжучих апаратів комбайнів, втулочно - роликові ланцюги, зварні з'єднання, ін. [73, 269, 273]. Найбільш небезпечні відносно швидкості і степені пошкодженості від корозії є мінеральні добрива та отрутохімікати. Тому практичну цінність має оцінка руйнування типових матеріалів металоконструкцій мобільних сільськогосподарських машин, особливо несучих, в корозійно - активних середовищах мінеральних та органічних добрив. Обстеженнями машин з позицій масових втрат та швидкості розвитку корозії встановлено, що з причини тривалого контакту з агресивним середовищем найбільш інтенсивно руйнуються деталі металоконструкцій с/г машин, розташовані у нижній частині техніки. На поверхнях спостерігаються корозійні пітінги, виразки, корозійно - втомні тріщини, збільшені зазори в з'єднаннях (рис.1.12 – рис. 1.16) [269, 270, 273].

Таблиця 1.9

Показники зношування складових механізму навіски трактора К-701

Деталь (номер за каталогом)	Поверхня	Середнє значення показника зносу	
		Корозійно-механічне зношування, мм	Використання доремонтного ресурсу, %
Шарнір задній в зборі (700.46.28.040-2)	Отвори шарніра	1,04	42,9
Вал ричага (700.46.28.041-1)	Поверхня валу під опору	0,68	101,2
Ричаг (700.46.28.097)	Поверхня отвору під палець	0,60	89,7
	Поверхня отвору під вісь	0,51	117,6
Вісь (700.46.28.098-1)	Поверхня під ричаг	1,25	328,5
Вісь головного ричага (700.46.28.066)	Зовнішня поверхня	0,32	82,8
Головні ричаги в складі (700.46.28.450- 1/460-1)	Внутрішня поверхня отвору під палець	0,43	106,6
Вісь (700A46.28.219-1)	Поверхня під ричаг	0,94	182,9

Корозійні пошкодження тримких металокопструкцій, особливо такі як пітінги і виразки є не тільки концентраторами напружень, а також причиною інтенсифікації проходження корозійних процесів: всередині пітінга за рахунок утворення місцевих гальванічних елементів швидкість анодної реакції (розчинення) збільшується більше 1000 разів [275].



Рис. 1.12. Загальний вигляд розкидача твердих органічних добрив
РТД -9 після двох сезонів експлуатації



Рис. 1.13. Утворення корозійно - механічної тріщини в несучій системі
розкидача добрив

Корозійно - втомне руйнування характеризується найбільшими пошкодженнями металоконструкцій від сумісної дії двох одночасних процесів: електрохімічної взаємодії металу з агресивними середовищами і втомного зародження та розвитку тріщин при експлуатаційних статичних і динамічних навантаженнях.



Рис. 1.14. Корозійно - втомні тріщини несучої системи розкидача твердих органічних добрив



Рис.1.15. Руйнування металоконструкцій розкидача мінеральних добрив



Рис. 1.16. Заварені корозійно - втомні тріщини металоконструкції розкидача мінеральних добрив

Незважаючи на поширені масштабні корозійні руйнування металоконструкцій, зміни шорсткості поверхонь, корозійні виразки, пітінги, на сьогодні нормативні терміни служби агрегатів, вузлів та деталей с/г техніки, встановлюються без урахування сумісних впливів корозійно-активних середовищ, кліматичних факторів, експлуатаційної завантаженості [73, 196, 205, 270].

1.3. Дослідження надійності тримких структур мобільних сільськогосподарських машин

Проектування металоконструкцій зварних несучих структур сільськогосподарських машин виконується згідно з класифікацією за призначенням і експлуатаційними вимогами. Встановлено три класи зварних рам, кожен з яких має конструктивні особливості [256, 257]. До I класу відносяться конструкції рам машин, які необхідні для виконання одного-двох технологічних процесів (плуги, культиватори, ін.). Рами плоскі, що спричинено необхідністю розміщення робочих органів на одному рівні відносно поверхні ґрунту. Обов'язкова характеристика - несучі бруси, розташовані, як правило, під кутом до напрямку руху машини, для забезпечення узгодженості дії робочих органів. До рам пред'являються підвищені вимоги за жорсткістю. II клас об'єднує конструкції рам машин, які виконують комплекс технологічних операцій групою агрегатів, розміщених на різних рівнях відносно поверхні ґрунту (комбайни). Рами просторові, вимоги жорсткості до них не нижчі, ніж до I класу, проте завдяки конструктивній формі вони виконуються простіше. III клас характеризує рами транспортних машин і машин, які працюють в транспортному режимі в умовах агресивних середовищ при внесенні добрив та в хімічному захисті рослин. Рами III класу плоскі, прямокутні. В умовах низької якості доріг та бездоріжжя конструкції рам повинні володіти піддатливістю для

уникнення перенапружень в металі при переїзді одиничних нерівностей, також для надійної опори всіма колесами, проте для руху на великих швидкостях з причини зростання ймовірності виникнення резонансних явищ, також прискореного накопичення пошкоджень повинні бути жорсткими. У відповідності з даною класифікацією при проектуванні рамних конструкцій приймаються конструктивні рішення, вибираються матеріали і прокатні профілі, зварні з'єднання та вузли.

Рами виготовляються з гарячекатаних, частіше холодногнутих профілів постійного або змінного перетину відкритого та закритого типів. З'єднання елементів рами як правило здійснюється зварюванням, окремі елементи розкидачів мінеральних добрив кріпляться за допомогою болтових з'єднань. Регулювання величини жорсткості рам досягається різними конструктивними рішеннями [58, 256]: вставкою в лонжерони підсилень, застосуванням лонжеронів і поперечин закритого поперечного перетину, вибором раціональних жорсткостей з'єднань лонжеронів з поперечинами.

Універсальність і загальність методів оцінки довговічності металоконструкцій у механіці обумовлює необхідність аналізу проблематики втоми металоконструкцій в різних галузях машинобудування. В локомотивобудуванні, вагонобудуванні, авіабудуванні вказані методи розкриті достатньо широко, так як проблема втоми конструкцій має домінуюче значення з позицій безпеки руху, матеріаломісткості конструкцій, собівартості виробництва, експлуатації і ремонту машин. Істотний внесок у вивчення проблеми надійності і довговічності транспортних машин внесли вчені В.Я. Анілович, Г.Г. Баловнєв, В.В. Бойцов, А.І. Бойко, В. Вейбулл, В.З. Власов, П.М. Волков, А.С. Гусєв, І.В. Демянушко, С.С. Дмитриченко, М.І. Когаєв, Р.В. Кугель, Н.Д. Кузнєцов, В.С. Лукінський, Н.В. Островцев, І.Г. Пархіловський, Є.К. Почтєнний, В.Б. Проскураков, Л.В. Погорєлий, М.І. Підгурський, Р.В. Ротенберг, Т.І. Рибак, А.Н. Савоськін, С.В. Серенсен, В.Т. Трощенко, М.М. Тененбаум, М. Ханке, І.С. Цитович, Е.А. Чудаков, К.В. Щурин, П.В. Ясній, Г. Якобі, Н.Н. Яценко, М.Г. Чаусов, Т. Megson, G. Alade, ін.

Аналіз проблеми надійності шасі літака [65] довів, що відмови пов'язані з руйнуванням і виникненням тріщин становлять, відповідно, 11,6% и 29,0%. Аналіз відмов ємностей тиску [32] показав, серед множини відмов 24% припадає на втомні руйнування. Для локомотивів відмови, пов'язані з руйнуванням деталей екіпажної частини становлять 12% загальної кількості [228], на колісні пари, раму кузова і раму візка припадає, відповідно, 24%, 12,6%, і 6% відмов [318]; близько 90% руйнувань зварних вузлів будівельно-дорожніх машин є втомними [103]. Значна частина металокопструкцій сільськогосподарських машин у випадку руйнування має втомний характер пошкоджень [177, 237]. Серед машин несучі системи яких згідно ТУ, РТМ [256] відносяться до 3 - го класу, розкидачі добрив і машини транспортного призначення характеризуються широким діапазоном експлуатаційних режимів, причому рух ґрунтовими і польовими дорогами спричинює циклічні навантаження в елементах несучої копструкції, які призводять до накопичення і розвитку втомних пошкоджень, що є основною причиною відмов. Відмови втомного характеру для автомобілів УАЗ-452 – 54%, ГАЗ-66 – 48%, ЗІЛ-131 – 44%, Урал-375Д – 56%, КраЗ-255Б – 50% [228]. Значна частка втомних пошкоджень вантажних автомобілів при першому капітальному ремонті припадає на несучі системи автомобілів, рами без тріщин і руйнувань 6,5 - 20,5% від загального числа, в більш 80% рам з тріщинами, домінували пошкодження втомного характеру, в цілому в 64 - 93% від кількості несучих металокопструкцій спостерігалися тріщини [131]. Рами поділяються на однобалочні, або хребтові і двобалочні: сходиноквого типу, одноконтурні, багатоконтурні [58, 256, 318]. Загальні вимоги до рам машин 3-го класу пов'язані з забезпеченням показників міцності, жорсткості, довговічності при циклічних навантаженнях. Розрахунки рам на міцність і жорсткість у машинобудуванні відбуваються за відомими методами [58, 109, 260].

Для виготовлення елементів несучих металокопструкцій використовуються профілі: рівнополочні і нерівнополочні швелери, омегоподібний, зетоподібні, двотавр, кутник, кругла і прямокутна труба. Для

зварних рам мобільних сільськогосподарських машин рекомендуються використовувати сталі за двома групами міцності (табл. 1.10) [256, 257].

Таблиця 1.10

Рекомендовані матеріали несучих систем сільськогосподарських машин

Група міцності сталі	Тримкі метало - конструкції	Тип і марка сталі	Стандарт, технічні умови (ТУ)	Механічні властивості				
				σ_T , МПа	σ_b , МПа	$\frac{\sigma_T}{\sigma_b}$	δ_p , %	
I	I, II, частково III клас	Низьколегована 09Г2	ГОСТ 19282-73	310	450	0,69	21	
		14Г2	ГОСТ 19282-73	340	470	0,72	21	
		12ГС	ГОСТ 19282-73	320	470	0,68	26	
		Вуглецева якісна 20 Звичайної якості Ст3сп*	ГОСТ 1050-74	250	420	0,59	25	
			ГОСТ 380-71	250	380	0,66	26	
			ГОСТ 380-71	250	380	0,66	26	
	III клас	Плакована 10+08X18H9T	ТУ 14-1-2623-79				Механічні властивості не нижче встановлених для сталі 10 ГОСТ 1050-74	
			Низьколегована 10Г2Б 20Г2С 09Г2С 17ГС	ГОСТ 19282-73	380	520	0,73	21
				ТУ 14-1-978-74	370	520	0,71	14
				ТУ 14-1-978-74	350	500	0,70	21
ТУ 14-1-978-74	350	500		0,70	23			
II	I клас	Вуглецева якісна 35 Звичайної якості Ст5Гпс Ст5сп	ГОСТ 1050-74	320	500	0,59	20	
			ГОСТ 380-71	290	460	0,63	20	
			ГОСТ 380-71	290	540	0,58	20	

I група, $\sigma_T = 320$ МПа для низьколегованих сталей, $\sigma_T = 250$ МПа для вуглецевих; II група, $\sigma_T = 380$ МПа для низьколегованих сталей, $\sigma_T = 320$ МПа для вуглецевих. Плоскі рами I класу з високими вимогами до жорсткості рекомендується виготовляти з сталей II групи міцності. Просторові рами II класу, забезпечення жорсткості яких досягається завдяки просторовій формі конструкції, виготовляються з сталей I групи міцності. Рами транспортних машин і машин працюючих у агресивних середовищах, III класу, виготовляються з сталей I групи міцності.

Дослідження показників надійності тракторних причепів типів ММЗ-771Б та ММЗ-768Б, проводилися з урахуванням даних експериментальних випробувань на машино-випробувальних станціях (МВС) в обсязі 2000 годин при транспортних роботах, у т.ч. 3500 циклів навантаження-розвантаження, що складає 50% напрацювання, передбаченого технічними умовами [318]. Організація транспортних робіт на МВС не ідентична реальним умовам експлуатації, що впливає на показники надійності. Наприклад, підвищуються коефіцієнти готовності та середнє напрацювання на відмову, знижується параметр потоку відмов, ін. Московським державним агроінженерним університетом ім. В. П. Горячкіна і Орським заводом тракторних причепів проведені дослідження експлуатаційної надійності напівпричепів ММЗ-771Б і ММЗ-771, причепів та напівпричепів ММЗ-768Б і ММЗ-768. Під наглядом знаходилися 47 напівпричепів ММЗ-771 і 15 напівпричепів ММЗ-771Б, також 13 причепів ММЗ-768 та 7 причепів ММЗ-768Б, виготовлених різними підприємствами. Експлуатація причепів здійснювалася протягом усього року. Причепи використовувалися при перевезеннях мінеральних і органічних добрив, інших насипних і штучних вантажів. У таблицях представлено дані про середнє напрацювання на відмову основних елементів вказаних причепів [109, 204, 260, 318]. У табл. 1.11-1.12 представлено дані про середній наробіток на відмову основних елементів причепів і відсоток відмов при напрацюванні 4000 годин [204].

Таблиця 1.11

Середній наробіток на відмову основних елементів причепів

Середнє напрацювання на відмову ММЗ-771Е і відсоток елементів, які відмовили (у дужках)						
Рама	Підвіска	Ходова	Гальма	Гідравліка	Електрообл.	Кузов
391 (100%)	436 (100%)	373 (100%)	528 (66%)	467 (73%)	473 (86%)	240 (100%)
Середнє напрацювання на відмову ММЗ-771 і відсоток елементів, які відмовили (у дужках)						
Рама	Підвіска	Ходова	Гальма	Гідравліка	Електрообл.	Кузов
437 (80%)	400 (53%)	335 (93%)	512 (49%)	406 (80%)	695 (35%)	284 (100%)
Середнє напрацювання на відмову ММЗ-768Б і відсоток елементів, які відмовили (у дужках)						
Рама	Підвіска	Ходова	Гальма	Гідравліка	Електрообл.	Кузов
753 (77%)	789 (53%)	514 (100%)	646 (85%)	785 (100%)	820 (100%)	302 (100%)

Отже, складові на які діють змінні у часі за величиною навантаження (несуча система, підвіска) мають недостатній ресурс, відсоток відмов становить 50% - 80%. З усіх агрегатів особлива увага приділяється тримкій структурі. У табл.2 систематизовано інформацію щодо надійності окремих причепів при напрацюванні 0-4000 годин [204, 318].

Таблиця 1.12

Показники надійності несучих систем причепів

№ з/п	Найменування показника	ММЗ-771Б	ММЗ-771	ММЗ-768Б	ММЗ-768
1	Середнє напрацювання на відмову, год	545	833	1176	889
2	Середня кількість відмов на 1 причіп при напрацюванні 4000 год	7,34	4,8	3,4	4,5
3	Відсоток причепів, що мали відмови	100	85	77	100

Найбільш характерними відмовами несучих систем с/г транспортних машин всіх моделей є тріщини в зварних з'єднаннях рам [109, 118, 176], деформації і тріщини дишла, лонжеронів, поперечин. З табл. 2, практично у всіх причепів, несуча система при напрацюванні 22-30% від терміну служби до капітального ремонту, має відмови. Причини і час відмов обумовлюються різними за кількісними і якісними показниками динамічними навантаженнями, які мають випадковий характер впливу на об'єкт дослідження. Множина причин переходу металокопструкції у стан відмови дає можливість зробити висновок про причинно - наслідковий комплекс подій, які спричиняють відмови. Аналіз структури комплексу відказів є важливою складовою комплексної системи забезпечення надійності і живучості несучих рам сільськогосподарських причепів. В цілому, домінуючими причинами відмов металокопструкцій на виробничих і експлуатаційних етапах є дефекти виготовлення (етап виробництва), а також помилки в проектах (етап проектування), сумарний процент відмов спричинених недостатнім рівнем якості проектування і виробництва може досягати більше 60% [202, 204, 318]. Аналіз причин крихкого руйнування зварних металокопструкцій [189, 204] подає вплив окремих факторів за частотою їх появи при аварійних станах, сумарно, фактори, пов'язані з концентрацією напружень і розвитком тріщин становлять до 50%. В цілому, у машинобудуванні кількість дефектів на погонний метр зварного шва становить 6,1 [55, 204]. Причинами виходу с/г техніки з ладу є конструктивні недоробки на стадії проектування (20-30%), відкази внаслідок низької якості виготовлення та зборки машин (20-35%), низького технічного рівня і якості матеріалів, елементної бази комплектуючих (35-40%), відмови через порушення правил експлуатації техніки в господарствах, низьку кваліфікацію обслуговуючого персоналу (10%), інші відмови – 5-10% [55, 204, 232].

Характерними дефектами несучих металокопструкцій причепів є тріщини лонжеронів, поперечин, в місцях з'єднань лонжеронів з поперечинами, деформації і тріщини дишла. Аналіз показує, що несучі системи при

напрацюванні 14-21% від заданого терміну служби до капітального ремонту, мають відмови, причому для причепів даний показник становить 22-30%. Наряду з низькою надійністю, несучі системи великовантажних тракторних напівпричепів і причепів мають питому металоємність на 20-30% вище, ніж у зарубіжних аналогів: причепів СуперКар - 120 і СуперКар - 200 (Італія), КЗ-І2 і КЗ-І5 (ФРН), Брімон-170 (Франція), 10 ЕС/72-ТВ (Данія) та інших [318].

Отже, актуальним є вдосконалення наукових основ підвищення надійності несучих систем с/г причепів і причіпних розкидачів добрив. Вимоги, які ставляться до експлуатаційної надійності розкидачів добрив і сільськогосподарських транспортних засобів передбачають забезпечення заданого рівня довговічності металоконструкцій, особливо несучих систем, які, будучи базовими вузлами, повинні, зазвичай, мати довговічність, рівну ресурсу машини до проведення капітального ремонту. Оцінка довговічності металоконструкцій при роботі умовах циклічних навантажень і агресивних середовищ включає вирішення завдань з оцінки параметрів експлуатаційної навантаженості, визначення характеристик корозійної та електрохімічної поведінки матеріалів несучих систем, встановлення характеристик корозійно - втомної міцності локальних зон конструкції, які обмежують її довговічність, аналітично - експериментальне прогнозування ресурсу роботи.

1.4. Оцінка експлуатаційної навантаженості сільськогосподарської техніки

Комплексна оцінка експлуатаційної навантаженості несучих систем причіпних розкидачів добрив детермінується розв'язками комплексу теоретично - прикладних завдань при аналітично - експериментальних дослідженнях: статичної невизначеності; навантаженості рамних несучих систем у статичній постановці задачі з визначенням компонентного складу внутрішніх силових факторів від деформацій розтягу – стиску, кручення, згину

при інтегральному аналітичному описі складного статичного і динамічного напружених станів; частотного спектру динамічних навантажень.

Несучі металоконструкції причіпних розкидачів добрив та транспортних засобів є пружними просторовими системами тонкостінних конструктивних елементів, які при експлуатації навантажуються складними випадковими комбінаціям зусиль і моментів, що викликають деформації: розтягу - стиску лонжеронів; кручення і згину лонжеронів і балок у вертикальній і горизонтальній площинах; кручення і згину поперечин у вертикальній площині; місцеві деформації з позиції втрати стійкості.

Оцінка експлуатаційної завантаженості несучих систем у статичній постановці задачі на етапі формування розрахункової схеми передбачає навантаження зовнішніми зусиллями за максимальними величинами зосереджених і розподілених силових факторів, які виникають при виконанні технологічних процесів.

При визначенні внутрішніх силових факторів у конструктивних елементах несучих систем сільськогосподарських транспортних машин і причіпних розкидачів добрив враховується зовнішнє навантаження від складної просторової системи випадкових за величиною сил, які залежать від умов роботи. Існуючі теорії рам мобільних с/г машин враховують симетричність і кососиметричність вертикальних силових факторів, також горизонтальні сили. Симетричні навантаження виникають при русі дорогами з високими швидкостями і викликаються коливаннями підресорних мас у вертикальній площині. Вони спричиняють згин лонжеронів у вертикальній площині. Кососиметричні навантаження типові для руху з невисокими швидкостями поганими дорогами, або полем (при широкополосному розподілу мікропрофілю), що призводить до закручувань рами внаслідок наїздів на перешкоду одним, або двома протилежними колесами. Перекоси несучої структури при русі поганими дорогами, а також маневруванні спричиняють в елементах металоконструкції напруження від згину в горизонтальній площині, причому у окремих випадках його величина перевищує величину напруження

від стисненого кручення та згину у вертикальній площині [192, 237]. В лонжеронах рами виникають напруження, викликані силами розтягу і стиску, які обумовлені тягово - зчіпними властивостями. Точність і коректність результатів розрахунків несучих рамних металоконструкцій забезпечується точністю кількісної оцінки компонентного складу сумарних напружень [102, 318]. Розкладання напружень на компоненти при розрахунках рам с/г машин традиційно відбувається формулою В.З.Власова.

Відповідно до теорії тонкостінних стержнів В.З. Власова, в кожній і точці профілю для нормальних напружень сумарні нормальні напруження являються функцією чотирьох складових: напруження від згину у вертикальній σ_{iB} , горизонтальній $\sigma_{iГ}$ площинах, стиснутого кручення $\sigma_{i\omega}$ і розтягу – стиску σ_{ip} [69]

$$\sigma_i = \sigma_{iB} + \sigma_{iГ} + \sigma_{i\omega} + \sigma_{ip} \quad (1.1)$$

Або [318]:

$$\sigma = \frac{\int_F \sigma \cdot 1 \cdot dF}{F} + \frac{\int_F \sigma \cdot y \cdot dF}{\int_F y^2 \cdot dF} \cdot Y'_m + \frac{\int_F \sigma \cdot x \cdot dF}{\int_F x^2 \cdot dF} \cdot X'_m + \frac{\int_F \sigma \cdot \omega \cdot dF}{\int_F \omega^2 \cdot dF} \cdot \omega_m \quad (1.2)$$

Після точного запису відносно розглядуваної металоконструкції отримуються вирази для визначення складових діючих максимальних нормальних напружень у поперечних перетинах тонкостінних елементів несучих систем. Загальновідомо, у сільськогосподарському машинобудуванні при виготовленні несучих систем застосовуються тонкостінні стержневі елементи відкритого і замкнутого профілів, аналітичні дослідження компонентного складу сумарних нормальних напружень проводяться для прокатних профілів з яких виготовляються досліджувані тримкі металоконструкції.

У роботах з досліджень динамічної навантаженості рам транспортних засобів [85, 143, 218, 221, 236, 318] зовнішні навантаження, напруження і деформації вивчаються як випадкові процеси. Для одержання кількісної інформації про розподіл необхідних параметрів випадкових процесів використовують апарат теорії випадкових функцій, причому розрахунки проводяться з припущеннями від яких залежить точність інформації про описуваний процес, з цих причин суттєвим при аналізі випадкового процесу є вибір оптимального методу схематизації від чого залежить точність прогнозування розрахункової довговічності. Загальновідомі методи схематизації - метод максимумів; метод екстремумів; метод перетинів; метод розмахів; метод ординат; метод повних циклів; метод «падаючого дощу». Спільним недоліком вказаних методів є неврахування асиметричності навантаження. Даний недолік усувається Е.К. Почтенним [217] шляхом застосування методу аналізу напівциклів напруження, точність якого понижуює лінійний підхід до діаграми граничних амплітуд. У працях С.С. Дмитриченка, О.А. Русанова [100, 259] показано, що при використанні методів випадкових функцій при розрахунках довговічності отримуються результати з співвідношеннями в межах 0,26-1,9. В працях В.Л. Когаєва [119] доведено, що для вузькополосних випадкових процесів всі методи схематизації дають однакові результати, а для широкополосних випадкових процесів є значні відмінності в оцінці рівня навантаженості. Очевидно, не існує універсального методу схематизації для довільного випадкового процесу. Для якісної оцінки і прогнозування надійності і довговічності причіпних розкидачів добрив необхідним є проведення достовірного аналізу частотного спектру динамічних навантажень несучих систем [109, 287].

Дослідження складних динамічних систем, якими є мобільні с/г машини доцільно проводити за напрямками [26, 143, 170, 221, 318]:

- експериментальна оцінка параметрів коливань машини, її окремих агрегатів;
- аналітична оцінка параметрів коливань машини, або її агрегатів.

Аналітична оцінка параметрів коливань полягає у проведенні аналізу системи методами статистичної динаміки, за допомогою чого визначаються параметри процесів в динамічних системах як функція статистичних характеристик зовнішніх впливів (нерівностей доріг, ін.). Способом опису динамічної системи є передавальна функція, за якою визначаються параметри вимушених коливань системи при впливі гармонійних або випадкових збурень, а також перехідних процесів, які виникають від впливу таких збурень. Отриманий при цьому енергетичний спектр дозволяє оцінити, в якому діапазоні відбуваються коливання системи і при яких частотах інтенсивність коливань має максимальне значення [318]. При вирішенні задач з оцінки втомної та залишкової довговічності несучих металоконструкцій транспортних машин з позицій детерміністичних підходів механіки крихкого руйнування, оптимальною є експериментальна оцінка частотного спектру напружень в металоконструкціях виникаючих від зовнішніх динамічних навантажень. Точні частотні характеристики коливань елементів несучих систем одержуються, шляхом аналізу записів напружень в визначених перетинах конструкції за допомогою сучасного програмного забезпечення (STATISTICA, Mathematics). При цьому рекомендується застосовувати частотні характеристики навантаженості існуючих конструктивно подібних типів с/г машини, так як, зазвичай, коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів при створенні нових моделей і модернізації існуючих знаходиться, в межах 0,6-0,9 [318].

При проведенні випробувань натурних металоконструкцій на довговічність з значним збільшенням частоти навантаження великогабаритних об'єктів внаслідок дії значних інерційних зусиль змінюються форма циклу та напружений стан в досліджуваних зонах, вплив частоти навантажень на сьогодні досліджено недостатньо. Вплив частоти навантаження на втомні характеристики матеріалів для стандартизованих зразків досліджено більш повно, діапазон частот в цьому випадку поділяється на низькі (0,1- 0,5) Гц, нормальні (5 - 300) Гц, високі (300 -10000) Гц [317].

Частота прикладання навантаження не має відчутного впливу на межу витривалості в області близькій до високих частот: збільшення частоти з 30 Гц до 1000 Гц у більшості випадків призводить до підвищення межі витривалості на 10-20 % . Для малих і нормальних частот збільшення частоти навантаження з 0,13 Гц до 40 Гц спричиняє підвищення межі витривалості на 10-13 % [317]. Частота впливає більше на довговічність, у порівнянні з впливом на межу витривалості. Так, при збільшенні частоти навантаження з 0,67 Гц до 40 Гц довговічність зразка збільшується на 30% [318]. Проведені дослідження [131, 318] показують, що частота навантаження істотно впливає на довговічність при рівні напружень, які перевищують межу витривалості: із збільшенням частоти довговічність зростає. При частотах менше 1 Гц і більше 100 Гц межа витривалості залежить від частоти прикладання навантажень. В інтервалі 1-100 Гц межа витривалості змінюється незначно. При аналізі частотної області експлуатаційних навантажень як правило використовують інформацію про частотні спектри навантажень транспортних машин аналогічних класів і призначень. Наприклад, для транспортних машин основна енергія коливань зосереджена в діапазоні частот 1 Гц - 4 Гц, дослідження проводилися при русі транспортного засобу 12 ґрунтовими типами доріг [318]. Отже, частоти у діапазоні 1 Гц - 4 Гц і є оптимальними для проведення випробувань на втому елементів металоконструкцій несучих систем .

Результати експериментальних досліджень тракторних причепів в польових умовах приведено у таблиці 1.13 [318]. Розглянуто значення дисперсій процесів D_{σ} та дисперсій D_{σ_i} в діапазонах частот з максимумами спектральної щільності і їхні співвідношення. Для проведення обчислень використано залежності [318]:

$$D_{\sigma_i} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{f_i}^{f_{in}} \Phi_{\sigma}(f) \cdot df, \quad (1.3)$$

для дискретного спектру

$$D_{\sigma_i} = \frac{1}{2\pi} \cdot \bar{\Phi}_{\sigma}(f_{i,ин}) \cdot (f_{ин} - f_i), \quad (1.4)$$

Де $\bar{\Phi}_{\sigma}(f_{i,ин})$ – середнє значення спектральної щільності в діапазоні частот f_i , $f_{ин}$. В чисельнику вказані значення D_{σ_i} , у знаменнику – $(D_{\sigma_i}/D_{\sigma}) \times 100\%$.

Таблиця 1.13

Розподіл дисперсій за діапазонами частот процесів навантаженості

№ з/п	Тип дороги	D_{σ} , МПа	D_{σ_i} , МПа у діапазонах, Гц			
			0-1	1-3,5	3,5-7	7-10
1	Розбита ґрунтова дорога, датчик біля задньої поперечини	225	<u>39,8</u>	<u>164,1</u>	<u>13,9</u>	<u>7,2</u>
			17,7	72,9	6,2	3,2
2	Ґрунтова дорога	210	<u>6,8</u>	<u>167,7</u>	<u>33,4</u>	<u>2,1</u>
			3,2	79,9	15,9	1,0
3	Розбита ґрунтова дорога, датчик біля передньої поперечини	117	<u>114,5</u>	<u>93,8</u>	<u>69,7</u>	<u>47,8</u>
			9,8	80,2	5,9	4,1
4	Розбита ґрунтова дорога, датчик на лонжероні біля задніх коліс	103	<u>65,8</u>	<u>87,9</u>	<u>68,5</u>	<u>15,9</u>
			6,4	85,5	6,6	1,5

Підтверджуються характеристики частотних спектрів навантаженості сільськогосподарських причепів [57, 143, 318]: у спектрах випадкових процесів динамічної навантаженості виділяються три гармоніки з частотами, які знаходяться в діапазонах 1,4-1,8 Гц, 4-5Гц, 8-9Гц, причому гармоніка основного тону має частоту 1,4-1,8 Гц. Таким чином, близько 80% енергії випадкових процесів зосереджено в діапазоні частот 1-3,8 Гц. Цей діапазон є оптимальним при проведенні експериментальних випробувань матеріалів несучих систем.

Отже, в процесі експлуатації розкидачів добрив і с/г транспортних засобів на елементи несучих систем діють випадкові складні комбінації різноорієнтованих у просторі силових факторів, що обумовлюється випадковим характером джерел збурень (нерівностей доріг). Задачі для рішення яких застосовуються результати досліджень динамічної навантаженості несучих систем:

- оцінка за якісними показниками і аналітичний опис структури напружень в найбільш небезпечних перетинах несучих систем з визначенням частотних діапазонів для обґрунтування вибору обладнання та режимів проведення експериментальних досліджень для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості вибраних матеріалів, в т.ч. в робочих агресивних середовищах;

- оцінка НДС елементів несучої системи за кількісними показниками з метою визначення максимально навантажених елементів для зниження металоємності конструкції;

- розподіл напружень в максимально навантажених перетинах елементів для прогнозування довговічності несучої системи.

1.5. Корозійна стійкість матеріалів в середовищах добрив

Основними органічними добривами в Україні є гній великої рогатої худоби і свиней, пташиний послід, органічні відходи аграрного виробництва тваринного та рослинного походження: підстилковий і безпідстилковий гній сільськогосподарських тварин, пташиний послід, гноївка, сапропелі, солома, ін. [94, 95, 96, 133].

Гній та пташиний послід. Залежно від технології утримання тварин і птиці, гнойова маса може мати тверду (вологість до 80 %), напіврідку (вологість 80...90 %), або рідку (вологість понад 90 %) консистенцію. За

ступенем розкладання органічних речовин розрізняють чотири види підстилкового гною: свіжий, в якому солома майже повністю зберегла первинний вигляд та міцність; напівперепрілий – солома має темно-коричневий колір і легко розривається; перепрілий – солома має вид темної маслянистої маси і типової консистенції соломи в ній непомітно; перегній – сипка чорна маса [133]. У процесі утримання сільськогосподарських тварин і птиці з використанням підстилки нагромаджується підстилковий твердий гній, вологістю до 80%, хімічний склад якого дано в табл. 1.14 [133, 134]. Для отримання підстилкового гною в якості підстилкових матеріалів найчастіше використовуються подрібнена солома, тирса, ін.

Таблиця 1.14

Хімічний склад гною

Гній	Вміст при натуральній вологості, % на сиру речовину						Вологість	рН
	Азот		Фосфор	Калій	Органічна речовина	Зола		
	Загальний	Аміачний						
Великої рогатої худоби	0.54	0.07	0.27	0.20	21.0	14.0	65.0	8.1
Свиней	0.84	0.16	0.58	0.62	21.9	14.0	60.7	7.9
Кінський	0.59	0.09	0.26	0.59	22.6	17.4	69.0	7.9
Овечий	0.89	0.14	0.47	0.88	28.0	23.0	49.0	7.9

При утриманні сільськогосподарських тварин без підстилки (на решітчастих підлогах) утворюється безпідстилковий гній рідкої або напіврідкої консистенції. За рахунок води, яка попадає в стічні канами при очищенні приміщень, маса безпідстилкового гною, в порівнянні з масою екскрементів тварин, збільшується на 20...30 %. Вологість такого гною складає 91...92 %, при більшій вологості рідкий гній розшаровується. Вміст поживних речовин у безпідстилковому гної дано у табл. 1.15 [133], причому склад гною під час зберігання істотно змінюється.

Основні поживні речовини у безпідстилковому гної

Вологість, %	Наявність поживних речовин у гної, %					
	Великої рогатої худоби			Свиней		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
90,0...91,5	0,45	0,25	0,32	0,63	0,32	0,33
92,...92,5	0,40	0,20	0,25	0,52	0,25	0,26
94,3...95,0	0,30	0,16	0,19	0,38	0,18	0,19
96,7...97,1	0,23	0,14	0,13	0,27	0,14	0,13
98,3...98,8	0,15	0,08	0,08	0,18	0,09	0,10
98,7...99,0	0,12	0,06	0,07	0,16	0,07	0,08

Пташиний послід багатший на поживні речовини в порівнянні з гноєм великої рогатої худоби і свиней: безпідстилковий послід містить 75...80% води, 1,0...1,5 % азоту, 1,1...1,5 % фосфору, 0,4 % калію, а підстилковий містить 29...40 % води; 2...2,4 % загального азоту; 2,5...3,0 % фосфору; 0,4...0,6 % калію. Також застосовуються компости, які одержують шляхом змішування соломи з напіврідким гноєм, пташиним послідом, або твердою фракцією рідкого гною.

Торф. Поділяється на низинний (автотрофний), перехідний (мезотрофний) і верховий (оліготрофний). У торфі азот знаходиться у малодоступній для рослин формі. Для перетворення його в доступну, торф необхідно використовувати при виготовленні компостів. У торфі міститься від 20 до 70% органічної речовини, від 2,3 до 3,3% азоту у низинному торфі, від 0,8 до 1,2% азоту у верховому торфі [133].

Сапропелі. Мають найбільші перспективи для західних регіонів України. Комплексні відкладення органічних і мінеральних речовин на дні непроточних або слабо проточних водойм. Середній вміст азоту – 2,05 %, фосфору – 0,63 %, калію – до 0,03-0,04% у сухій речовині [133].

Мінеральні добрива поділяються на прості, які містять одну діючу речовину і комплексні, які містять більше двох діючих речовин та, додатково, мікроелементи. Головним якісними характеристиками добрив є вміст діючих речовин. Основними діючими речовинами є сполуки азоту, фосфору і калію, вміст яких вимірюється у перерахунку на елементарний азот (N), фосфорний ангідрид (P_2O_5) і оксид калію (K_2O). Кількісні характеристики добрив вимірюються у вазі в перерахунку на 100% діючих речовин, так 100 т. аміачної селітри, з урахуванням 35% вмісту азоту, в перерахунку на діючу речовину мають 35 т діючої речовини [149, 153].

Найпоширенішими з мінеральних є азотні добрива, які виготовляються у твердому та рідкому видах. Серед твердих азотних добрив найбільш концентрованим є карбамід (сечовина), яка містить 45-46% N, аміачна селітра, яка містить 33,6-35 % N, сульфат амонію містить 20-21% N. З рідких азотних добрив найпоширенішими є карбамідно-аміачна суміш (КАС) з вмістом азоту 28-32% і аміачна вода з вмістом азоту 20-21%. У добривах азот знаходиться у різних видах: нітратні – натрієва селітра, кальцієва селітра; амонійні – сульфат амонію, сульфат амонію-натрію; аміачні – безводний аміак, аміачна вода; амонійно-нітратні – аміачна селітра; амонійно – нітратно - амідні карбамідо - аміачна суміш; амідні – карбамід (сечовина). Відповідно ГОСТ, вміст азоту для твердих добрив: аміачна селітра (N_4H_3) 34,0 - 34,65%; карбамід $CO(NH_2)_2$ 46,0 - 46,3%; сульфат амонію $(NH_4)_2SO_4$ 20,8 - 21,0%; кальцієва селітра $Ca(NO_3)_2$ - 17,5%; натрієва селітра ($NaNO_3$) 16,3 - 16,4%; хлористий амоній (NH_4Cl) 25,9 - 30,0%. Вміст азоту для рідких добрив: аміачна вода (NH_4OH) 18,0 - 20,5%; аміак (NH_3) 82,0 - 82,3%; аміакати 20,5 - 30,0% [149, 153].

Аміачні добрива. Аміачна селітра (NH_4NO_3) містить 34-35% азоту. Сіль безбарвна, гігроскопічна, випускається в гранульованому вигляді (діаметр гранул 1-3 мм) і зберігається в сухому приміщенні в поліетиленових мішках. При внесенні даного добрива в кислий ґрунт необхідно випереджаюче вапнування, оскільки аміачна селітра - фізіологічно кисле добриво. Водний аміак, або аміачна вода (NH_4OH), 20-25% розчин аміаку у воді. Для добрива

застосовують водний аміак двох сортів - 20% аміаку (16% N) і 25% (20,5% N). При температурі 15 °С питома вага водного аміаку першого сорту становить 0,910, другого сорту - 0,927. Аміачна вода не руйнує чорні метали, замерзає при температурі 33-56°С. У вказаних добривах азот знаходиться, переважно, у формі вільного аміаку, і тільки незначна частина у вигляді катіона NH_4^+ . Це визначає їх відміну від твердих нітратних і амонійних азотних добрив за фізичними і за агрохімічними властивостями. Сечовина ($[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$) містить 46% азоту. Це найбільш концентроване з твердих азотних добрив. Азот в сечовині знаходиться в органічній формі у вигляді аміду карбамінової кислоти. Сечовина біологічно кисле добриво. За величиною потенційної кислотності вона близька до аміачної селітри. Випускається в гранульованому вигляді. Добре розчинна. Натрієва селітра (NaNO_3) у чистому вигляді безбарвні кристали, добре розчинні у воді. У сільському господарстві застосовують технічну натрієву селітру, кристали сірого чи жовтого відтінків. Для першого сорту вміст NaNO_3 не менше 99% при вологості не 1%, для другого, відповідно, 98% і 2%. Сульфат амонію ($[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$), сірчаноокислий амоній, містить 20,5%N, до 24%S. Можуть бути присутні незначні домішки сірчаної кислоти, що надає слабокислої реакції. Технічний сульфат амонію може мати домішки Ca, Mg, SiO_2 [149, 153].

Калійні добрива. Калієва селітра (KNO_3) є висококонцентрованим азотно-калієвим добривом з вмістом 13,59% N і 46,5% K_2O . Розчинність у воді висока при незначній гігроскопічності. Фізіологічно лужне добриво. Поташ (K_2CO_3). У кальцинованому поташі є 63-66,7% оксиду калію, що також зменшує гігроскопічність. Розчинність - 113,5 г. на 100 г. води при 20°С. Сульфат калію (сірчаноокислий калій K_2SO_4). Найцінніше добриво, особливо для культур, які страждають від хлоридів, містить K_2O до 48%, не більше 1%MgO і не більш 10% вологи. Добриво негігроскопічне, призначене для підкислення ґрунту. Розчинність - 10 г. на 100 г. води. Хлористий калій (KCl) - основне калійне добриво в усьому світі. Вміст оксиду калію хімічно чистої солі - 63,2%, технічній солі 52,4 - 61,9%. Гігроскопічність підвищена. В добриві 1 сорту міститься 60% оксиду калію; 2 сорту - 58%. Вологість обох сортів - не

більше 1% [149, 153]. Фосфорні добрива. Подвійний суперфосфат $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ містить 45% P_2O_5 і 3-5% вільної фосфорної кислоти. Суперфосфат $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ містить 19,5% фосфору з апатитового концентрату і 14% з фосфоритів, а також до 5,5% вільної фосфорної кислоти, що значно погіршує якості. Для усунення цього недоліку застосовують нейтралізацію добавками вапна, крейди, аміаку. У добриві першого сорту міститься не менше 19,5% P_2O_5 , 2-го сорту-19%, 3-го сорту - 14%, вміст води 15-16%, гіпсу-до 40%. Фосфоритне борошно у даний час випускається з вмістом P_2O_5 для вищого сорту-25%, 1 сорту-22%, 2 сорту-19%, діаметр крупинок - 0,17 мм [149, 153].

Комплексні добрива. Амофос - суміш $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ і $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Являє собою подвійне комплексне добриво для різних ґрунтів під різні сільськогосподарські культури. Містить 10-12% азоту. Кристали калімагnezія $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4$ легко розчинні у воді. Містить 28-30% K, в K_2O і 8-10% Mg в MgO. Має малу гігроскопічність. Нітроамофоска, комплексне азотно-фосфорне добриво. Гранули складаються з аміачної селітри, амофосу, частково діамофосу, NH_4Cl , NH_4NO_3 , KNO_3 -водорозчинних солей. Азофоска містить 18,2% N, 14,6% P_2O_5 , 14,6% K_2O . Для зменшення гігроскопічності гранули поверхнево обробляються гідрофобними речовинами. Нітрофоска - суміш амофосу з калійної селітрою, нітратом калію. Нітрофоска представляє собою потрійне комплексне добриво для різних ґрунтів під різні сільськогосподарські культури. Містить 35-52% N, P_2O_5 та K_2O . Добриво розчинне у воді [149, 153].

Корозійна активність добрив. На інтенсивність корозійних процесів, враховуючи гігроскопічність мінеральних добрив, впливає вологість, з підвищенням рівня якої збільшується ступінь дисоціації і електрохімічної активності, при цьому проходить більш інтенсивна дифузія іонів заліза від анодних ділянок, що спричиняє збільшення швидкості корозії. При надмірному підвищенні вологості, внаслідок зменшення надходжень до поверхні металу кисню з повітря матиме місце певне сповільнення швидкості корозії. У залежності від вологовмісту добрив, для кожного типу мінерального добрива, є власний максимум швидкості корозії. Для всіх добрив, крім мідного купоросу,

залежність швидкості корозії від вологи графічно зображується кривими з максимумами, які відповідають певному вмісту вологи. На основі результатів досліджень складено ряд корозійної активності мінеральних добрив, табл. 1.16, 1.17 [73, 269, 270].

При збільшенні вологості вказаних добрив, окрім сільвініту і сечовини, утворюються відповідні кислоти. Хімічна активність кислот залежить від коефіцієнта (ступені) дисоціації α : чим коефіцієнт α вищий, тим кислота хімічно активніша. У розчинах слабких електролітів ступінь дисоціації менше 3%. Електроліти середньої сили мають значення α понад 3% і менше 30%, α сильних електролітів понад 30%. Сильними електролітами є розчинні луги: NaOH, KOH, Ca(OH)₂, ін.; сильні мінеральні кислоти: HCl, HNO₃, H₂SO₄, HClO₃, розчинні солі. До електролітів середньої сили належать органічні кислоти (HCOOH, H₂C₂O₄), мінеральні кислоти (HNO₂, H₂SO₃, H₃PO₄), луги Mg(OH)₂, солі HgCl₂. До слабких електролітів належать малорозчинні луги, слабкі мінеральні кислоти (H₂S, HCN, H₂CO₃, H₂SiO₃), майже всі органічні кислоти, вода, гідрат аміаку.

За корозійною активністю мінеральні добрива поділяються на три групи: високої (1), середньої (2) і низької (3) корозійної активності, табл.1.16, 1.17 [73, 269, 270]. Характерною особливістю процесів корозії є те, що з часом в нітрофосці та суперфосфаті швидкість корозії зменшується, а в сечовині збільшується. Отже ряд корозійної активності мінеральних добрив буде змінюватися: при корозії в річний період в нітрофосці, суперфосфаті захисні плівки на зразках не встигли утворитися і корозія проходила без помітного гальмування [269, 270]. Зміни груп за корозійною активністю при дослідженнях у часі не відбувається.

Характер корозійних пошкоджень при корозії в середовищі мінеральних добрив для кожного виду добрива і матеріалу буде різним.

Таблиця 1.16

Корозійна активність мінеральних добрив за втратою маси

№ з/п	Добриво	Вологість (%)	Швидкість корозії сталі Ст 5, (г/м ² ·міс)
1	Мідний купорос	22-24	335
2	Нітрофоска	14-16	130
3	Сульфат амонію	10-12	115
4	Суперфосфат	24-26	90
5	Аміачна селітра	14-16	70
6	Калійна сіль	10-12	45
7	Борат магнію	28-30	38
8	Борнодатоліт	28-30	30
9	Сечовина	10-11	24

Таблиця 1.17

Групи корозійної активності мінеральних добрив

Група		
1	2	3
Мідний купорос Сульфат амонію Нітрофоска	Аміачна селітра Суперфосфат Сильвініт	Сечовина Борат магнію Борнодатоліт

В певних добривах корозія проходить рівномірним шляхом, в інших переважає місцева корозія з утворенням глибоких пітінгів, що часто призводить до руйнування деталей при загальній незначній корозії. В табл. 1.18 добрива поставлено в ряд корозійної активності за глибиною дефектів [269, 270], який відрізняються від ряду активності за втратою маси. При корозії металу в нітрофосці, глибокі пітінги утворюються внаслідок присутності іонів HPO_4^{2-} і PO_4^{3-} , які сприяють утворенню захисної плівки, одночасно з ними в нітрофосці є іони хлору, які перешкоджають утворенню плівки і сприяють депасивації металу. Пітінгова корозія починається з руйнування захисної плівки іонами хлору на поверхні металу, при цьому створюються сприятливі умови для

виникнення тривалих місцевих різниць потенціалів. Анодом гальванічної пари буде активна мала поверхня, катодом – покрита захисною плівкою поверхня металу, відбувається інтенсивне руйнування анодних ділянок у глибину. Утворення на поверхні металу нерозчинних продуктів корозії і поява диференціальної аерації призводить до розвитку джерел пітингової корозії. Доступ кисню під шар утворених продуктів корозії утруднений, що призводить до посилення анодного розчинення заліза. Збільшення шару іржі утруднює доступ кисню до даної ділянки металу, корозійні процеси розвиваються автокаталітично. Корозія в сульфаті амонію проходить рівномірно, без пітингів, виразок, отже вказане добриво у таблицю 1.18 не внесене [269, 270].

Таблиця 1.18

Корозійна активність мінеральних добрив за глибиною пітингів

№ з/п	Добриво	Глибина пітингів при корозії Ст 5, мм		
		3 міс	6 міс	12 міс
1	Нітрофоска	0,55	0,75	1,70
2	Мідний купорос	0,52	1,00	1,10
3	Борат магнію	0,50	0,70	0,75
4	Калійна сіль	0,30	0,50	0,55
5	Аміачна селітра	0,20	0,35	0,50
6	Сечовина	0,15	0,30	0,45
7	Борнодатоліт	0,10	0,15	0,40
8	Суперфосфат	0,06	0,10	0,30

Корозійно-втомна міцність в середовищах добрив. На зниження втомної міцності домінуючий вплив чинять корозійні пітинги, загальні втрати у масі не суттєві, табл. 1.19 [296, 270]. При дослідженнях корозійної стійкості в середовищах мінеральних добрив, випробовуються найбільш застосовувані у с/г машинобудівні сталі звичайної якості і якісні. Характерно, що матеріали, корозійностійкі в певних мінеральних добривах, можуть суттєво кородувати в інших.

Таблиця 1.19

Вплив глибини пітінгів на межу витривалості сталі 45

Добриво	Глибина пітінгів, мм	σ_{-1} , МПа
Мідний купорос	1	156
Нітрофоска	0,75	167
Сульфат амонію	-	190
Аміачна селітра	0,35	200
Сильвініт	0,40	208
Сечовина	0,30	225

Для порівняння, у літературних джерелах [269, 270] вводиться поняття відносної корозійної стійкості, яке характеризується відношенням швидкості корозії зразка, виготовленого базової у с/г машинобудуванні сталі – Ст3 до швидкості корозії зразка, який досліджується. Корозійна стійкість Ст3 вища стійкості якісних конструкційних сталей, що пояснюється меншим вмістом вуглецю у вигляді цементиту (Fe_3C), частинки якого є катодними включеннями, табл. 1.20 [269, 270]. При збільшенні вмісту вуглецю, катодна площа на поверхні зразка збільшується, катодні процеси прискорюються, збільшується швидкість корозії. Мінеральні добрива ($\text{pH} < 7$), в середовищах яких спостерігаються явища збільшення швидкості корозії матеріалів із зростанням вмісту вуглецю, є кислими середовищами, в яких знаходяться агресивні аніони Cl^- , SO_4^{2-} руйнуючі оксидні плівки, отже явищ пасивації з збільшенням вуглецю в матеріалах не спостерігається. Таким чином, при корозії вуглецевих сталей в даних мінеральних добривах має місце перший випадок впливу катодних включень на швидкість корозії [270].

Таблиця 1.20

Корозійна стійкість вуглецевих сталей в мінеральних добривах

Найменування добрива	Матеріал								
	Ст 3	Сталь 35		Сталь 45		Сталь 50		Сталь 65	
	Корозія (г/м ² ·рік)	Корозія (г/м ² ·рік)	Відносна корозійна стійкість	Корозія (г/м ² ·рік)	Відносна корозійна стійкість	Корозія (г/м ² ·рік)	Відносна корозійна стійкість	Корозія (г/м ² ·рік)	Відносна корозійна стійкість
Мідний купорос	2078	2248	0,942	2942	0,706	2319	0,896	2968,2	0,700
Сульфат амонію	1055	1308	0,807	1294	0,815	1077	0,979	1534,0	0,689
Нітрофоска	886,9	938,0	0,945	984,2	0,901	988,6	0,898	976,3	0,911
Сильвініт	574,3	655,5	0,876	60,1	0,954	586,0	0,980	594,1	0,958
Аміачна селітра	399,8	494,1	0,809	522,3	0,765	547,3	0,730	563,1	0,709
Суперфосфат простий	359,0	446,0	0,804	372,5	0,963	385,0	0,932	384,3	0,934
Сечовина	342,0	368,0	0,929	371,7	0,924	340,0	1,00	375,4	0,911
Суперфосфат гранульований	338,4	427,0	0,791	351,2	0,963	363,6	0,930	361,3	0,940
Борат магнію	288,9	730,0	0,394	763,0	0,377	802,0	0,360	810,3	0,355

Корозійна стійкість інструментальних сталей У8 і У7 у порівнянні з сталями звичайної якості в середовищах добрив високої активності нижча. При корозії в аміачній селітрі, простому суперфосфаті, спостерігається явище пасивності з причини вищого вмісту вуглецю, отже корозійна стійкість інструментальних сталей в таких добривах відносно сталі Ст3 буде вищою [269, 270]. У випадку легованої сталі, наприклад, 45Х, табл.1.21 [269, 270], для добрив високої активності, стійкість сталі 45 більша від стійкості сталі 45Х. Підвищення корозійної стійкості хромистих сталей спостерігається винятково при відсутності окислювачів, коли на поверхні поява захисної пасивної плівки буде можливою. Всі технічні сплави заліза з хромом є потрійними системами (залізо – хром - вуглець) [270]. Вуглець карбід Fe_3C , CrC , Cr_7C_3 , є катодними включеннями, тому при порушеннях іонами міндобрив захисної пасивної плівки швидкість корозії збільшується, в добривах з високою хімічною активністю, можливість пасивації незначна.

Таблиця 1.21

Корозійна стійкість сталі 45Х

Добриво	Сталь 45Х	
	Корозія (г/м ² ·рік)	Відносна корозійна стійкість
Мідний купорос	4285	0,485
Сульфат амонію	1937,5	0,544
Нітрофоска	1342,0	0,660
Сильвініт	541,4	1,060
Аміачна селітра	615,8	0,648
Суперфосфат простий	489,1	0,734
Сечовина	235,0	1,540
Суперфосфат гранульований	465,1	0,727
Борат магнію	1074,5	0,268
Борнодатоліт	213,4	1,143

Наприклад, корозійна стійкість сталі 45 вища стійкості сталі 45Х. Для підвищення корозійної стійкості хромистих сталей, вміст хрому повинен бути вище 12%, сталі 1Х13 і 1Х18Н9Т у мінеральних добривах, показали добру корозійну стійкість[270]. Нержавіючі сталі відрізняються легкістю пасивації та стійкістю пасивного стану, на поверхні є щільна, тонка і еластична захисна плівка. Під плівкою і в порах плівки атоми і іони кисню хемосорбовані металом. Хемосорбційний процес окислювача (кисню) в метал, створює зміну електрохімічних і корозійних властивостей, яка є характерною для нержавіючих сталей. Хемосорбція кисню відбувається внаслідок структурної неоднорідності за рахунок анодної поляризації поверхні сталі. Поверхня, що має захисну плівку, приймає значення, близьке до окислювально - відновного потенціалу середовища, стає катодом, а пори в плівці – активні ділянки – стають анодами. В результаті самополяризації кисень глибоко входить в метал і служить перехідним шаром від металу до захисної плівки, покращуючи її зчеплення з металом [269, 270]. Так, нержавіючі сталі 1Х13 і 1Х18Н9Т показали хорошу корозійну стійкість у всіх мінеральних добривах, крім калійної солі і нітрофоски, при корозії в яких були відмічені значні корозійні пошкодження у вигляді глибоких пітінгів, причому їхня глибина для сталі 1Х13 більша, у порівнянні з сталлю 1Х18Н9Т [269]. Для нержавіючих сталей внаслідок порушення пасивності на мінімальних площах поверхні металу точкова корозія є типовою. Явище супроводжується утворенням гальванічної пари, анодом є маленька за площею поверхня, а катодом – вся поверхня пасивного металу. Велика різниця потенціалів, характерна для вказаного елемента забезпечує значний анодний струм, чим пояснюється сильний корозійний процес на малій площі анодної поверхні. В літературі є дані про незначний вплив марганцю на корозійну стійкість [270].

Отже, у мінеральних добривах сталь Ст 3 показала кращу стійкість від інструментальних сталей. Також, корозійна стійкість сталі звичайної якості Ст 3 краща від стійкості якісних конструкційних сталей (20, 25, 35, 45) у всіх

добривах, крім борнодатоліту, який у сільському господарстві використовується рідко. Отже, для виготовлення металоконструкцій, які контактують з добривами рекомендується ширше застосовувати сталі звичайної якості [269, 270].

1.6. Аналіз впливу корозійно - експлуатаційних факторів на залишковий ресурс елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин

Вплив агресивних середовищ значно зменшує ресурс елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин. В місцях пошкоджень поверхонь несучих вузлів металевих конструкцій виникають корозійні пітинги, виразки, зароджуються корозійно-втомні поверхневі тріщини, які розвиваються до критичних розмірів, виникає небезпека виходу машини з ладу. Швидкість росту корозійно-втомних тріщин є набагато більша від швидкості росту втомних в тих самих матеріалах [97, 212, 249, 275, 311]. Це приводить до значного зменшення ресурсу елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин, що необхідно враховувати при моделюванні і обчисленнях довговічності. Важливо дослідити вплив агресивних середовищ (мінеральні і органічні добрива, корозійно-активні ґрунти і ін.) на втомне руйнування матеріалів і зварних з'єднань сільськогосподарських машин.

При внесенні органічних і мінеральних добрив, обробці полів отрутохімікатами для знищення шкідників, на поверхні металоконструкції осідає пил від хімікатів, що у поєднанні з вологою створює агресивне середовище і призводить до інтенсивних корозійних руйнувань [97, 122, 138, 212, 249, 275, 311]. Швидкість руйнівних процесів залежить від агресивності середовища, тривалості його дії, температури повітря, стану поверхні металу (складу і структури захисної плівки), хімічного складу металу і наявності

механічних напружень, а також від особливостей конструкції: наявності зварних швів, болтових і заклепочних з'єднань, поєднання окремих елементів, що створюють порожнини, щілини, в яких конденсується волога. Атмосферна корозія деталей сільськогосподарської техніки може збільшитися в рази за наявності залишків мінеральних і органічних добрив, отрутохімікатів, ґрунту. Локальні пошкодження максимальної глибини утворюються при корозії деталей у нітрофосці, сульфаті амонію, мідному купоросі. З органічних добрив найбільш корозійно - активні торфові компости, найменше – екскременти корів і гній на їх основі, а також низовинний і верховий торф. Частинки забруднень, що залишилися після очищення машин, за наявності вологи є хімічно активними і прискорюють процеси корозії. Наявність забруднення на деталях збільшує корозію, оскільки у поєднанні з вологою створюється активне електрохімічне середовище, що інтенсифікує процеси. Корозія найбільш небезпечна для деталей, які працюють при циклічних навантаженнях. Термін служби деталей внаслідок втомних руйнувань на практиці часто скорочується до 50%. При аналізі зламів деталей встановлено, що початком і причиною багатьох руйнувань були корозійні виразки і пітинги. Найшвидше руйнуються вузли й деталі з тонколистової сталі, внутрішні поверхні ємностей для отрутохімікатів, ін. [97, 122, 138, 212, 249, 275, 311].

При розробці методів розрахунку залишкового ресурсу і залишкової міцності елементів конструкцій при корозійному і втомному руйнуваннях виникає необхідність дослідження корозійної тріщиностійкості конструкційних сталей і зон зварних з'єднань металоконструкцій. Необхідно провести дослідження впливу експлуатаційних агресивних середовищ на корозійно-циклічну тріщиностійкість поширених у с/г машинобудуванні груп вуглецевих та легованих сталей [22, 202, 225].

Потенційна небезпека руйнування при дії корозійних середовищ більш значна при циклічних навантаженнях. Це обумовлено тим, що розвиток корозійно-втомної тріщини може спостерігатися і при рівні КІН

нижчому за пороговий, досягнення якого є необхідною умовою для корозійно-статичного росту тріщини. У зв'язку з цим сталі характеризуються підвищеною чутливістю до агресивної дії корозійного середовища при змінних навантаженнях [250].

Закономірності росту корозійно-втомних тріщин визначаються системою метал-середовище, коефіцієнтом асиметрії циклу, частотою, формою циклу навантаження, температурою випробувань, рівнем потенціалу зовнішньої поляризації і т. д. Зменшення частоти прикладених навантажень приводить до збільшення швидкості розвитку корозійно-втомних тріщин у сталях, даний ефект максимальний в області рівнів середніх КІН [251]. Відповідно до досліджень [71], на кінетичній діаграмі втомного руйнування трубної сталі в умовах катодної поляризації з'являється плато, в межах якого спостерігається сталість швидкості росту тріщини. По мірі зниження частоти навантаження плато фіксується при більш високих частотах з збільшенням його довжини. Одна з особливостей визначення корозійно-циклічної тріщиностійкості матеріалів обумовлена специфікою електрохімічної ситуації у вершині тріщини, що розвивається, з причини суттєвої різниці від умов на поверхні зразка. Степінь такої відмінності у системі метал – середовище залежить від довжини тріщини, напружено-деформованого стану у вершині, часу дії середовища, потенціалу зовнішньої поляризації та інших чинників [23], у зв'язку з чим середовище по різному впливає на процес корозійно-втомного руйнування металу. З метою достовірного визначення необхідних характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалу в заданому корозійному середовищі [23, 165-167] розроблено модель, згідно якої зона передруйнування матеріалу, деформованого в водному середовищі, характеризується трьома параметрами: максимальним значенням КІН циклу; значеннями водневого показника середовища; значеннями електродного потенціалу метала у вершині тріщини.

В процесі розвитку корозійно-втомної тріщини кожному значенню швидкості росту на кінетичній діаграмі втомного руйнування повністю

відповідають відповідні електрохімічні умови у вершині тріщини, залежні від початкового електрохімічного стану в момент старту тріщини, а також від часу дії середовища і швидкості утворення нової поверхні [87]. Тому достатньою і необхідною основною умовою для отримання однозначних даних про швидкість росту тріщини і корозійного середовища (інваріантних кінетичних діаграм втомного руйнування) є дотримання ідентичності електрохімічних умов у вершині тріщини по мірі її розвитку [23, 165]. У реальній конструкції зміна вказаних параметрів у зв'язку з можливим впливом випадкових експлуатаційних факторів має імовірнісний характер, отже виникає проблема вибору базової діаграми втомного руйнування для досліджуваної системи «метал-середовище». Ця задача розв'язується шляхом побудови інваріантних діаграм з відповідним граничним електрохімічним станом у вершині корозійно-втомної тріщини.

Характер дії корозійного середовища на процес втомного руйнування визначається не тільки структурно-металургійним станом сталі і типом середовища, але і умовами циклічного навантаження. Зокрема, від частоти і асиметрії навантаження в більшій степені залежать склад середовища у вершині тріщини, в значній мірі обумовлює її активність, умови утворення свіжих поверхонь, а також доставки і накопичення компонентів середовища в зону передруйнування [224, 250, 253].

Вплив параметрів навантаження. Для більшості конструкційних сталей при сумісній дії циклічних навантажень і робочих середовищ процес корозійно-втомного руйнування в залежності від конкретних умов навантаження може відбуватися як за механізмом корозійної втоми, так і корозійної втоми під напруженням [138]. Реалізація механізму зростання корозійної тріщини визначатиметься комбінацією значень через контроль параметрів: частоти навантаження, коефіцієнта асиметрії циклу. Зокрема, збільшення частоти приводить до придушення «скачка», тобто різкого прискорення росту тріщини. В результаті реалізується кінетична залежність, яка характерна для процесу корозійної втоми. Відповідно до

експериментальних даних, отриманих при випробуваннях високоміцних сталей в широкому діапазоні значень частот і коефіцієнта асиметрії циклу для різних їхніх поєднань запропоновано [97, 251] прості вирази для визначення межі на кінетичній діаграмі корозійно-втомного руйнування між областями корозійної втоми і корозійної втоми під напруженням, причому її місце розміщення на діаграмі для даної системи метал-середовище визначається конкретними характеристичними значеннями частоти навантаження і коефіцієнта асиметрії циклу.

Згідно аналізу порогової тріщиностійкості ряду сталей, залежно від величини статичної розтягуючої компоненти, зростання коефіцієнту асиметрії циклу спричиняє зниження характеристичного КІН при випробуваннях на повітрі і у корозійних середовищах [251]. При цьому послаблення ефекту закриття втомних тріщин вважають головною причиною падіння припорогової циклічної тріщиностійкості матеріалів при підвищенні коефіцієнта асиметрії. Помітно проявляється чутливість вуглецевих сталей до дії середовища тільки в діапазоні наднизьких частот навантаження. При випробуваннях сталі 20Г встановлено, повітря не впливає на кінетику втомних тріщин, а оцінка дистильованій воді в діапазоні 0.01 Гц виявила максимум прискорення. [32]. Кінетика корозійно-втомного руйнування в значній мірі залежить від форми циклу навантаження: дослідженнями тріщиностійкості сталі типу 20ХН2МФА встановлено, що ступінь прискорення росту тріщин середовищем в процесі навантаження залежить від форми циклу [32].

Вплив фізико-хімічних чинників. При дослідженні закономірностей росту корозійно-втомних тріщин в залежності від типу середовища, зокрема для підкисленого розчину хлориду натрію, повітря і силікону встановлено, що поріг циклічної тріщиностійкості нержавіючих сталей залежить від агресивності середовища і для кожної з сталей досягає максимального значення при присутності силікону. Порівняно з повітрям, рівень порогового КІН у маслі зростає, оскільки збільшується розмір пластичної зони і,

відповідно, ступінь проявлення тріщин [34]. Для системи високоміцна сталь - дистильована вода виявлено, що обезкиснення води прискорює ріст тріщин при середніх ΔK , не роблячи впливу в низькоамплітудних і високоамплітудних областях навантажень. Накладання зовнішньої катодної поляризації обумовило якісно аналогічний результат, хоча у розчинах хлоридів прискорення розвитку тріщин спостерігається при низьких КІН. Важливим чинником інтенсифікації руйнування є підвищення температури випробувань в інтервалі 25...85 °С. Ступінь прискореної дії температури випробувань на ріст тріщин істотно залежить від частоти навантаження і досягає максимуму в діапазоні досліджуваних частот 1 Гц.

Вплив корозійних факторів на тріщиностійкість матеріалів.

Розрізняють три основні механізми впливу корозійного середовища на тріщиностійкість конструкційних матеріалів: адсорбційний спад міцності, водневе окрихчування, хімічне розчинення [163, 249]. Адсорбція поверхнево активних речовин на поверхні високонапруженого матеріалу в вершині тріщини приводить до зменшення поверхневої енергії і полегшує руйнування. Основним процесом, що прискорює докритичний ріст тріщини і призводить до поломок і відмов є окрихчення малої області поблизу вершини тріщини. Атомарний водень, який завжди присутній у середовищах в чистому виді, чи зв'язаний з нейтральними молекулами, в результаті дифузії може проникати у всі метали. Розчинність водню при нормальних температурі і тиску складає від 10 до 100 см³ на 1 кг. металу. Окрихчування спостерігається при концентрації від 2 см³/кг металу, а при 10 см³/кг є небезпечним [163, 249]. Для металу найбільш вразливими для проникнення водню є ділянки не захищених окисною плівкою нових поверхонь.

Сталі низької та середньої міцності при статичних навантаженнях в слабо корозійних середовищах мало чутливі до корозійних розтріскувань. Проте при циклічних навантаженнях вплив середовищ виражений сильніше і він залежить від частоти навантажень, на відміну від випробувань на повітрі. Наприклад, для сталі 20Г встановлено, що при випробуваннях в

дистильованій воді для фіксованого КІН спостерігається максимум прискорення росту тріщини на середньоамплітудній ділянці КДВР при частоті навантаження 0,01 Гц [2]. Для інших сталей вплив середовища на ріст втомної тріщини може монотонно зростати з зменшенням частоти навантаження [32]. Явище, що при зниженні частоти навантаження в області наднизьких частот швидкість росту тріщини повинна досягти насичення і перейти через максимум, передбачається, виходячи з відомих літературних даних нечутливості низькоміцних сталей до корозійного розтріскування, оскільки в області низьких частот має місце і домінує фактор квазістатичного навантаження. А положення максимуму впливу середовища на ріст втомної тріщини по відношенню до частоти залежить від даної конкретної системи метал-середовище, від умов навантаження, асиметрії, температури і т.д.

При контакті металів з розчинами, які проводять струм, в результаті електрохімічної реакції корозії відбувається інтенсивне розчинення. Отже, необхідно розглядати металічні сплави і кислі електроліти, при контакті яких на катодній ділянці поверхні відбувається відновлення водню. Такий випадок є важливий тим, що поряд з хімічним руйнуванням металу при електрохімічній корозії проходить його наводнення, що спричиняє водневу крихкість металу і прискорене руйнування. Процес відбувається інтенсивно при одночасній сумісній дії на метал корозійно - активного середовища і циклічного навантаження, при цьому має місце корозійно-втомне руйнування металу. З результатів праць [97, 212, 224, 249, 275], механізмами корозійно-втомного руйнування металів є процеси зародження і розвитку тріщин, що аналітично описуються функцією швидкості росту втомної тріщини, яка залежить від [97, 224, 249, 275] біжучої довжини тріщини, кількості циклів навантаження; параметра, який характеризує механічну ситуацію в зоні передруйнування біля вершини тріщини, концентрації водню на поверхні вершини тріщини, грам-еквівалентної ваги, числа Фарадея, водневого показника розчину електроліту біля поверхні вершини тріщини,

електродного потенціалу на поверхні металу, густини струму корозії на поверхні металу.

При дослідженнях електрохімічної корозії конструкційних сталей з урахуванням геометричних характеристик поперечних перетинів елементів несучих металоконструкцій с/г машин, необхідно розглянути ряд задач та провести моделювання з метою спрощення форми перетину.

На сьогодні у літературних наукових джерелах недостатньо досліджено процеси дифузії іонів дальнього і ближнього полів електроліту, особливо у тонких об'ємах - тріщинах, відповідно не складені математичні моделі. Домінуючим завданням при оцінці довготривалої пошкодженості металу в результаті електрохімічної корозії є визначення кінетики приходу іонів водню до катодних ділянок поверхні металу. За дослідженнями [115, 130], недостатньо розглянуті процеси наводнення металу в результаті водневої деполяризації катоду. У [7, 15] недостатньо досліджені електричні поля поверхонь металу в залежності від геометрії, особливо для тріщин з врахуванням змін які відбуваються у часі.

1.7. Висновки та задачі досліджень

1. Аналіз розвитку сільськогосподарських машин, зокрема причіпних розкидачів добрив, вказує на наступні тенденції створення сучасної високоефективної техніки:

- впровадження ресурсозберігаючих технологій;
- застосування електронних пристроїв керування, зокрема глобальної системи позиціонування Differential GPS;
- комплектування розкидачів обладнанням для рядкового внесення добрив;
- збільшення місткості кузовів, бункерів;

- розміщення на самохідних розкидачах трьохсекційних кузовів для азотних, фосфорних, калійних добрив;
- застосування в розкидачах елементів з неіржавіючих сталей;
- підвищення робочих і транспортних швидкостей техніки;
- збільшення ширини захвату машин;
- використання розкидних дисків збільшеного діаметра, для надання гранулам більшої швидкості на виході для мінімізації впливу вітру;
- підвищення напрацювання на відмову.

2. Аналіз корозійних пошкоджень сільськогосподарської техніки показав, з причини спільного впливу атмосферної корозії і робочих механічних навантажень внаслідок перевантажень і втрати міцності від корозійних пошкоджень з ладу виходять 20 ... 25% с/г машин. Незважаючи на поширені корозійні руйнування металоконструкцій, виразки, пітінги, нормативні терміни служби агрегатів, на сьогодні, встановлюються без урахування впливів агресивних робочих середовищ і експлуатаційної навантаженості.

3. При виконанні технологічних процесів внесення добрив на елементи несучих систем діють випадкові складні комбінації різноорієнтованих у просторі силових факторів. Близько 80% енергії випадкових процесів зосереджено в діапазоні частот 1-3,5 Гц.

4. Проблематика корозії в середовищах мінеральних та органічних добрив вивчена недостатньо, трактування механізмів суперечливе з причини відсутності повної достовірної інформації про корозійну і електрохімічну поведінку машинобудівних сталей.

5. Класичні методи оцінки довговічності несучих систем с/г машин при експлуатаційних навантаженнях в агресивних середовищах, високому рівні залишкових напружень і наявності корозійних пошкоджень, які призводять до появи пітінгів на ранній стадії експлуатації машин, не забезпечують адекватне прогнозування довговічності. Для моделювання процесів

утворення і розвитку дефектності необхідно застосовувати підходи термодинаміки і механіки корозійно - втомного руйнування.

6. На сьогодні недостатньо досліджено процеси дифузії іонів дальнього і ближнього полів електроліту, особливо у тріщинах, мало досліджено процеси наводнення металу в результаті водневої деполяризації катоду, не досліджено електричні поля для різних геометрій поверхні, що необхідно урахувати при побудові аналітичних моделей процесів фактичної корозійно - втомної пошкодженості з урахуванням геометричних характеристик поперечних перетинів елементів несучих металоконструкцій с/г машин.

7. На даний час, з урахуванням, що швидкість росту корозійно-втомних тріщин є набагато більша від швидкості росту втомних в аналогічних елементах несучих систем розкидачів, практично відсутні інженерні методи моделювання фактичного НДС з оцінкою міцності і довговічності несучих структур, які враховують розвиток дефектності у агресивних середовищах при фактичних експлуатаційних навантаженнях причіпних машин для внесення добрив.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних основ і аналітично - емпіричних методів оцінки та прогнозування ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням впливу агресивно - експлуатаційних факторів.

На основі ідентифікації відомих у літературі теоретичних і експериментальних досліджень міцності і довговічності несучих структур сільськогосподарських машин, вирішення даної проблеми зведено до розв'язку наступних фундаментальних та прикладних задач:

1. Дослідження механізмів корозійної та електрохімічної поведінки конструкційних сталей у агресивних експлуатаційних середовищах добрив.
2. Встановлення впливу робочих середовищ і фактичної експлуатаційної навантаженості на процеси та характеристики втомного руйнування та

- циклічної тріщиностійкості матеріалів несучих систем розкидачів добрив експериментальним шляхом.
3. Розробка моделі процесів корозії в тріщині шляхом опису нестационарного потоку водню в метал як функції концентрації іонів в електроліті, навантаженості та стандартного електродного потенціалу металу з урахуванням типу і закономірності утворення пасивувального шару, а також електрохімічних реакцій між вершиною і берегами тріщини в агресивних сільськогосподарських середовищах.
 4. Розробка розрахункової моделі визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних наскрізних тріщин в тонкостінних елементах металоконструкцій с/г техніки на основі підходів термодинаміки нерівноважних процесів і механіки втомного поширення тріщин при дії статичних навантажень і агресивних середовищ.
 5. Розробка математичної моделі визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій з наскрізними тріщинами у агресивно - експлуатаційних умовах.
 6. Розробка математичних співвідношень у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних з обґрунтованими початковими і кінцевими умовами для визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів несучих структур розкидачів добрив з поверхневими тріщинами.
 7. Розробка теоретичних основ методики визначення ресурсу тримких металоконструкцій причіпних розкидачів добрив за умов їх експлуатації. Адаптація даної методики для визначення довговічності типових для даного типу с/г машин відкритих профілів при сумісній дії динамічних навантажень та середовищ органічних і мінеральних добрив.
 8. Створення математичної моделі визначення залишкового ресурсу несучих систем розкидачів при циклічних згинальних деформаціях тонкостінних замкнутих профілів з поверхневими багаторозмірними

- корозійними пошкодженнями при агресивно - експлуатаційних впливах.
9. Розробка ефективного методу наближеного обчислення КІН при довільному навантаженні поверхневих тріщин в замкнутих профілях несучих структур розкидачів.
 10. Розробка методики і проведення польових експериментальних випробувань з визначенням параметрів фактичної навантаженості причіпних розкидачів добрив.
 11. Побудова розрахункових моделей НДС несучих металоконструкцій машин для внесення добрив з урахуванням експлуатаційної навантаженості.
 12. Розробка методики комплексної розрахунково-експериментальної оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням агресивно - експлуатаційних факторів.

РОЗДІЛ 2

КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ В СЕРЕДОВИЩАХ МІНЕРАЛЬНИХ ТА ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ

2.1. Аналіз втрат від корозійних пошкоджень сільськогосподарської техніки

Дослідженням причинно - наслідкових зв'язків зниження надійності сільськогосподарської техніки внаслідок пошкоджень від корозії машинобудівних матеріалів, зокрема сталей якісних і звичайної якості, а також розробці заходів для підвищення показників корозійної і корозійно - втомної надійності присвячено наукові праці Севернева М.М., Пучина Є.А. Меламеда М.Н., Северного А.Г., Гайдара С.М., ін. [140, 222, 273, 279]. Вченими доведено, що одними із найнебезпечніших чинників, які призводять до відмов сільськогосподарської техніки є корозія та корозійно-механічні руйнування основних вузлів сільськогосподарської техніки протягом їхньої роботи на полях, а також при зберіганні, враховуючи сезонність роботи. Статистика відмов сільськогосподарських машин і агрегатів в Україні і інших державах (розділ 1) вказує на необхідність поглибленого детального аналізу причин зниження довговічності і роботоздатності. Поряд із об'єктивними обставинами вичерпання ресурсу машинно - тракторних парків, відсутністю достатніх коштів на поновлення техніки, проведення необхідних ремонтно - відновлювальних робіт, суттєвим фактором виникнення граничних станів також є несумлінне ставлення персоналу до зберігання машин та обладнання аграрного виробництва.

Незважаючи на існуючі дослідження впливів процесів корозії на зниження довговічності сільськогосподарських машин, у тому числі

мобільних, в даній галузі залишається велика кількість питань, які потребують поглибленого дослідження. Зокрема, недостатньо вивчено проблематику корозії в середовищах мінеральних та органічних добрив, трактування механізмів якої суперечливе з причини відсутності повної достовірної інформації про корозійну і електрохімічну поведінку машинобудівних сталей. Експериментальні випробування у даному напрямку роблять можливим поглиблення вивчення причин та механізмів виникнення корозійних пошкоджень і руйнувань сільськогосподарської техніки з метою вироблення комплексу заходів з підвищення показників довговічності с/г машин, які працюють в умовах агресивних середовищ.

Інтенсивний розвиток сільського господарства України передбачає збільшення норм внесення в ґрунт мінеральних і органічних добрив. В цілому, згідно даних Міністерства аграрної політики та продовольства України, в нашій державі під сільськогосподарські культури щороку використовується близько 0,7 млн. т. неорганічних та 13 млн. т. органічних добрив [148]. У світовому сільськогосподарському виробництві перевага надається технологіям точного землеробства, суть яких полягає у прямому внесенні необхідних доз добрив, величина яких визначається на основі аналізу типів ґрунтів і потреб даної культури. Оскільки точне дозування добрив технологічно передбачає їхнє повне засвоєння, то, з однієї сторони, отриманий сільськогосподарський продукт не містить надлишкових хімічних речовин, є екологічно чистим, а з іншої сторони – перевитрати добрив приводяться до мінімуму, що сумарно забезпечує відчутний економічний ефект (праці вчених Адамчука В., Лінника М., Дідуха В., Сала В. ін.)

Аналіз об'ємів використання добрив в Україні виявив зростання частки внесення в ґрунти мінеральних і зменшення частки органічних. Так, наприклад, в порівнянні з 2005 р., у 2011 р. кількість внесених органічних добрив зменшилась на 29% [254], що має об'єктивну причину – зменшення

кількості тваринницьких ферм та поголів'я худоби в індивідуальних господарствах.

Найбільш поширеними мінеральними добривами є азотовмісні, калійні, фосфоровмісні, добрива з мікроелементами та комплексні [147]. Найбільш застосовуваними є карбамід (сечовина), амоніачна та калійна селітри, сульфат амонію, нітрофоска, нітроамофоска, суперфосфат, подвійний суперфосфат, сільвініт, борат магнію, мідний купорос, борнодатоліт. Серед добрив, які виробляються хімічними підприємствами України домінують карбамід та аміачна селітра, частка яких становить 74% [12].

Відомою особливістю експлуатації розкидачів органічних і мінеральних добрив (рис.2.1) є нетривалий період виконання технологічного процесу машинами у складних експлуатаційних умовах, який триває близько 20% від загального часу використана вказаної техніки і тривалий період зберігання [140, 222, 273, 279]. З вказаних причин, забезпечення роботоздатності машин та обладнання здійснюється при профілактичних заходах в міжопераційні періоди.



Рис. 2.1. Загальний вигляд розкидача мінеральних добрив і його робочих органів після одного сезону експлуатації

Відомими науковцями, зокрема Л. Погорілим, В. Аніловичом, Я. Гуковим, В. Спиченковим, Т. Рибакком, ін. визначаються такі показники

надійності сільськогосподарської техніки: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність [12]. Причому, якщо два перші показники можна оцінити кількісно (кількість відмов, час безремонтного використання, відповідність коефіцієнтів реновації до закладених в амортизаційних відчисленнях і т.д.), то оцінка показника ремонтпридатності має відносний характер.

Аналіз причин зниження роботоздатності розкидачів органічних і мінеральних добрив свідчить, що одним з найнебезпечніших чинників є корозійні пошкодження металевих деталей. В розкидачах добрив внаслідок змін, спричинених корозійними пошкодженнями значно зростає нерівномірність розкидання при фіксованому внесенні добрив у ґрунт. Так, за даними [94, 95, 96, 148], нерівномірність внесення добрив розкидачами становить за шириною захвату до 25%, за напрямком руху машини до 10%. Очевидно, дані показники в розкидачах, вражених корозією, помітно зростають, у зв'язку з чим виникає нагальна необхідність обов'язкового врахування впливу процесів корозії на показники надійності сільськогосподарських машин. Основоположниками наукових теоретичних та емпіричних засад в даній галузі є Сєвернев М.М., Пучин Є.А., Новіков А.Н., Меламед М.Н., ін. [140, 222, 273, 279]. В розвинутих країнах втрати від корозії досягають 8-10% валового прибутку у вигляді прямих втрат (10% загальної кількості виплавленого металу) та опосередкованих, які проявляються у вигляді відмов машин, аварій, низької ефективності виконуваних робіт, забруднень навколишнього середовища [140, 147, 222, 254, 273, 279]. У зв'язку з посиленням уваги до екологічної проблематики остання позиція є завуальованим небезпечним наслідком корозійних пошкоджень сільськогосподарської техніки. Як відзначено у розділі 1, внаслідок корозійних пошкоджень розкидачів мінеральних та органічних добрив зростає інтенсивність накопичення хімічних складових в ґрунтах. З позицій охорони навколишнього середовища, потрапляючи у водні

горизонти, надлишкові об'єми добрив поступово стають джерелами екологічної загрози.

Теоретичному і експериментальному аналізу стану машинно - тракторних парків аграрних виробників багатьох країн після різних проміжків експлуатації, зберігання, присвячено ряд робіт українських, білоруських, російських вчених [148, 222, 273, 279]. Корозія, з позицій втрат металу в масі, спричиняє втрати до 0,1%, пошкоджень в сільськогосподарських машинах і призводить до зниження міцності і руйнувань деталей та з'єднань. Найчастіше корозійні пошкодження спричиняють зменшення товщини несучих елементів металоконструкцій, виникнення пітінгів, виразок (листові деталі, швелери, кутники, ін.). Як довів Севернев М.М. [269], при двохсторонній корозії середні втрати за рік для вуглецевих сталей становлять $\sim 140 \text{ г/м}^2$, що відповідає величині 0,035мм., для процесів розвитку корозійних пошкоджень швидкості незначні, при цьому актуальним і необхідним є врахування можливостей локальної корозії, а також проявів інших видів корозійних пошкоджень, зокрема корозії точкової, щілинної, контактної, ниткової, між - та транскристалітної, рівчакової, та ін. Особливо небезпечним є поєднання корозійного та механічного факторів, в результаті сумісної дії яких можуть виникати явища корозійних розтріскувань, корозійної втоми та фретинг - корозії [269]. Прояви багатьох видів корозії зумовлені впливом атмосфери. Тому при розгляді особливостей корозійної деградації сільськогосподарських машин, в першу чергу враховують специфіку атмосферної корозії.

2.2. Атмосферна корозія сільськогосподарських машин і агрегатів

Парк сільськогосподарської техніки, зокрема мобільних машин, зазнає значної атмосферної корозії. Дослідженням проблематики атмосферної

корозії і її теоретичних аспектів присвячено роботи В.А.Кистяковського, Г.В.Акімова, Н.Д.Томашова, І.Л.Розенфельда [40, 117, 246, 296, 297].

Основним фактором, який визначає механізм і швидкість атмосферної корозії є величина вологості. В залежності від відносної вологості повітря можна умовно виокремити наступні типи атмосферної корозії [104]:

1) мокра – корозія при наявності на поверхні видимої плівки рідини. Спостерігається при вологості $\sim 100\%$ внаслідок крапельної конденсації водяної пари, або природних опадів;

2) волога – корозія при наявності на поверхні тонкої невидимої плівки вологи, утвореної внаслідок капілярної адсорбційної конденсації при вологості $< 100\%$;

3) суха – при повній відсутності вологої плівки.

Суха атмосферна корозія не спричиняє помітних корозійних пошкоджень, за механізмом вона аналогічна до хімічного процесу утворення оксидних плівок. Мокра атмосферна корозія, за механізмами, наближається до електрохімічної корозії в електролітах (водні розчини солей, кислот), але, оскільки дифузія кисню (деполяризатору) в тонких шарах електроліту (волога плівка) відбувається значно легше, ніж в об'ємі, внаслідок конвекційного перемішування якість постачання кисню до поверхні металу збільшується, швидкості корозії при цьому можуть бути вищими, ніж в об'ємі розчину.

Утворення плівки на поверхні металу шляхом капілярної конденсації залежить від форми та ступеня кривизни меніска рідини в капілярі. Такими капілярами на поверхні металу можуть бути поверхневі мікрощілини, пори в оксидній плівці, осад на поверхні металу мінеральних і органічних добрив чи їхніх залишків після проведення регламентних робіт.

Над меніском рідини в капілярі встановлюється рівноважний тиск насичених парів, залежність якого від радіуса кривизни меніска r описується відомим рівнянням Томсона

$$P_1 = P_0 \exp\left(-\frac{2\sigma V_m}{RT_r}\right) \quad (2.1)$$

де P_1, P_0 – тиск пари, відповідно, над ввігнутих і плоских менісками;

σ – поверхневий натяг рідини;

V_m – молярний об'єм рідини;

R – газова постійна;

T_r – температура.

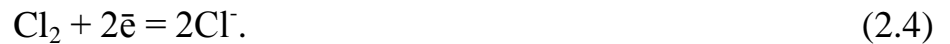
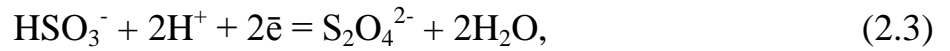
В тонких капілярах переважає адсорбційна конденсація, внаслідок якої можуть утворюватись прошарки вологи товщиною кілька десятків молекулярних шарів. Наступною стадією адсорбційної конденсації є хімічна взаємодія продуктів корозії з водою з подальшим зниженням тиску насиченої водяної пари, що в свою чергу, посилює конденсацію вологи.

Аналіз механізмів атмосферної корозії сплавів заліза в агресивних сільськогосподарських середовищах показує, що даний процес часто протікає з змішаним катодно-анодно-омічним контролем. Факторами впливу на атмосферну корозію можуть бути [246, 296]: 1) вологість; 2) агресивні домішки (SO_2 , SO_3 , H_2S , NH_3 , Cl_2 , HCl); 3) тверді частинки, які сприяють адсорбції вологи та газів; 4) географічний фактор.

Швидкість атмосферної корозії у більшості металів зростає помітно лише після досягнення критичної відносної вологості, при якій на поверхні формується суцільна плівка конденсованої води. Величина критичної вологості залежить від складу атмосфери і стану поверхні металу.

Агресивні домішки, розчиняючись у водній плівці, збільшують її електропровідність, а також гігроскопічність продуктів корозії. Вони можуть діяти, як депасиватори (HCl , SO_2), комплексоутворювачі (NH_3), або катодні деполяризатори (SO_2 , Cl)





Склад атмосфери і географічне розміщення об'єктів досліджень суттєво впливають на швидкість атмосферної корозії. Так, найбільш агресивною є атмосфера індустриальних міст (близькість гірничо-видобувних, металургійних комбінатів, теплоелектростанцій і т.д.). Найбезпечнішою є суха атмосфера континентального клімату (табл. 2.1) [246].

Таблиця 2.1

Вплив атмосфери на швидкість корозії вуглецевих сталей

Атмосфера	Швидкість корозії, мкм/м ² ·рік
Індустриальна, забруднена	100
Індустриальна	65
Морська індустриальна	50
Морська чиста	38
Суха континентальна	1-9

В інтегральній дії географічних факторів, окрім величини вологості, домінуюче значення має температурний чинник. Підвищення температури навколишнього середовища з зменшенням відносної вологості затрудняє конденсацію вологи на поверхні і полегшує випаровування водної плівки. В результаті швидкість атмосферної корозії зменшується. Зниження температури повітря викликає зворотній ефект, з причин зменшення конденсації вологи, випаровування плівки затрудняється.

Важливими показниками корозійних та корозійно-механічних процесів є швидкість корозії, площа корозійних вогнищ, кількість циклів до початку корозійно-втомного руйнування та ін. [114]. Швидкість корозії залежить від типу металів, з яких виготовляються металоконструкції,

агресивності середовищ, тривалості контакту з заданим середовищем, температури, якості зварних швів і болтових з'єднань, наявності систем захисту, наприклад, лакофарбових покриттів і їхньої цілості, а також захисних протикорозійних характеристик [299]. Не зважаючи на існування в металоконструкціях сільськогосподарських машин корозійних пошкоджень, виявлення чітких корозійних першопричин відмов, ресурс окремих сільськогосподарських машин, зокрема розкидачів органічних і мінеральних добрив, оцінюється типово, без урахування дії корозійних чинників в робочий і в міжсезонний періоди. Часто відмови з причин корозії не фіксуються і не враховуються.

2.3. Особливості експлуатації і зберігання сільськогосподарських машин з позицій корозійної стійкості

Специфікою експлуатації с/г техніки, зокрема розкидачів мінеральних і органічних добрив є відносно нетривалий робочий період і достатньо тривалий міжсезонний період. Існує позиція [137], що міжсезонне зберігання контролює і визначає загальний корозійний стан машини. Проте реальна оцінка загальної корозійної ситуації парку сільськогосподарської техніки потребує комплексного врахування всіх чинників, які здатні спричинити корозійні пошкодження впродовж експлуатації і стоянковий період.

Кількісний і якісний склад середовищ визначає показники збережаності металоконструкцій техніки. У літературних джерелах, зокрема у відомих працях вчених [73, 273, 269] запропоновано класифікувати типові для сільськогосподарського виробництва середовища за ступенем їх корозійного впливу на металеві конструкції (табл. 2.2) [273, 269].

I група середовищ - атмосфера помірного клімату виявляє незначну корозійну активність. II і III групи середовищ пов'язані із впливом органічних та мінеральних добрив на корозійну тривкість сталей. В групі II найбільш агресивною є атмосфера свинарника, для якої швидкість корозії сталі Ст 3 може досягати понад $700 \text{ г/м}^2 \cdot \text{рік}$, що в перерахунку на прийняті в Україні розмірності, становить понад $8,0 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2 \cdot \text{год}$. Вищу агресивність гною свиней порівняно із пташиним послідом і гноєм корів підтверджують також автори [120, 280]. Слід відзначити, що дослідниками не запропонована деталізація досліджень умов контакту заданого корозійного середовища з сталями (тривалість експозиції, стан середовища, температура), що є суттєвим для встановлення рівня реальної корозійної небезпеки. В III групу об'єднано середовища мінеральних добрив з класифікацією за корозійною активністю. Проте в даному випадку важливе значення мають умови проведення експериментальних досліджень (вологість добрив, час експозиції, ін.), що може вплинути на перестановку членів даної групи (табл. 2.2).

В цілому, всі фактори впливу поділяються на зовнішні і внутрішні [73, 269]. В стоянковий період важливими є умови зберігання сільськогосподарських машин: закриті, або відкриті приміщення, майданчики під дашком чи без, перепади температур, конденсація вологи, сонячна радіація, опади. В робочий період контакт з агресивним середовищем є безпосереднім і повним. Зокрема, це стосується сільськогосподарських машин, які транспортують і розкидають органічні та мінеральні добрива. Корозійна активність органічних і мінеральних добрив зберігається в постробочий період, оскільки на металоконструкціях сільськогосподарських машин і агрегатів є залишки, які при наявності вологи продовжують активно впливати на корозійний стан обладнання. Більшість авторів [246, 269, 273, 279, 297] найбільш важливу роль у спричиненні корозійних пошкоджень відводять вологості.

Групи агресивності характерних сільськогосподарських середовищ в залежності від впливу на корозійну стійкість сталі Ст 3

Групи	Тип сільськогосподарських середовищ	Корозійні втрати	
		Швидкість корозії, K_m , г/м ² ·рік	Глибинний показник, L , мм/рік
I	Атмосферна зона помірного клімату	100...217	13...28
II	Атмосфера тваринницьких приміщень:		
	керівник	440...640	56...82
	свинарник	558...721	71...92
	пташник	500...600	64...76
III	Середовища мінеральних добрив:		
	суперфосфат	350...380	35...40
	амоніачна селітра	380...400	38...50
	нітрофоска	850...900	100...120
	сульфат амонію	910...1100	125...145

Севернев М.М. [269] встановив, що для кожного виду міндобрив у залежності від вмісту вологи існує максимум швидкості корозії. Положення максимуму залежить від капілярної вологоємності добрив, їх повітряної проникливості. Однак, при цьому, у даній роботі не вказано тривалості часу випробувань та температурних діапазонів досліджень. Показники капілярної вологоємності і повітряної проникливості мають непостійний характер з причин зміни в залежності від компактності (степені злежаності) добрива, погоди, присутності домішок, ін. [246, 273, 297].

Найбільш відомі дослідження корозійної активності добрив виконано, виходячи з припущення, що процеси, які відбуваються на межі розділу добриво-метал, відповідають механізмам атмосферної корозії і завдячують

каталітичному впливу води [246, 273, 269, 297]. Особливості атмосферної корозії полягають у присутності на поверхні металу тонкої плівки електроліту, що зумовлює специфіку корозії даного виду, хоч випробування кристалічних мінеральних добрив при різних вологостях не передбачають обов'язкового утворення суцільної плівки електроліту на поверхні металу. Крім того, тверді добрива на поверхнях металоконструкцій розкидачів мають різну товщину, щільність, протяжність контакту, що робить показник капілярності різним на різних ділянках поверхні.

З припущеннями рівноцінності кристалічного стану різних мінеральних добрив, їх однакової вологості Северневим М.М. сформовано три групи мінеральних добрив, які відрізняються корозійною активністю (табл. 2.3) [269]. За критерій корозійної активності міндобрив даним вченим вибрано швидкість корозії.

Перша група міндобрив найшвидше спричиняє максимальні корозійні пошкодження, друга група виявляє помірну агресивність, третя вважається відносно безпечною. Проте запропонована класифікація є достатньо умовною, так як побудована на величинах швидкостей корозії і глибинах локальних пошкоджень, отриманих при різних часових проміжках випробувань, температур та вологості. Високу агресивність I групи міндобрив Севернев М.М. пов'язує із утворенням в присутності вологи відповідних кислот [279]. Однак при цьому він не відкидає можливості інших механізмів атмосферної корозії сталі в мінеральних добривах.

Таблиця 2.3

Групи корозійної активності мінеральних добрив

Групи корозійної активності добрив		
I	II	III
Мідний купорос	Амоніачна селітра	Сечовина (карбамід)
Сульфат амонію	Суперфосфат	Борат магнію
Нітрофоска	Сильвініт	Борнодатоліт

Дослідження корозійної тривкості в міндобривах сталей різних марок, у т.ч. і низьколегованих, високолегованих, [269] дають підстави зробити наступні висновки:

а) сталі з меншим вмістом вуглецю більш корозійно тривкі у порівнянні з сталями з більшим вмістом вуглецю;

б) корозійна тривкість низьколегованої сталі 40Х нижча, ніж сталі 45;

в) глибина пітінгів в неіржавіючій сталі 1Х13 в нітрофосці вища, ніж на сталі 1Х18Н9Т (1,2 мм/рік проти 0,8 мм/рік).

Вищі швидкості корозії сталей з більшим вмістом вуглецю пояснюються зростанням гетерогенності поверхні та утворенням гальванічних пар. Однак для випадку середовищ близьких до нейтральних, де швидкість корозії лімітується дифузійними обмеженнями, ця різниця може перебувати в межах похибки вимірювань.

Дослідженням корозійних процесів в органічних добривах присвячена значно менша кількість робіт [101, 173]. Найбільш корозійно-активними є торф'янисті компости, найменш агресивними – низовинні та верхові торфи і гній на основі екскрементів корів. Тут, як і у випадку міндобрив, вода діє як типовий каталізатор корозійних процесів. Корозія в сінажі і органічних добривах визначається, за Северневим М.М., присутністю органічних кислот і кисню у повітрі. Щодо вмісту вологи, то за його даними максимальна швидкість корозії в органічних добривах спостерігається при вологості 65...80%, тоді як в мінеральних – при 10...30%.

Сукупність наукових досліджень і результати аналізу технічного стану сільськогосподарських машин, зокрема розкидачів добрив, з точки зору значення корозійних пошкоджень для зниження довговічності і роботоздатності робить очевидною необхідність регулярного застосування протикорозійних заходів.

Методи захисту сільськогосподарських машин від корозії. Система протикорозійного захисту сільськогосподарської техніки на пострадянському просторі сформувалась під впливом робіт Меламеда М.Н., Севернева М.М.,

Пучина Є.А., ін. [140, 222, 279]. На цій основі сформульовано загальні принципи забезпечення надійного протикорозійного захисту, які повинні підвищити ресурс сільськогосподарської техніки. Основи протикорозійного захисту техніки для внесення добрив доцільно закладати на етапі проектування, причому ефективність повинна забезпечуватись своєчасним належним виконанням протикорозійних робіт і підтримуванням їхньої якості в процесі експлуатації техніки. Комплекс заходів для забезпечення протикорозійного захисту діючого машинного парку передбачає, перш за все, якісне очищення машин від залишків ґрунту, мінеральних і органічних добрив, інших забруднень. У поєднанні із конденсованою водою і природними опадами, особливо при зберіганні неочищеної техніки на площадках без накриттів, дані залишки стають джерелом інтенсивних корозійних пошкоджень. Незадовільний стан протикорозійного захисту техніки в Україні пояснюється об'єктивними причинами: недостатньою матеріально-технічною базою багатьох сільськогосподарських підприємств; відсутністю, або високою ціною ефективних захисних матеріалів; відсутністю технічних засобів для механізації процесів консервації.

Зменшення кількості нафтопереробних та хімічних підприємств в Україні створило дефіцит захисних матеріалів, що у поєднанні із обмеженістю сировинної бази і зумовило таку ситуацію. Надійний протикорозійний захист сільськогосподарських машин базово може забезпечуватись наступними заходами [140, 222]:

1. раціональним проектуванням (вибір матеріалів і геометрії металоконструкцій, усунення зазорів, щілин, попередження можливого формування гальванічних пар);

2. зміною властивостей навколишнього середовища (осушування повітря, зниження вмісту кисню і агресивних компонентів, інгібування);

3. зміною властивостей конструкційного матеріалу (термообробка, поверхнева обробка, ін.);

4. застосуванням засобів, які змінюють характер взаємодії на межі розділу фаз метал-середовище: захисні покриття (лакофарбові, оксидні, металеві, фосфатні, оливні), катодний захист.

Автори [12, 73, 269] вважають прийнятними для використання в протикорозійному захисті с/г техніки наступні технології: інгібування, зниження вмісту агресивних компонентів, інші заходи. Для ефективного застосування засобів захисту першочергове значення має швидке виявлення початкових стадій корозії, вибір адекватних раціональних способів і своєчасне виконання протикорозійних заходів. Починати консерваційні і захисні заходи необхідно якщо осередки корозії становлять більше 1% площі металоконструкції. Найбільш доступними, достатньо ефективними і простими у виконанні є технології з використанням лакофарбових матеріалів, мастик, інгібіторів та консерваційних матеріалів (нафтопродукти, плівкові покриття у т.ч. з маслорозчинними інгібіторами) [63].

Адекватне і вчасне проведення консерваційних та протикорозійних заходів забезпечує надійне збереження МТП, при цьому необхідно враховувати тривалість зберігання (міжсезонне, короткочасне, довготривале). В результаті якісного протикорозійного захисту може бути досягнуто значного економічного ефекту зумовленого:

- зниженням кількості і вартості поточних та капітальних ремонтів, збільшення міжремонтних термінів служби;
- зниженням часу простоїв в період ремонтів;
- підвищенням якості виконання технологічних процесів;
- збільшенням термінів служби.

З аналізу відомих літературних джерел, корозія сільськогосподарських машин є явищем складним, багатогранним і мало прогнозованим. Не дивлячись на великий масив даних, окремі результати досліджень корозії сільськогосподарських машин в середовищах мінеральних та органічних добрив суперечливі, а їх інтерпретація недостатньо обґрунтована. Врахування всіх чинників впливу на атмосферну

корозію конструкцій, виготовлених з сталей якісних та звичайної якості в присутності мінеральних та органічних добрив часто є практично неможливе. Оскільки корозію вказаних груп сталей в розчинах електролітів можна розглядати як граничний випадок атмосферної корозії, доцільно відтворювати результати масометричних випробувань і їх співставлення з даними електрохімічних досліджень в насичених розчинах мінеральних і органічних добрив. Ці дослідження дозволяють оперувати такими кількісними показниками, як склад та концентрація розчину, площа контакту електроліт-метал, потенціал, також струмові показники корозії.

Необхідність проведення корозійних та електрохімічних досліджень вказаних сталей в насичених розчинах нітрофоски та сульфату амонію обґрунтовується наступним: за даними авторів [269] швидкість корозії, наприклад, сталі 20 в кристалічній нітрофосці (вологість 14-16%) становить $335 \text{ г/м}^2 \text{міс}$ ($4,7 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^2 \text{год.}$), в насиченому розчині даного добрива масометрично визначена швидкість корозії при кімнатній температурі аналогічного порядку – $1,62 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^2 \text{год.}$ В кристалічному сульфаті амонію (вологість 10-12%) - $115 \text{ г/м}^2 \text{міс}$, тобто $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^2 \text{год.}$, в насиченому його розчині – $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^2 \text{год.}$ Таким чином величини швидкостей корозії сталі 20 в атмосферних умовах і в насичених розчинах цих міндобрив є співмірними. Аналогічних досліджень для випадків найбільш поширених органічних добрив – змішаної гноївки ВРХ і свиней, а також гноївки ВРХ не проводилося. Отже, необхідно дослідити особливості процесів корозії якісних сталей Сталь 10, Сталь 15, Сталь 20, Сталь 25 та сталей звичайної якості Ст 3, Ст 5 в насичених розчинах сульфату амонію, нітрофоски, гноївки великої рогатої худоби та гноївки змішаної (ВРХ і свиней). Для досягнення мети поставлено наступні задачі:

- дослідити вплив часу експозиції на швидкість корозії сталей якісних та звичайної якості в кристалічних сульфаті амонію і нітрофосці і їх насичених розчинах;

- оцінити характер корозійних пошкоджень поверхонь сталей в залежності від виду добрива;
- на основі електрохімічних досліджень встановити механізм корозії сталей якісних та звичайної якості в насичених розчинах міндобрив;
- виявити закономірності корозійної та електрохімічної поведінки досліджуваних сталей в середовищі гною великої рогатої худоби і гноївки змішаної (свиняча + ВРХ).

2.4. Матеріали та методики досліджень електрохімічної і корозійної поведінки машинобудівних сталей у середовищах добрив

Досліджувані матеріали. Корозійні випробування проводилися для вуглецевих сталей двох груп: якісних (Сталь 10, Сталь 15, Сталь 20, Сталь 25) і звичайної якості (Ст 3, Ст 5) у стані постачання. Зразки виготовлювались у вигляді дисків діаметром 20 мм, товщиною 0,16 мм з отвором діаметром 2 мм для закріплення на скляному тримачі. Поверхня зразків з метою забезпечення шорсткості $R_a = 0,63$ мкм шліфується. Підготовка зразків полягала в очищенні поверхні ацетоном, висушуванні і витримуванні в ексикаторі протягом 2 год. Підготовані зразки зважувалися на аналітичній вазі з точністю $\pm 0,0004$ г та зберігалися в ексикаторі не більше 24 год [295]. Хімічний склад і фізико – механічні характеристики окремих досліджуваних машинобудівних сталей на основі загальновідомих літературних джерел приведено в табл. 2.4 [14, 144, 175]. Робочими корозійно - агресивними середовищами досліджувались дистильована вода (як модель водного конденсату, або дощівки), органічні добрива (рідкий гній великої рогатої худоби та гноївка змішана свиняча 1/2 і ВРХ 1/2). Основний склад середовищ встановлено проведенням хімічного лабораторного аналізу реальних зрізків добрив і приведено в табл.2.5.

Таблиця 2.4

Характеристики окремих досліджуваних сталей

Матеріал	Хімічний склад, %									Термічна обробка	Границя тек. σ_T , МПа	Границя міцн. σ_B , МПа
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al			
Ст 3	0,14 – 0,22	0,05 – 0,15	0,40 – 0,65	$\leq 0,055$	$\leq 0,045$	–	–	–	–	гартування 900 – 920°C відпуск 200 – 500°C	240	380 – 470
Сталь 20	0,17 – 0,24	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	$\leq 0,040$	$\leq 0,040$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	–	нормаліз. 900 – 920°C відпуск 600 – 650°C	250	420

Таблиця 2.5

Вміст основних біогенних речовин в органічних добривах

Елементи Середовище	% мас								
	H ₂ O	N загальн.	N білков.	N аміачн.	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃
Рідка гноївка ВРХ	86,7	0,38	-	-	0,12	0,22	0,25	-	-
Гноївка змішана (свиной і ВРХ)	75,0	0,50	0,31	0,15	0,25	0,60	0,35	0,15	0,10

Насичені розчини мінеральних добрив містять: сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ має 20,5% Нітрогену та 24% Сульфору з незначними домішками H_2SO_4 , Ca^{2+} , Mg^{2+} та SiO_2 ; нітрофоска – суміш $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та KNO_3 , що містить по 35...52% Нітрогену, P_2O_5 та K_2O [101, 173, 280]. Перед початком випробувань гноївка ВРХ та гноївка змішана для усунення диспергованих компонентів фільтрувались через паперовий фільтр. Рівень рН досліджуваних розчинів вимірювали рН - метром типу И – 160М перед початком корозійних експериментальних досліджень та після їх закінчення. Швидкість корозії K_m ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$) визначалась масометричним методом після експозиції протягом 1, 7, 12 та 24 діб в розчинах сульфату амонію, нітрофоски і, для порівняння, у дистильованій воді та після усунення продуктів корозії [304].

Розрахунок проводився за формулою [295, 304]

$$K_m = \Delta m / S \cdot \tau, \quad (2.5)$$

де Δm – зміна ваги зразка після експозиції в корозивному середовищі та усунення продуктів корозії, г; S – площа зразка, см^2 ; τ – час експозиції, год.

Отримані величини перераховувались на глибинний показник Π (мм/рік) згідно [295, 304]

$$\Pi = \frac{K_m \cdot k}{\gamma} \cdot 10^{-1}, \quad (2.6)$$

де k – коефіцієнт перерахунку год/рік;

γ - густина металу (для заліза $7,86 \text{ г}/\text{см}^3$).

Вплив мінеральних добрив в кристалічному стані на корозійну стійкість досліджуваних сталей визначався шляхом розміщення зразків вертикально в сухих міндобривах з контролем появи корозійних пошкоджень через 1, 7, 12 і 24 доби. Швидкість корозії в сухих мінеральних добривах розраховувалась за формулами (2.5) та (2.6). Характер корозійних пошкоджень поверхні зразків оцінювався скануючим електронним мікроскопом EVO-40XUP (Zeiss) з

системою рентгеноспектрального мікроаналізу INCA Energy 350, яка використовувалася для локального хімічного аналізу поверхні [128].

Методики електрохімічних досліджень. Поляризаційні дослідження проводились потенціостатом IP-Pro з програмним забезпеченням за трьохелектродною схемою: зразок – робочий електрод, допоміжний електрод – платиновий, електрод порівняння – насичений хлорсрібний (рис. 2.2) [305].

Робочим електродом застосовано зразки з досліджуваних сталей площею робочої поверхні $0,0628 \text{ см}^2$, запресованих у фторопласт. Перед кожним вимірюванням зразок зачищався шліфувальним папером №0, очищався ацетоном і висушувався. Після занурення зразка у досліджуваний розчин реєструвався потенціал упродовж не менше 1/2 години, приймаючи за стаціонарний потенціал $E_{ст}$ потенціал в кінці витримки. Струми корозії, константи Тафеля катодної і анодної реакцій визначались з прямолінійних ділянок поляризаційних кривих.



Рис. 2.2. Комплекс для проведення електрохімічних досліджень: потенціостат, трьохелектродна комірка, комп'ютер з програмою керування і обробки залежностей «потенціал – час», «струм – потенціал».

Перерахунок струмових показників швидкості корозії на масові виконувався за формулою [295, 304]

$$K = ikA/nF, \quad (2.7)$$

де i – струм корозії, $A/\text{см}^2$; k – коефіцієнт ($k = 1$, при часі випробувань у секундах, площі – в см^2); A – атомна маса металу (для заліза і сталі $A = 56$); n – валентність металу (для заліза 2, або 3); F – стала Фарадея [29].

2.5. Особливості корозійної і електрохімічної поведінки сталей в мінеральних та органічних добривах

Загальний вигляд розкидача мінеральних добрив, а також окремих робочих вузлів машини приведено на рис. 2.3. Зруйновані в процесі експлуатації лакофарбові покриття відкрили незахищений метал. Встановлено корозійні пошкодження нерівномірного характеру: максимальні в місцях зварних швів і біляшовних зон, болтових з'єднань, а також на поверхнях листових металів.



Рис. 2.3. Загальний вигляд стану лакофарбових покриттів (а) і корозійні пошкодження (б) розкидача мінеральних добрив після сезону експлуатації

Окремі деталі розкидачів органічних добрив повністю вкриті шаром іржі, під якою чітко простежуються пітінги та виразки (рис. 2.4). Очевидно, пошкодження є потенційними осередками зародження і розвитку тріщин.



Рис. 2.4. Загальний вигляд витка шнека (а) і корозійні пошкодження (б) на його поверхні після 5 років експлуатації.

У зв'язку з цим, фіксація появи перших корозійних пошкоджень, їхнього росту та моніторинг швидкості корозії під впливом мінеральних і органічних добрив є першим необхідним етапом дослідження і прогнозування ресурсу розкидачів добрив.

Вплив мінеральних добрив на корозійну стійкість та електрохімічні характеристики сталей якісних і звичайної якості. Вплив сипучих (кристалічних) мінеральних добрив на корозійну тривкість досліджувався, поміщаючи зразки в мінеральні добрива у сухому стані з контролем проміжку часу до появи корозійних пошкоджень через 1, 7, 12 та 24 доби. Перші корозійні пошкодження – поодинокі пітінги на зразках з досліджуваних машинобудівних сталей поміщених у кристалічний $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, з'явилися через 24 год. і за наступні 4 доби злились у виразки. В кристалічній нітрофосці поодинокі пітінги з'явилися на 7 добу, рис. 2.5. Через 24 доби швидкість корозії, наприклад, сталі 20 в сульфаті амонію стабілізувалась на рівні 0,006 мм/рік., а в нітрофосці – на рівні 0,0012 мм/рік.

Насичені розчини сульфату амонію і нітрофоски є слабокислими середовищами з відповідними водневими показниками $\text{pH}=4,35$ та $\text{pH}=4,6$, що вказує на можливість реалізації корозії за іншим механізмом, ніж у дистильованій воді ($\text{pH}=6,3 \dots 6,6$).

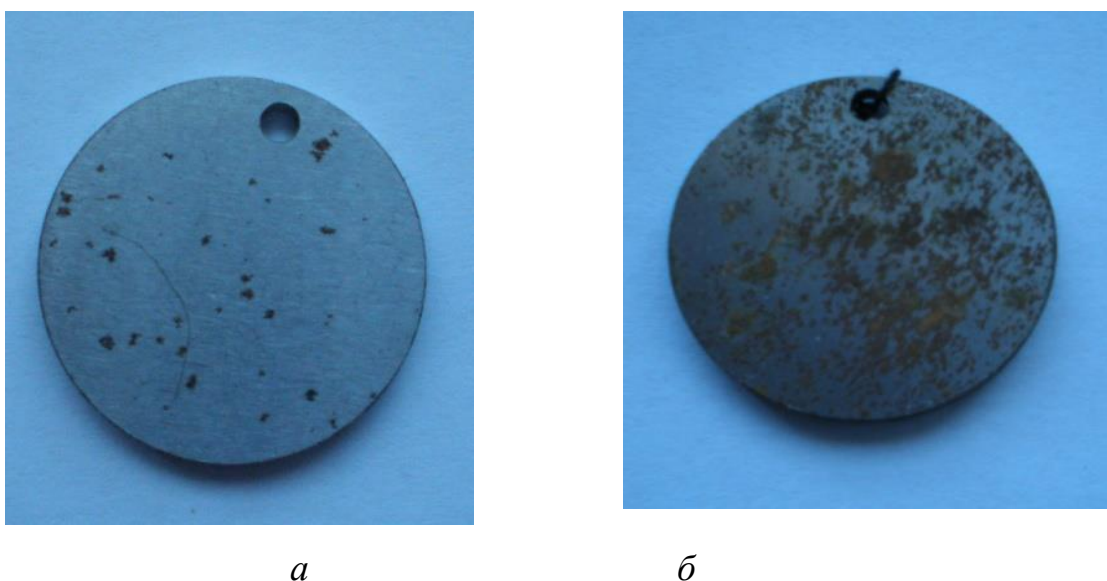


Рис. 2.5. Загальний вигляд зразків з сталі 20 після експозиції 24 доби в кристалічних: а) нітрофоска; б) сульфат амонію

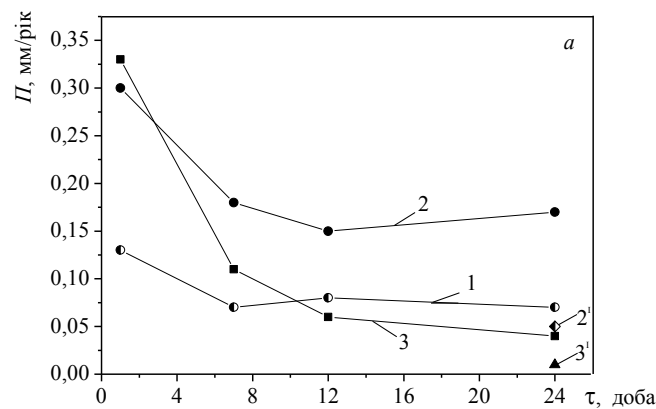
Встановлено, значення швидкостей корозії досліджуваних конструкційних сталей у насичених розчинах сульфату амонію та нітрофоски впродовж першої доби в 2–2,5 рази вищі, ніж величини швидкостей корозії даних сталей у дистильованій воді, табл. 2.6. З іншої сторони, часова залежність швидкості корозії є характерною для нейтральних середовищ: з збільшенням часу експозиції з 1 до 24 діб швидкість корозії поступово зменшується (табл. 2.6, рис. 2.6). Доведено, у агресивному середовищі насиченого розчину сульфату амонію для вказаного часового діапазону швидкості корозії досліджуваних сталей звичайної якості та якісних залишаються в 2–3 рази вищими, ніж у середовищі дистильованої води. У середовищі розчину нітрофоски після 12 діб експозиції, значення швидкості корозії зменшуються у порівнянні з відповідними швидкостями у фоні.

Таблиця 2.6

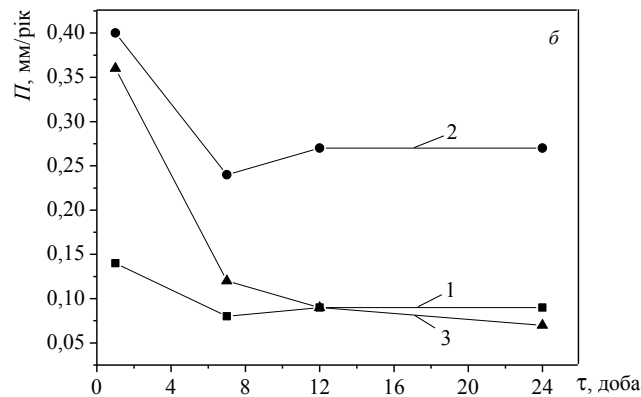
Швидкість корозії (K_m) сталей якісних і звичайної якості у дистильованій воді і насичених розчинах сульфату амонію та нітрофоски

Середовище, сталь		Швидкість корозії, $K_m \cdot 10^5$, г/(см ² ·год)			
		1	7	12	24
Вода дистильована, H ₂ O _{дист}	Сталь 10	1,23	0,69	0,74	0,68
	Сталь 15	1,21	0,68	0,72	0,67
	Сталь 20	1,17	0,67	0,70	0,64
	Сталь 25	1,12	0,64	0,67	0,62
	Ст 3	1,25	0,70	0,81	0,79
	Ст 5	1,07	0,65	0,75	0,73
Сульфат амонію, (NH ₄) ₂ SO ₄	Сталь 10	2,82	1,67	1,45	1,61
	Сталь 15	2,79	1,65	1,43	1,59
	Сталь 20	2,66	1,58	1,37	1,52
	Сталь 25	2,55	1,52	1,31	1,46
	Ст 3	3,67	2,23	2,46	2,43
	Ст 5	3,41	2,07	2,29	2,25
Нітрофоска	Сталь 10	3,09	1,02	0,60	0,43
	Сталь 15	3,06	1,00	0,59	0,41
	Сталь 20	2,92	0,96	0,57	0,40
	Сталь 25	2,80	0,92	0,55	0,38
	Ст 3	3,21	1,05	0,84	0,62
	Ст 5	2,99	0,98	0,78	0,58

Протягом першої доби максимальні величини швидкостей корозії досліджуваних груп сталей спостерігались в насиченому розчині нітрофоски, проте, починаючи з 12-ї доби швидкості стають нижчими, ніж у сульфаті амонію. Встановлено, вказані значення швидкостей досліджуваних процесів у 29–36 разів вищі, ніж відповідні швидкості в кристалічних мінеральних добривах сульфату амонію та нітрофоски, що є результатом каталітичного впливу води [26, 208, 269].



а)

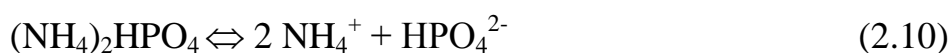
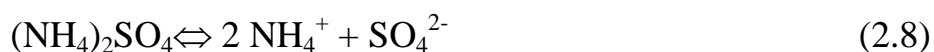


б)

Рис. 2.6. Залежність глибинного показника корозії P сталі 20 (а) та Ст 3 (б) від часу експозиції в розчинах: 1 – вода дистильована; 2 – насичений розчин сульфату амонію; 2' – сульфат амонію (кристалічний); 3 – насичений розчин нітрофоски; 3' – нітрофоска (кристалічна).

Нижчі значення швидкостей корозії в розчині нітрофоски у порівнянні з сульфатом амонію і водою при тривалішому часі експозиції (від 12 діб), з високою ступінню імовірності, пов'язані з пасивуючою дією аніонів NO_3^- та утворенням іонами HPO_4^{2-} фосфатного шару на поверхні сталі.

Вода як полярний розчинник сприяє дисоціації сульфату амонію (2.8) та нітрофоски (2.9 - 2.11). Продукти дисоціації спільно з водою є корозійно активнішими, ніж відповідні кристалічні солі.



Електронне зображення поверхні сталі 20 після експозиції 24 діб у дистильованій воді, сульфаті амонію і нітрофосці та очищення від продуктів корозії (рис. 2.7) показує типові відмінності в характері корозійних пошкоджень. Сульфат амонію (рис. 2.7б) спричиняє точкові пошкодження глибші і більшої площі, ніж дистильована вода (рис. 2.7а). Поелементним аналізом встановлено, що на дні пітінгів присутні Сульфур, сліди Кальцію та Оксигену, тоді як у пітінгах, сформованих у дистильованій воді, переважає Кальцій та Оксиген. Поверхня зразків після експозиції в розчині нітрофоски вкрита окремими поодинокими пітінгами (рис. 2.7в), на дні яких виявлено К, Са, Na, O, та N.

Площа та глибина пітінгів на поверхні сталі 20 після експозиції в нітрофосці є меншою, ніж після експозиції в сульфаті амонію. Отже,

встановлені результати експериментальних досліджень розходяться з твердженням автора [9, 269, 270] про найбільшу корозійну агресивність нітрофоски. Визначена розбіжність може бути спричинена різним часом випробувань, що, як показали вище, впливає на величину швидкості корозії, а також складом нітрофоски, яка у залежності від технології виробництва може містити іони Cl^- .

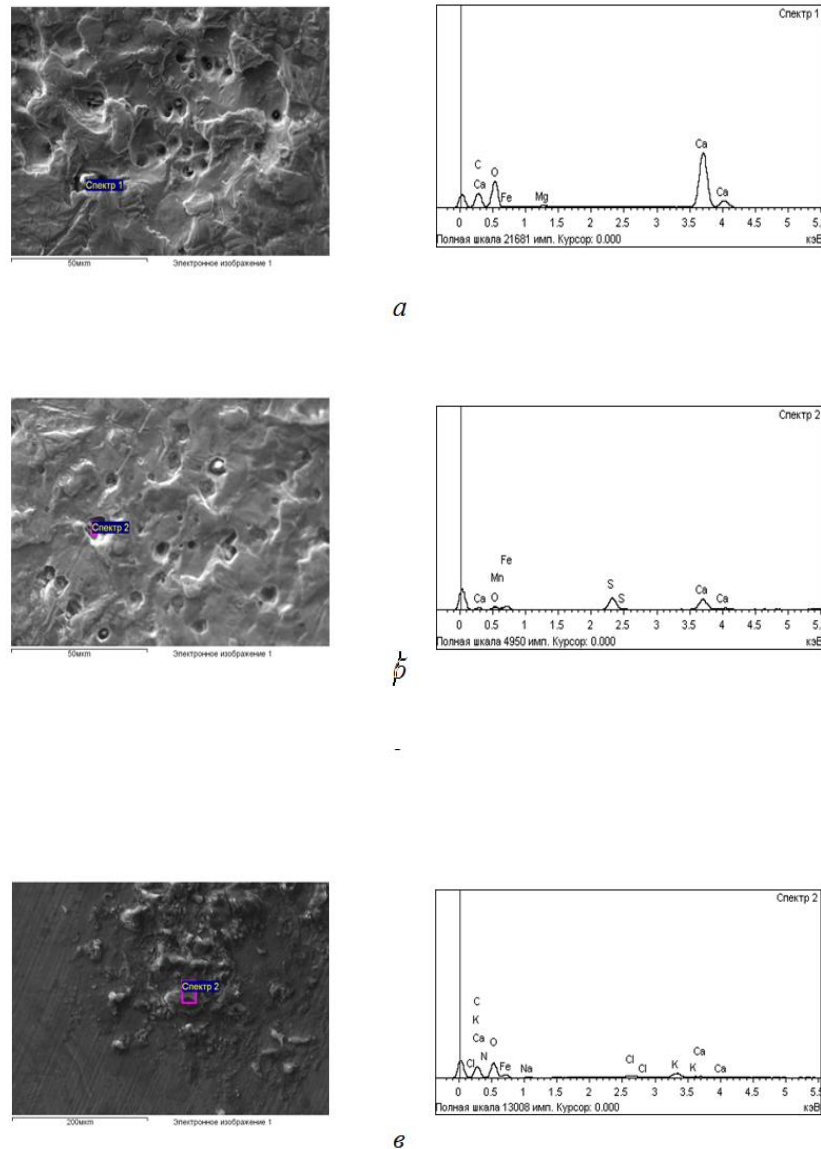


Рис. 2.7. Електронно-мікроскопічні зображення поверхні сталі 20 і відповідні спектри поелементного складу після усунення продуктів корозії при експозиції: дистильована вода (а); сульфат амонію (б); нітрофоска (в).

Корозія в насичених розчинах сульфату амонію і нітрофоски відбувається за електрохімічним механізмом. Стаціонарні потенціали сталей, які встановились впродовж 20...25 хв., найвід'ємніші в розчині сульфату амонію (табл. 2.7, рис. 2.8). Порівняно із дистильованою водою дані величини від'ємніші більш ніж на 300 мВ, що вказує на нижчу термодинамічну стабільність, наприклад, сталі 20 та Ст 3, в розчині вказаного мінерального добрива [26, 208].

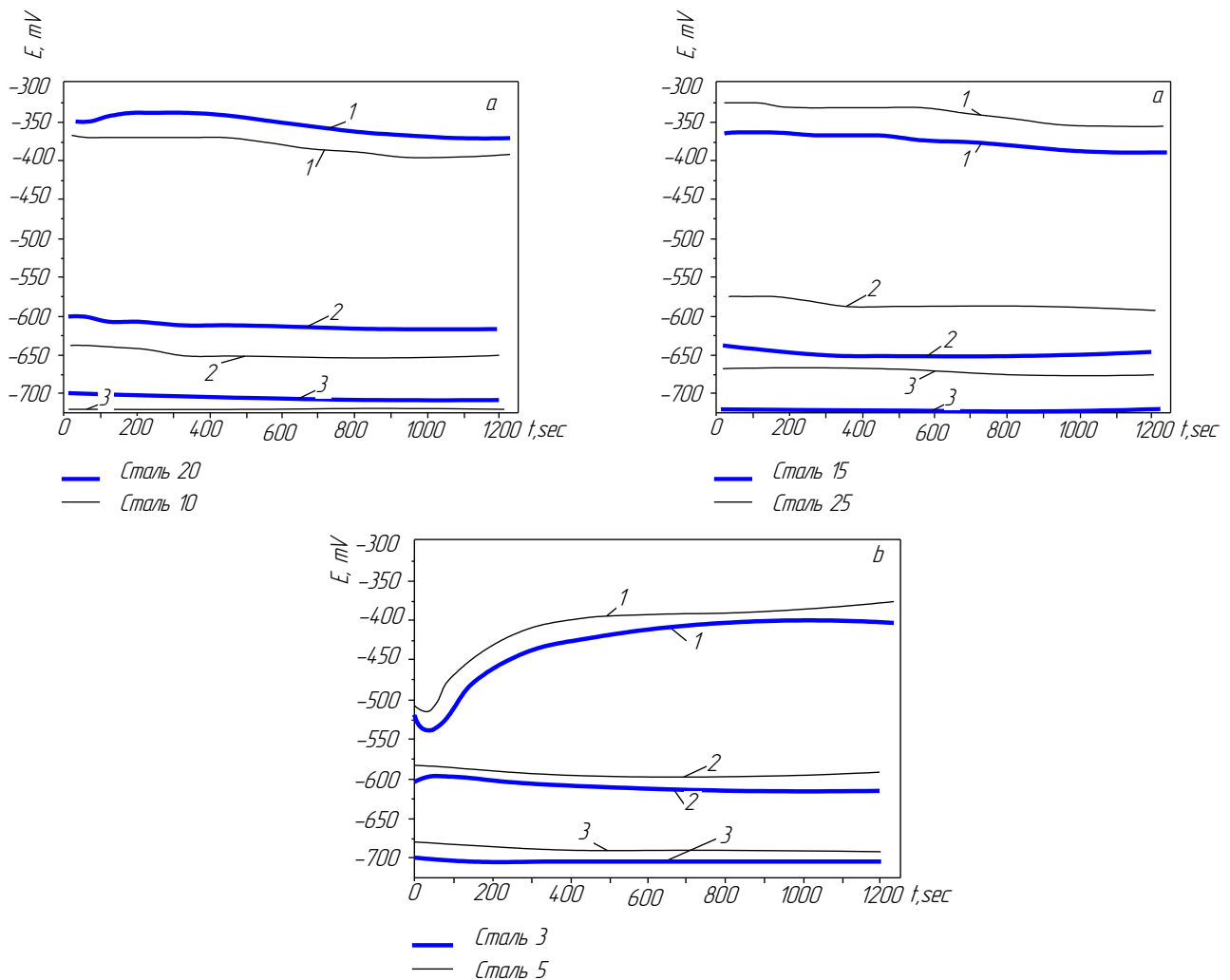


Рис. 2.8. Кінетика встановлення стаціонарного потенціалу:
1 – дистильована вода; 2 – нітрофоска; 3 – сульфат амонію.

Досліджуючи явища поляризації, поляризаційні криві, наприклад, сталі 20 та Ст 3 лежать в області потенціалів $-(600...700)$ мВ, рис. 2.9;

табл. 2.7. Катодні криві даних сталей у дистильованій воді та насичених розчинах сульфату амонію і нітрофоски відрізняються: в сульфаті амонію на катодній кривій сталі 20 в області потенціалів $-(800...980)$ мВ ділянка граничного дифузійного струму виражена менш чітко, ніж на Ст 3 і на обох сталях у середовищах дистильованої води і нітрофоски. Граничний дифузійний струм у розчині нітрофоски на сталі 20 становить 1 A/cm^2 , а на Ст 3 – $1,5 \text{ A/cm}^2$, в розчині сульфату амонію відповідно $0,5 \text{ A/cm}^2$ та $1,5 \text{ A/cm}^2$.

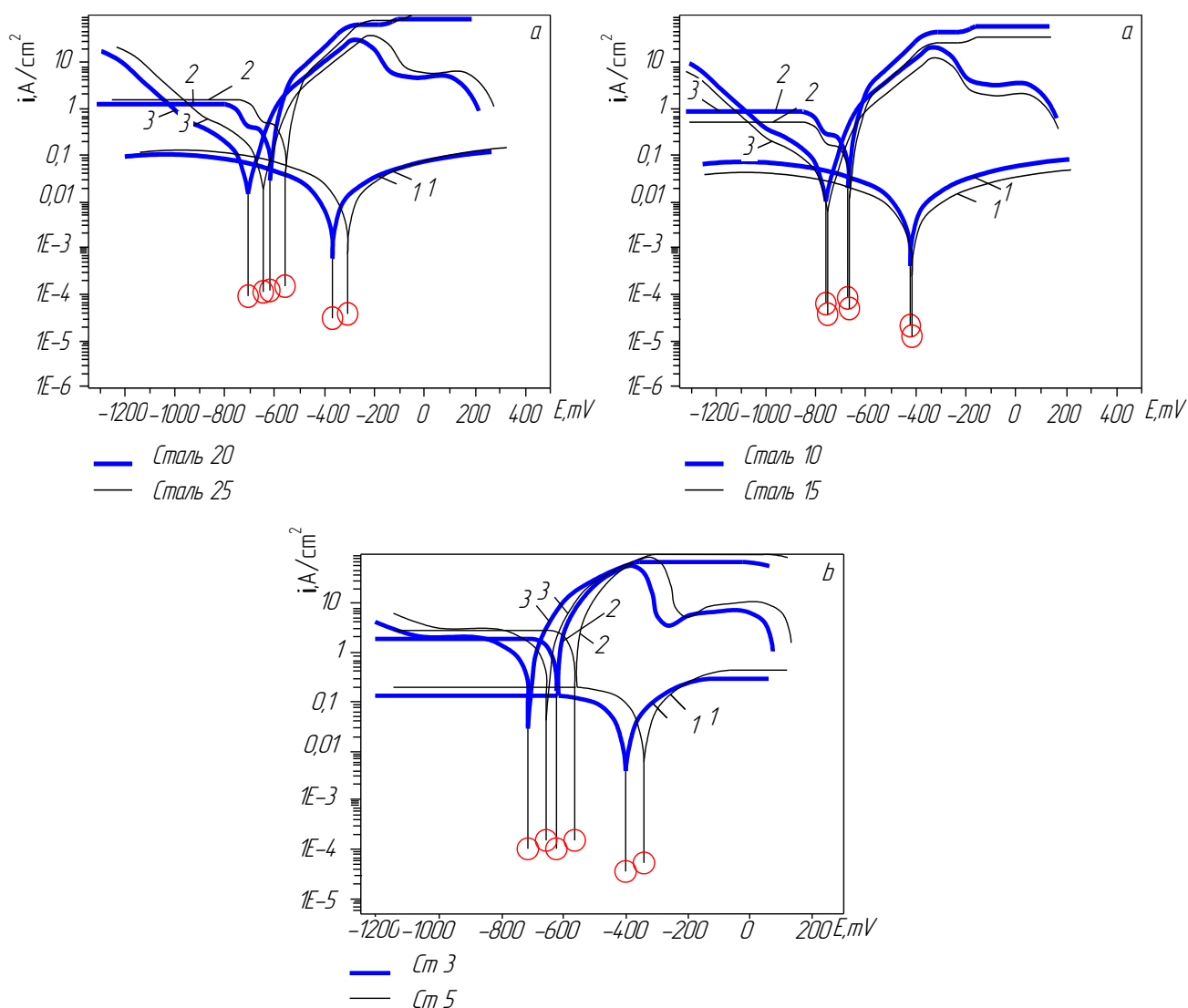


Рис. 2.9. Поляризаційні криві сталей:

1- дистильована вода; 2 – нітрофоска; 3 – сульфат амонію.

Анодні поляризаційні криві для сталей у розчинах нітрофоски і сульфату амонію помітно відрізняються від анодних кривих у дистильованій воді та між собою. В розчині $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ потенціал початку гальмування анодного процесу Ст 3 осадженими продуктами корозії становить -390 мВ, а сталі 20 дорівнює -300 мВ, потенціал стабільного гальмування анодного розчинення, відповідно, -280 мВ і -150 мВ. Гранична густина струму гальмування анодного розчинення Ст 3 та сталі 20 при цьому досягає $6,0$ А/см².

Таблиця 2.7

Електрохімічні характеристики сталей в насичених
розчинах сульфату амонію і нітрофоски

Середовище Матеріал	Вода дистильована, H ₂ O _{дист}				Сульфат амонію, (NH) ₄ SO ₄				Нітрофоска			
	$-E_{st}$, мВ	$i_{cor} \cdot 10^5$, А/см ²	b_c , мВ	b_a , мВ	$-E_{st}$, мВ	$i_{cor} \cdot 10^5$, А/см ²	b_c , мВ	b_a , мВ	$-E_{st}$, мВ	$i_{cor} \cdot 10^5$, А/см ²	b_c , мВ	b_a , мВ
Сталь 10	394	3,2	23,5	21	747	9,7	11,3	14,4	653	10,7	18,1	9,4
Сталь 15	391	3,1	23,7	21,2	748	9,6	11,4	14,5	652	10,6	18,3	9,5
Сталь 20	372	3,0	25	22,3	705	9,2	12	15,3	616	10,1	19,3	10,0
Сталь 25	357	2,8	26,1	23,2	677	8,8	12,6	16,2	591	9,7	20,2	10,1
Ст 3	401	4,1	21,3	18,3	711	14,3	12,1	14,5	618	13,1	20,5	9,0
Ст 5	385	3,9	20,2	17,6	682	13,7	11,5	13,4	593	12,6	19,7	8,6

У розчині нітрофоски потенціал початку гальмування анодного процесу Ст 3 становить -370 мВ, а сталі 20 -150 мВ. Таким чином, в обох міндобривах анодне розчинення сталі 20 порівняно із Ст 3 починає гальмуватися за менш від'ємного потенціалу. Струмові показники швидкостей Ст 3 вищі, ніж сталі 20. Струми корозії найвищі в розчині нітрофоски, що узгоджується із гравіметричними даними, отриманими за 1 добу експозиції. Оскільки струми корозії визначаються після стабілізації стаціонарного потенціалу протягом 20...30 хв, то вони повинні найкраще корелювати із швидкостями корозії,

отриманими ваговим методом при нетривалому часі експозиції (1 доба). Струми корозії, перераховані на масометричні показники за формулою (2.7) задовільно узгоджуються із величинами швидкостей корозії, отриманими ваговим методом при умові, що залізо Fe^0 окислюється до Fe^{3+} (табл. 2.8) [26, 208]. Константи Тафеля анодних реакцій сталей 20 і Ст 3 у дистильованій воді та розчинах сульфату амонію і нітрофоски відрізняються незначно. Найвищі значення b_a – у дистильованій воді, найнижчі – в нітрофосці. Тобто початковий анодний процес найбільше затруднений у дистильованій воді, а найменше – у нітрофосці. Перенапруження анодного процесу у досліджених середовищах більший на якісних, ніж на звичайної якості, що є причиною меншої корозійної стійкості останніх.

Таблиця 2.8

Співставлення швидкостей корозії сталей, отриманих гравіметрично (K_m , (г/см²·год)), електрохімічно ($i_{кор}$, А/см²) та перерахованих з струмових показників (K_i , г/(см²·сек))

Середовище Сталь	Вода дистильована, H ₂ O _{дист.}			Сульфат амонію, (NH) ₄ SO ₄			Нітрофоска		
	$K_m \cdot 10^9$	$i_{кор} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$	$K_m \cdot 10^9$	$i_{кор} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$	$K_m \cdot 10^9$	$i_{кор} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$
Сталь 10	3,43	3,18	6,1	7,7	9,8	18,1	8,6	10,7	20,2
Сталь 15	3,41	3,15	6,0	7,6	10,3	17,9	8,5	10,6	20,0
Сталь 20	3,25	3,0	5,8	7,3	9,2	17,1	8,1	10,1	19,1
Сталь 25	3,12	2,88	5,6	7,0	8,8	16,4	7,8	9,7	18,3
Ст 3	3,5	4,1	7,8	10,2	14,3	27,0	8,9	13,1	25,1
Ст 5	3,40	3,9	7,41	9,7	13,6	25,6	8,4	12,4	23,8

Таким чином, мінеральні добрива сульфату амонію та нітрофоски у присутності води виявляють високу корозійну активність для розглянутих машинобудівних сталей.

Вплив органічних добрив на корозійну стійкість та електрохімічні характеристики сталей якісних і звичайної якості. Загальний вигляд елементів розкидача добрив РТД-9 після двох років експлуатації приведено на

рис. 2.10. Металеві деталі зазнали часткових корозійних пошкоджень, також залишки органічної сировини, завислі на шнеках, створюючи зони диференційної аерації та виділяючи продукти гниття, є потенційними додатковими прискорювачами корозійних процесів. Як відзначено в літературному огляді, вивченню впливу органічних добрив на корозійну стійкість якісних сталей і сталей звичайної якості присвячено невелику кількість робіт. Розглядаючи корозію сталі в органічних добривах, як корозію атмосферну, зроблено висновок, що максимальна швидкість корозії в органічних добривах спостерігається при вологості 65...80% [193, 208]. Однак вказані дані потребують деталізації та уточнень. У зв'язку з цим проведено дослідження корозійної тривкості сталей звичайної якості Ст3, Ст5 і якісних сталей Сталь 10, Сталь 15, Сталь 20, Сталь 25 в середовищі двох видів органічних добрив: рідкому гної великої рогатої худоби та гноївці змішаній (1/2 свиняча +1/2 ВРХ).



Рис. 2.10. Загальний вигляд розкидача добрив РТД-9 після двох років експлуатації: а) кузов; б) сегментний шнек.

Хімічний аналіз складу безпідстилкового гною великої рогатої худоби та гноївки змішаної виявив присутність зєднань, які містять азот (табл. 2.5). Вказані сполуки часто мають властивості інгібіторів корозії. Корозійні випробування досліджуваних матеріалів при різному часі експозиції

у фільтрованих гноївках ВРХ та змішаній показали (рис. 2.11, табл. 2.9): швидкість корозії обох груп сталей впродовж першої доби в 3...4 рази нижча, ніж у дистильованій воді і у 8...10 нижча, ніж у середовищах міндобрив сульфату амонію та нітрофоски [26, 187, 193, 208].

Сталі звичайної якості, зокрема Ст 3, кородують швидше, ніж сталі якісні, сталь 20. Збільшення часу експозиції призводить до суттєвого зменшення швидкості корозії, через 24 доби швидкості корозії сталі 20 та Ст 3 в двох досліджуваних середовищах зрівнюються. Можна зробити висновок, що протягом першої доби рідкий та змішаний гної порівняно із дистильованою водою виявляють інгібувальний ефект на рівні 65-75 %. Через 24 доби ступінь захисту досягає вже 96 %. Різниця між корозійною активністю гноївок обох видів практично відсутня. Поодинокі локальні корозійні пошкодження, які спостерігались на поверхнях досліджуваних зразків з даних груп сталей після експозиції в нефільтрованих гноївках є результатом утворення гальванічних пар внаслідок налипання на поверхню диспергованих твердих залишків соломи, насіння, тощо. На поверхнях зразків після випробувань протягом 1 доби виявлено поодинокі зміни у вигляді кольорів мінливості, що відповідає товщині оксидної плівки порядку 460...680 нм.

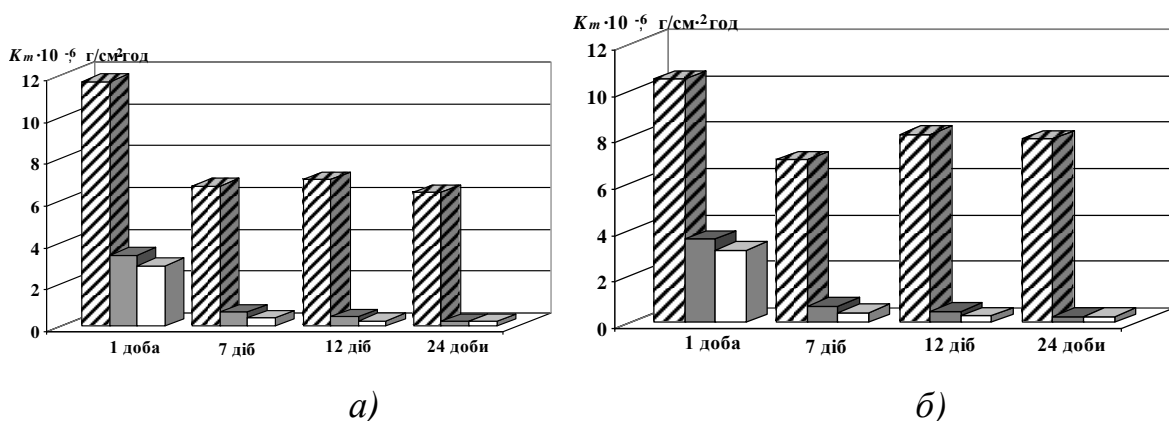


Рис.2.11. Залежність швидкості корозії сталі 20 (а) і сталі Ст 3 (б) від часу експозиції в середовищах:

▨ – H_2O ; ■ – гноївка ВРХ; □ – гноївка змішана.

Після подальших випробувань (7...24 доби) поверхня зразків залишається чистою, блискучою, без видимих змін (рис. 2.12).



Рис.2.12. Загальний вигляд зразка сталі 20 після 24 діб експозиції в гноївці великої рогатої худоби

Таблиця 2.9

Глибинний показник швидкості корозії сталей звичайної якості і якісних в органічних добривах

Сталь	Час Середовище	Швидкість корозії П, мм/рік			
		1 доба	7 діб	12 діб	24 доби
Сталь 10	H ₂ O	0,139	0,080	0,084	0,078
	Гноївка ВРХ	0,040	0,007	0,006	0,004
	Гноївка змішана	0,036	0,004	0,003	0,004
Сталь 15	H ₂ O	0,141	0,079	0,081	0,075
	Гноївка ВРХ	0,042	0,008	0,005	0,003
	Гноївка змішана	0,034	0,005	0,003	0,003
Сталь 20	H ₂ O	0,13	0,075	0,077	0,071
	Гноївка ВРХ	0,038	0,007	0,005	0,003
	Гноївка змішана	0,032	0,004	0,003	0,003
Сталь 25	H ₂ O	0,125	0,072	0,074	0,068
	Гноївка ВРХ	0,036	0,007	0,005	0,003
	Гноївка змішана	0,031	0,004	0,003	0,003
Ст 3	H ₂ O	0,117	0,078	0,09	0,088
	Гноївка ВРХ	0,040	0,008	0,005	0,003
	Гноївка змішана	0,035	0,005	0,003	0,003
Ст 5	H ₂ O	0,111	0,072	0,083	0,082
	Гноївка ВРХ	0,038	0,007	0,004	0,003
	Гноївка змішана	0,033	0,004	0,003	0,003

До початку проведення корозійних випробувань водневий показник гноївки ВРХ і гноївки змішаної рН = 7,45...7,50. Після експозиції сталей в цих середовищах протягом 24 діб рН зріс до значення 8,0...8,2, що є результатом мікробіологічних перетворень внаслідок старіння гною. Потенціали корозії

сталі 20 та Ст 3 в середовищах гноївок обох видів встановлюються протягом 15-20 хв. і в порівнянні із дистильованою водою зсунуті в бік від'ємних значень (рис. 2.13). Характер поляризаційних кривих на зразках обох груп сталей подібний (рис. 2.14). Катодні криві, наприклад, сталі 20 різняться між собою областю і величиною граничних дифузійних струмів: у рідкому гної в діапазоні потенціалів $-630...-920$ мВ граничний дифузійний струм становить $7 \cdot 10^{-2}$ А/см², а в гноївці змішаній в діапазоні $-510...-810$ мВ, $3 \cdot 10^{-2}$ А/см².

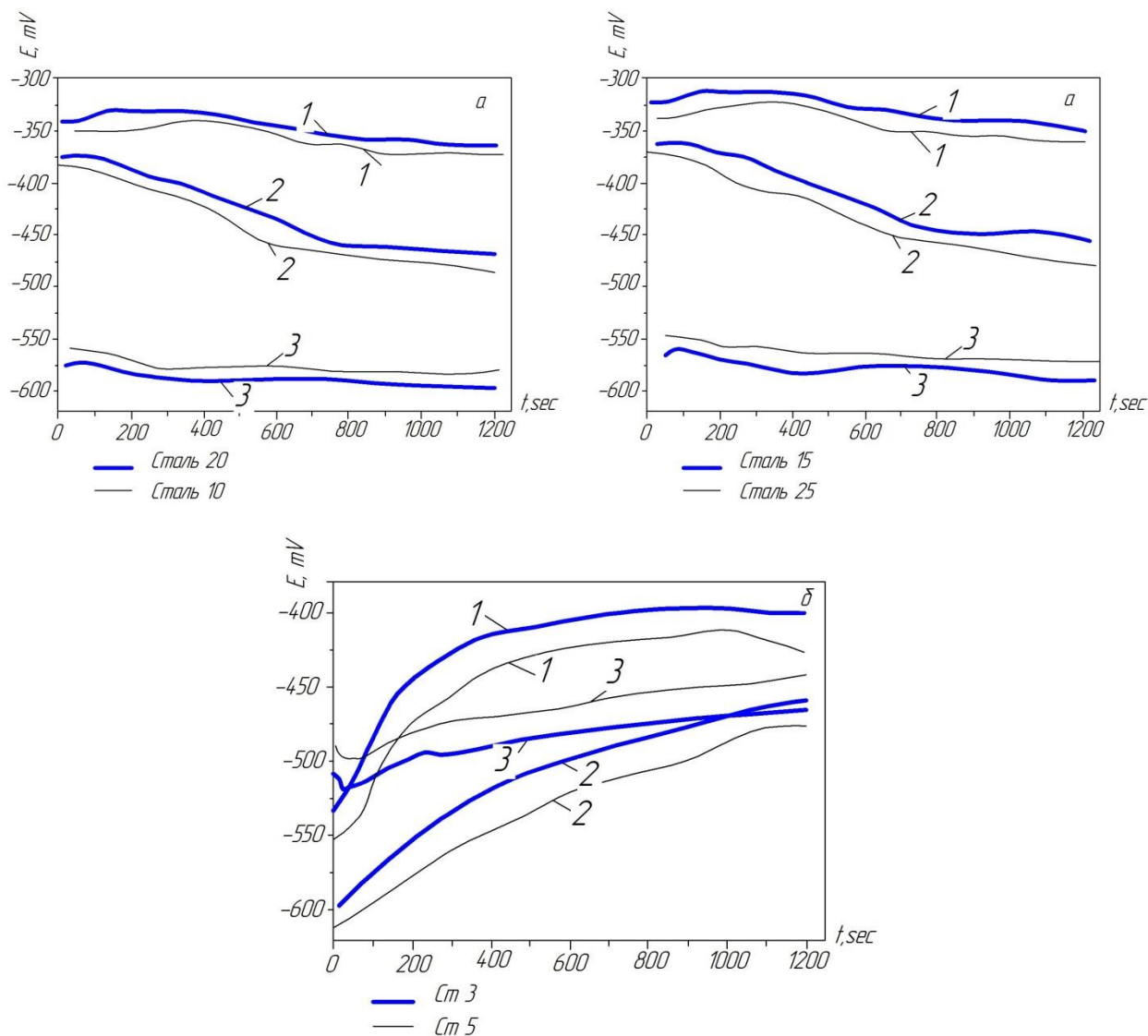


Рис. 2.13. Кінетика встановлення стаціонарного потенціалу:

1 – дистильована вода; 2 – гноївка ВРХ; 3 – гноївка змішана.

Катодні криві Ст 3 в органічних добривах відрізняються тільки діапазоном потенціалів граничного дифузійного струму: $-680\dots-1100$ мВ у гноївці ВРХ та $-580\dots-1100$ мВ – у гноївці змішаній. Граничний дифузійний струм є дещо вищий, ніж на сталі 20 і становить, відповідно, $9\cdot 10^{-2}$ А/см² та $7\cdot 10^{-2}$ А/см².

Анодні криві на обох сталях мають невелику ділянку, яку можна пов'язати із станом пасивності: у рідкому гної $-480\dots-530$ мВ (сталь 20), $-480\dots-540$ мВ (Ст 3) та у змішаному $-250\dots-320$ мВ (сталь 20), $-350\dots-420$ мВ (Ст 3). Чітко простежується область гальмування анодної реакції в обох середовищах при зсуві потенціалу від -250 мВ в бік менш від'ємних потенціалів за високих значень струмів (біля 10 А/см²).

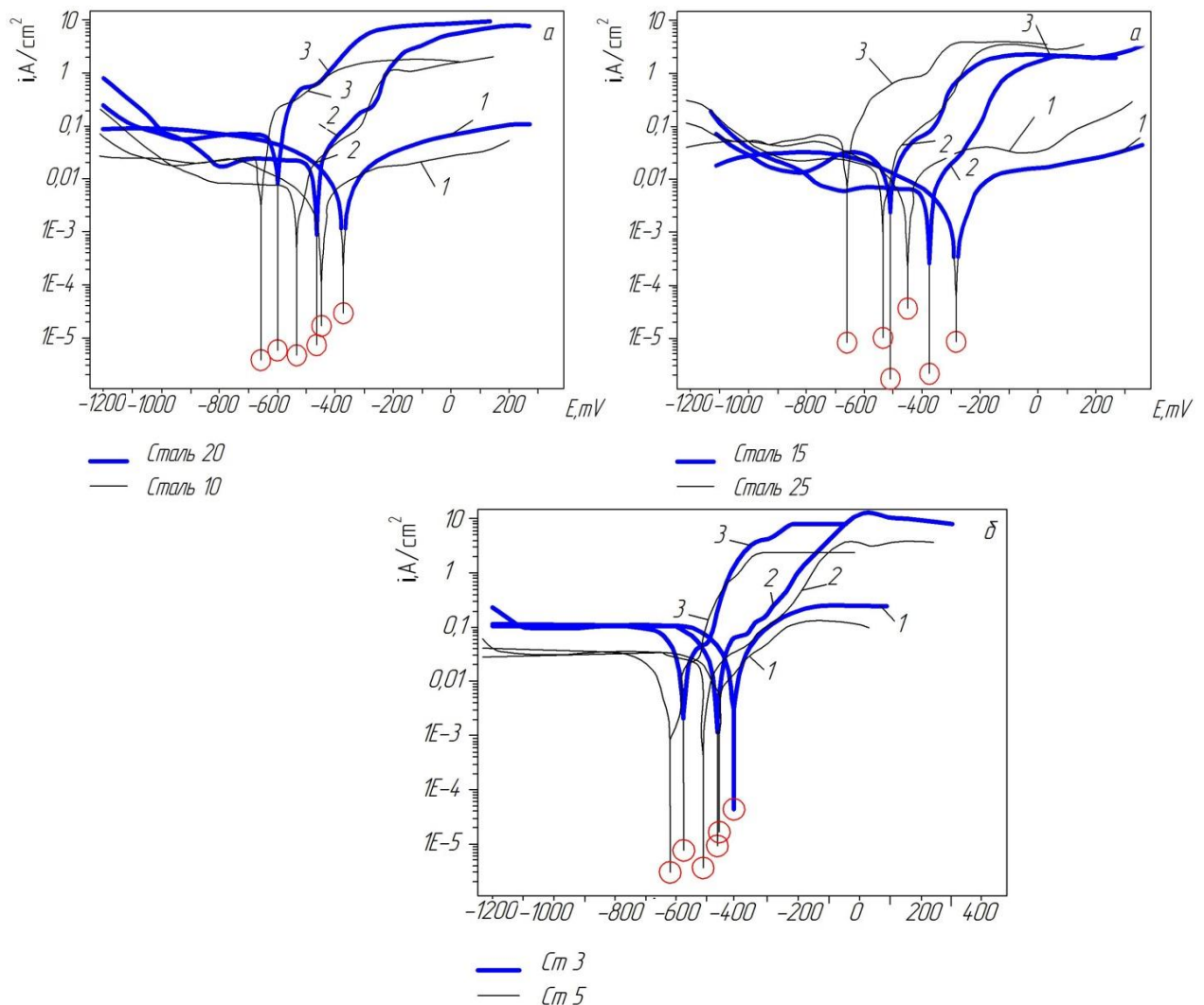


Рис. 2.14. Поляризаційні криві: 1- дистильована вода; 2 – безпідстилковий змішаний гній; 3 – безпідстилковий гній ВРХ.

Струми корозії обох груп сталей у органічних добривах у 4–5 разів нижчі, ніж у дистильованій воді (табл. 2.10).

Таблиця 2.10

Електрохімічні характеристики сталей
в розчинах органічних добрив

Середовище, х-ки Сталь	Рідкий гній				Гній змішаний				Вода дистильована			
	-Ест, мВ	$i_{кор} \cdot 10^5$, А/см ²	бк, мВ	ба, мВ	-Ест, мВ	$i_{кор} \cdot 10^5$, А/см ²	бк, мВ	ба, мВ	-Ест, мВ	$i_{кор} \cdot 10^5$, А/см ²	бк, мВ	ба, мВ
Сталь 10	597	0,8	30,8	28,6	454	0,7	36,1	28,8	392	3,7	22,4	19,8
Сталь 15	604	0,7	31,3	29,2	457	0,7	37,2	30,2	380	3,5	23,1	20,2
Сталь 20	610	0,7	33,3	30,0	460	0,6	38,5	460	372	3,0	25,0	22,3
Сталь 25	617	0,7	34,8	32,1	472	0,5	40,1	33,8	452	0,9	36,2	30
Ст 3	590	0,9	30,2	28,1	450	0,8	35,0	27,9	401	4,1	21,3	18,3
Ст 5	592	1	30,4	28,4	452	0,9	36,2	30	410	4,3	22,0	19,1

Значення струмових показників швидкостей корозії, перераховані за формулою 2.7, задовільно узгоджуються із величинами швидкостей, отриманими масометрично за першу добу при умові, що ступінь окислення заліза становитиме 3⁺ (табл. 2.11). Низька корозійна активність обох видів гною також підтверджується аналізом тафелівських ділянок поляризаційних кривих. Константи Тафеля катодних та анодних реакцій, наприклад, сталі 20 і сталі Ст 3 у вказаних середовищах вищі, ніж відповідні константи у дистильованій воді (табл. 2.11).

Це вказує на більше перенапруження обох електродних реакцій в органічних добривах порівняно з перенапруженням електродних реакцій у воді, наслідком чого і є низькі значення швидкостей електрохімічної корозії.

Таблиця 2.11

Співставлення швидкостей корозії отриманих гравіметрично (K_m , (г/см²·сек)), електрохімічно ($i_{кор}$, А/см²) і перерахованих з струмових показників (K_i , (см²·сек)) в органічних добривах

Середовище Матеріал	Н ₂ О _{дист.}			Рідкий гній			Гній змішаний		
	$K_m \cdot 10^9$	$i_{кор} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$	$K_m \cdot 10^9$	$i_{кор} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$	$K_m \cdot 10^9$	$i_{кор} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$
Сталь 10	3,32	3,70	5,85	0,99	0,70	1,45	0,85	0,70	1,25
Сталь 15	3,30	3,50	5,88	1,01	0,8	1,48	0,87	0,70	1,28
Сталь 20	3,25	3,00	5,80	0,94	0,70	1,40	0,80	0,60	1,20
Сталь 25	3,20	2,80	5,76	0,90	0,80	1,36	0,76	0,50	1,16
Ст 3	3,50	4,10	7,80	1,10	0,90	1,70	0,90	0,80	1,50
Ст 5	3,42	4,30	7,73	1,03	0,90	1,63	0,84	1,00	1,42

Таким чином, гноївка ВРХ та гноївка змішана (1/2 свиняча+1/2 ВРХ), виявляють незначну корозійну агресивність відносно якісних сталей і сталей звичайної якості. Корозія у вказаних середовищах відбувається за електрохімічним механізмом з швидкостями значно нижчими, ніж у дистильованій воді (модель дощівки) при природній аерації.

2.6. Висновки

1. Встановлено, що насичені розчини сульфату амонію та нітрофоски на відміну від їх кристалічних концентратів спричиняють інтенсивні корозійні пошкодження сталей якісних і звичайної якості, швидкості корозії яких досягають 0,29...0,33 мм/рік, що є в 2,2–2,5 рази вищим від швидкостей у середовищі дистильованої води.

2. Доведено, швидкості корозії досліджуваних груп сталей в розчинах міндобрив максимальні протягом першої доби і поступово знижуються з збільшенням часу експозиції, зокрема, в розчині нітрофоски величини швидкостей стають сумірними з швидкістю корозії у дистильованій воді, що

зумовлено формуванням на поверхні сталі захисних шарів пасиваційної природи. Для досліджуваних матеріалів корозія в насичених розчинах нітрофоски та сульфату амонію має локальний характер. Після усунення продуктів корозії, на поверхні зразків виявлено хімічні елементи - компоненти міндобрив.

3. Поляризаційні криві сталей звичайної якості в розчинах міндобрив порівняно із дистильованою водою знаходяться в області від'ємніших потенціалів, потенціал початку гальмування анодного розчинення сталей звичайної якості від'ємніший, ніж якісних сталей. Константи Тафеля b_k обох груп сталей у дистильованій воді, розчинах нітрофоски і сульфату амонію відрізняються несуттєво, що вказує на подібний характер катодної реакції в області стаціонарного потенціалу. Константи Тафеля b_a найнижчі в розчині нітрофоски, що вказує на найменшу поляризованість анодного процесу, струми корозії найвищі, що узгоджується з масометричними показниками швидкостей, отриманими протягом першої доби.

4. Виявлено, процеси корозії досліджуваних матеріалів гноївці ВРХ і гноївці змішаній мають локальний характер, зумовлений формуванням поодиноких гальванічних пар, що є наслідком налипання завислих твердих частинок (соломи, насіння, ін.). Встановлено, після відфільтрування завислих часток органічні добрива виявляють низьку корозійну активність. Швидкості корозії вказаних груп сталей за першу добу експозиції становлять 0,032...0,040мм/рік, що є в 3...4 рази нижчим у порівнянні із модельним розчином дощової води, подальше суттєве зниження швидкості до 0,003 мм/рік спричинене інгібувальними властивостями хімічних складових гною.

5. Доведено, корозія у органічних добривах протікає за електрохімічним механізмом, у порівнянні з дистильованою водою стаціонарні потенціали сталей зміщені в область більш від'ємних значень, струми корозії в 4–5 разів нижчі, а константи Тафеля вищі, що свідчить про утруднення обох електродних реакцій.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩ НА ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ ТА ЦИКЛІЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

3.1. Режими експериментальних досліджень характеристик циклічної тріщиностійкості і втомного руйнування матеріалів несучих металоконструкцій розкидачів добрив в робочих середовищах

Основними факторами втомного та корозійно-втомного руйнування елементів несучих структур сільськогосподарських машин є взаємодія ряду чинників [73, 112, 273], зокрема: вихідного стану робочих поверхонь металоконструкцій; динамічних навантажень; агресивності середовищ, що зумовлена присутністю органічних і мінеральних добрив, а також атмосферними факторами, тощо.

Дослідженнями технічного стану с/г техніки після 1–3 років експлуатації встановлено, корозією уражено до 70...80% складальних одиниць сільськогосподарських машин [72, 73, 112, 275]. Втомне та корозійно-втомне руйнування є результатами впливів навколишнього середовища і термодинамічної лабільності матеріалів несучих структур с/г техніки. Корозійні руйнування тонколистових металоконструкцій, також їхніх зварних з'єднань, змінюючи стан поверхні деталей, інтенсифікують процеси зношування з одночасним зниженням втомної міцності, що спричиняє зародження і розвиток корозійно-втомних тріщин, внаслідок цього значно знижується надійність і довговічність техніки, затрати на ремонт та відновлення машин і агрегатів збільшуються. Проектування несучих зварних металоконструкцій сільськогосподарської техніки повинно виконуватися відповідно до технічного завдання згідно з класифікацією за призначенням і вимогами до експлуатації.

Нормативною документацією [256, 257] встановлено типи зварних несучих систем мобільних сільськогосподарських машин, кожен з яких має свої конструктивні особливості, зокрема металоконструкції III-го класу об'єднують несучі системи машин, які працюють на транспортних режимах в умовах агресивних середовищ при внесенні добрив, меліорантів, пестицидів, ін. Такі тримкі системи просторово навантажені, плоскі, прямокутні, в умовах низької якості доріг та бездоріжжя металоконструкції повинні володіти податливістю, однак для руху на відносно великих для с/г техніки швидкостях мають бути достатньо жорсткими у зв'язку з зростанням ймовірності прискореного накопичення пошкоджень. Відповідно з даною класифікацією, при проектуванні рамних конструкцій приймаються конструктивні рішення, вибираються матеріали і прокатні профілі, зварні з'єднання та вузли [257]. Довговічність машин для внесення добрив регламентується корозійним зношуванням, максимально інтенсивно процеси корозії протікають в кузовах, на транспортерах, ділянках безпосередньо контактуючих з агресивними середовищами. Наприклад, при дослідженнях характеру і величини корозійних пошкоджень розкидачів типу РМГ-4 встановлено, що кількість відмов порівняно з загальною кількістю несправностей має наступний розподіл: рама і кузов 32%, транспортер 24%, робочі органи 44%. У середовищах добрив відбуваються процеси корозійного руйнування, що призводить до необхідності капітального ремонту розкидача вже після трьох років експлуатації, причому після капремонту строк служби не перевищував двох років [73, 227]. У зернозбиральних комбайнах ресурсні відмови: граничні деформації корпусів жатки, похилої камери і молотарки, тріщини, руйнування зварних з'єднань і складальних одиниць систем та агрегатів, викликані сумісним впливом механічних навантажень та агресивних робочих середовищ.

Для комбайнів і тракторів, які надійшли в капітальний ремонт до 3 років експлуатації, корозією уражено складальних одиниць комбайна більше двохсот найменувань, деталей тракторів більше ста найменувань. Сумарна площа корозійних пошкоджень поверхні кожної деталі і складальної одиниці від 15 до

90% площі поверхні [73]. Для досліджень проблематики надійності, за даними випробувального центру DLG (Німеччина), одним з шести основних напрямів проведення випробувань є дослідження ресурсу с/г техніки згідно вимогам ENTAM – Європейського об'єднання організацій з випробувань сільськогосподарської техніки [27]. Згідно досліджень машин для внесення добрив, 70...80% деталей машин виходять з ладу внаслідок сумісної дії атмосферної корозії і умов навантаженості, з них 20...25% це поломки від перевантаження, зумовленого втратою міцності внаслідок корозійних пошкоджень. Найбільш небезпечними з позицій агресивності є добрива та ядохімікати [293].

З огляду на це, актуальними є дослідження процесів втомних та корозійно-втомних руйнувань типових матеріалів металоконструкцій машин для внесення добрив у середовищах корозійно-активних мінеральних та органічних добрив з формуванням рекомендацій вибору раціональних матеріалів, також розробкою нових технологій захисту від агресивних середовищ мінеральних і органічних добрив [150]. Комплексну оцінку корозійної довговічності розкидачів органічних і мінеральних добрив доцільно проводити з урахуванням застосовуваних матеріалів металоконструкцій машин вказаного класу, характерних середовищ, параметрів процесів динамічної навантаженості на обґрунтованих характерних режимах роботи.

Для проведення коректних досліджень корозійно-втомної довговічності матеріалів, необхідною є класифікація типових параметрів навантаженості металоконструкцій транспортних машин і техніки, яка працює на транспортних режимах в умовах агресивних середовищ при внесеннях добрив.

Обґрунтування вибору параметрів досліджень втомної міцності та визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів металоконструкцій базується на інформації про реальну експлуатаційну навантаженість несучих систем машин для внесення добрив. Спектри реальної навантаженості є випадковими процесами, для визначення якісних і кількісних характеристик традиційно проводиться схематизація, причому різні методи схематизації

призводять до значних похибок при розрахунковій оцінці довговічності. Аналізом функцій розподілу амплітуд напружень металоконструкцій сільськогосподарських причепів, вантажних автомобілів, також машин для внесення добрив при русі по польових дорогах [140, 150, 161, 205, 236, 318] встановлено: амплітуда максимальних напружень, вище 100 МПа, знаходиться у межах 103–190 МПа, амплітуда мінімальних напружень в межах 30–39 МПа; максимальні нормальні напруження несучих металоконструкцій рам знаходяться в межах 105–141 МПа при середньому квадратичному відхиленні 49 МПа; коефіцієнти нерегулярності широкополосних процесів навантаженості знаходяться в межах 0,5–0,9, коефіцієнти варіації 0,7–0,98; приведений фіксований коефіцієнт асиметрії циклу $R = (0,17–0,35)$.

Праці В.П. Когаєва, Л.М. Школьника, багатьох інших науковців підтверджують, при частотах менше 1 Гц і при частотах більше 100 Гц межа витривалості залежить від частоти навантаження, в діапазоні 1...100 Гц межа витривалості суттєво не змінюється. Обґрунтування параметрів досліджень матеріалів несучих систем машин на втомну міцність і тріщиностійкість потребує даних про фактичний частотний діапазон напружень. Частотний спектр динамічної навантаженості поділяється на гармоніки у діапазонах частот: $\omega = 0...1$ Гц; $\omega = 1...3,5$ Гц; $\omega = 3,5...7$ Гц; $\omega = 7...10$ Гц. У табл. 3.1 представлено характерні значення розподілу дисперсій процесів за діапазонами частот з максимумами спектральної густини. Встановлено, у діапазоні $\omega = 1...3,5$ Гц знаходиться 80% енергії випадкових процесів [205, 236, 279, 318].

Таблиця 3.1

Розподіл дисперсій процесів за діапазонами частот

№ з/п	Дисперсія процесу, МПа	Розподіл дисперсій, МПа за діапазонами частот процесів, Гц			
		0...1	1...3,5	3,5...7	7...10
1	225	39,8 (17,7%)	164,1 (72,9%)	13,9 (6,2%)	7,2 (3,2%)
2	210	6,8 (3,2%)	167,7 (79,9%)	33,4 (15,9%)	2,1 (1%)

Метою експериментальних досліджень є встановлення впливу робочих

середовищ розкидачів добрив на втомне руйнування і циклічну тріщиностійкість сталей елементів сільськогосподарських машин даного типу. Отже, необхідно обґрунтувати вибір методик експериментальних досліджень, встановити вплив робочих середовищ на втомне руйнування сталей елементів мобільних сільськогосподарських машин, визначити вплив робочих середовищ на процеси циклічної тріщиностійкості сталей елементів несучих системи причіпних розкидачів добрив.

Методологічною основою експериментальних випробувань є одночасне врахування механічних і електрохімічних чинників, що визначають руйнування досліджуваних сталей металоконструкцій сільськогосподарських машин при дії експлуатаційних робочих середовищ. Для визначення міцності, пластичності, твердості і характеристик втоми застосовано стандартизовані експериментальні методи статичних механічних і втомних випробувань матеріалів; для встановлення особливостей та характеру руйнування матеріалів несучих систем в агресивних робочих середовищах застосовано підходи металографічного аналізу і електронно-мікроскопічної фрактографії; методами механіки руйнування визначались кінетичні діаграми росту тріщиноподібних корозійних пошкоджень залежно від умов випробувань досліджуваних сталей.

3.2. Матеріали і умови проведення випробувань

Об'єктом досліджень є втомні і корозійно-втомні руйнування, також тріщиностійкість типових матеріалів металоконструкцій машин для внесення добрив у середовищах корозійно-активних мінеральних і органічних добрив, що реалізуються шляхом утворення і подальшого розвитку дефектів при дії робочих агресивно - експлуатаційних факторів.

Випробовувались конструкційні вуглецеві сталі, зокрема найбільш поширені групи сталей, які застосовуються при виготовленні деталей, вузлів та

агрегатів у сільськогосподарському машинобудуванні: сталі звичайної якості на прикладі Ст 3, та якісні вуглецеві сталі на прикладі сталі 20. Відповідно ДСТУ, хімічний склад наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Хімічний склад досліджуваних сталей

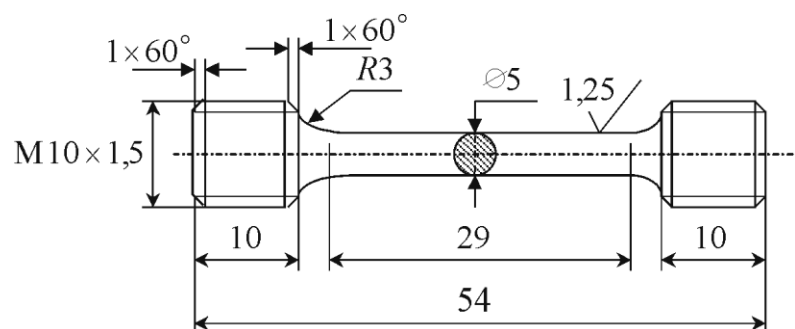
Ст 3							
C	Si	Mn	S	P			
0,14...0,22	0,05...0,15	0,40...0,65	не > 0,055	не > 0,045			
Сталь 20							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,17...0,24	0,17...0,37	0,35...0,65	≤ 0,040	≤ 0,040	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25

Механічні характеристики сталей визначались за стандартизованою процедурою випробувань циліндричних зразків (рис. 3.1) на розтяг [144, 306]. Їх значення приведено в табл. 3.3.

Для усунення слідів шліфування, які можуть виконувати функції концентраторів напружень, перед випробуваннями зразки для досягнення заданої шорсткості поверхні полірувались з використанням шліфувального паперу і алмазних паст різної дисперсності. Після полірування зразки витримувались впродовж 1 год. при температурі 100°C для нівелювання наслідків шляхом знімання поверхневого наклепу, який має місце.



(a)



(б)

Рис. 3.1. Загальний вигляд а) і розміри б) зразків для визначення стандартних механічних характеристик досліджуваних сталей

Зразки випробовувались на розривній машині УМЕ-10Т при

швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Таблиця 3.3

Механічні властивості досліджуваних сталей

Сталь	Термообробка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %
Ст 3	Гартування: 900...920°C; Відпуск 200...500°C	400	240	25	–
Сталь 20	Нормалізація 900...920°C; Відпуск 600...650°C	430	280	34	67

При довірчій вірогідності 0,95 і мінімальній кількості випробувань п'ять, відносна похибка визначення механічних характеристик не перевищувала 5 %.

Робочими корозійними середовищами встановлено модель конденсату, чи дощівки - дистильовану воду; насичені розчини мінеральних добрив сульфату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ і нітрофоски, суміші $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та KNO_3 ; безпідстилковий змішаний гній великої рогатої худоби 1/2 з свинячим 1/2 (табл. 3.4). Показник рН розчинів вимірювався рН - метром И-160М до початку та після закінчення експериментів. Вміст основних біогенних речовин в органічних добривах визначений хімічним лабораторним аналізом.

Таблиця 3.4

Вміст основних біогенних речовин в органічних добривах

Елементи Середовище	% мас								
	H ₂ O	N загальн.	N білков.	N аміачн.	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃
Гній змішаний	75,0	0,50	0,31	0,15	0,25	0,60	0,35	0,15	0,10

Для усунення твердих компонентів змішаної гноївки, безпосередньо перед початком проведення випробувань вказане органічне добриво фільтрувалося за допомогою фільтру з паперу. Таким чином при експериментальних дослідженнях сталей, які застосовуються для виготовлення деталей, вузлів та агрегатів у сільськогосподарському машинобудуванні, розглянуто найбільш характерні випадки системи „матеріал - середовище”: корозійно-активна система і корозійно - пасивна система.

Методологічною основою визначення впливу робочих середовищ на втомне руйнування та циклічну тріщиностійкість є одночасне врахування фізико-механічних та фізико-хімічних процесів, що спричиняють корозійну та корозійно-механічну пошкоджуваність і тріщиноутворення у вуглецевих конструкційних сталях. Такий підхід довів свою ефективність та фізичну обґрунтованість при визначенні стандартних характеристик втомної та корозійно-втомної пошкоджуваності конструкційних сплавів [97, 214, 304].

3.3. Методика втомних і корозійно - втомних досліджень матеріалів несучих структур машин для внесення добрив

Дослідження опору конструкційних вуглецевих сталей втомі і корозійній втомі у встановлених робочих середовищах органічних та мінеральних добрив проводили на круглих зразках з діаметром робочої частини 10 мм. (рис. 3.2), форма яких відповідає вимогам ГОСТ 23026-78 [212, 213, 214].

Для корозійно-втомних досліджень, зразки (рис. 3.2б) запресовувались у фторопластові втулки 2 з виділенням робочої частини водостійким покриттям згідно ТУ 6-15-1129-78.

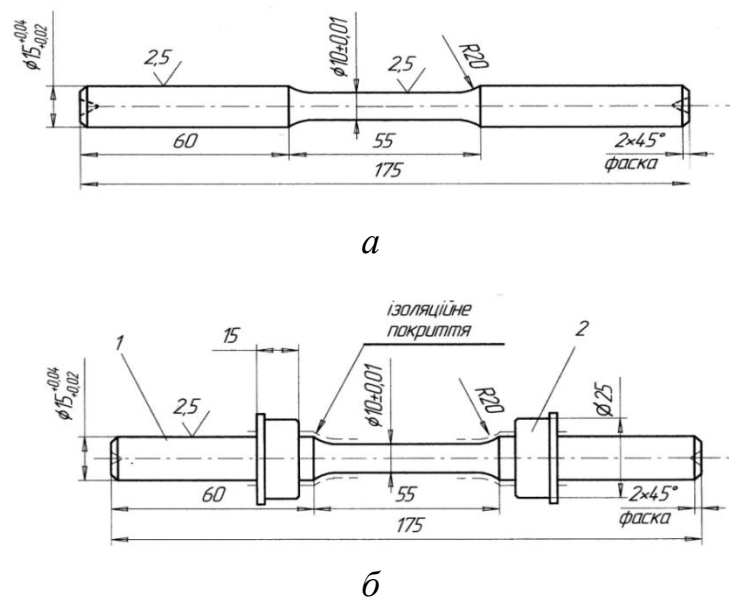


Рис. 3.2. Зразки для втомних (а) і корозійно-втомних досліджень (б):

1 – зразок; 2 – фторопластова втулка.

Після токарної обробки припуск на шліфування становив 0,35 мм. Шліфування проводились електрокорундовими кругами марки ЭБ25СМІК за наступним режимом: швидкість обертання зразка 3 м/хв, лінійна швидкість круга 30 м/сек., глибина шліфування на останньому проході 0,005 мм/об. Шорсткість поверхні $R_z = 2,5$ мкм. Для усунення слідів механічного шліфування і забезпечення високої збіжності отриманих результатів, робоча частина всіх випробовуваних зразків перед експериментальними дослідженнями полірувалась.

Технологія виготовлення зразків у межах виготовленої партії для втомних та корозійно-втомних випробувань була однотипною. Розміри робочої частини зразків вимірювались з точністю до 0,01 мм. Маркування здійснювалось на обох захватах зразків (рис. 3.3).

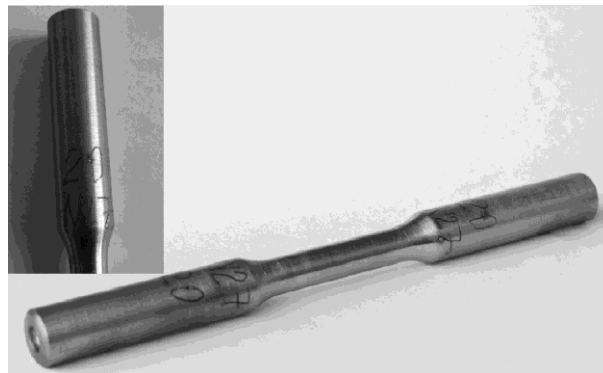


Рис. 3.3. Загальний вигляд і маркування зразка для втомних випробувань

Випробування проводилися на спеціальних установках для визначення опору втомі на повітрі [181, 212, 213, 214], додатково обладнаних пристосуваннями для забезпечення можливості підведення-відведення корозійного середовища і керування його взаємодією з деформованим металом [181, 212, 213, 214].

Випробувальна машина (рис. 3.4-3.7) складається з барабанів 1, шпинделя для кріплення зразка 2, який встановлюється у камері 3 з каналом підведення корозійного середовища 5 (розчини змінюються що 24 години протягом кожного дослідження) та системою відведення 6. Згинальний момент передається на зразок через пристрій важеля 4. Випробувальна машина

приводиться в рух за допомогою двигуна 7, керування параметрами здійснюється за допомогою пульта 8 з швидкісним імпульсним лічильником.

Згинальний момент на зразок, який обертається, передається системою важелів до яких шляхом підбору вантажів прикладається зусилля F . Рівень напружень розраховувався згідно формули [108]

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{32Fl}{\pi d^3}, \quad (3.1)$$

де M – згинальний момент, постійний за довжиною робочої частини зразка; W – момент опору; F – навантаження, прикладене до зразка; l – відстань від точки прикладання навантаження до найближчої опори; d – діаметр зразка.

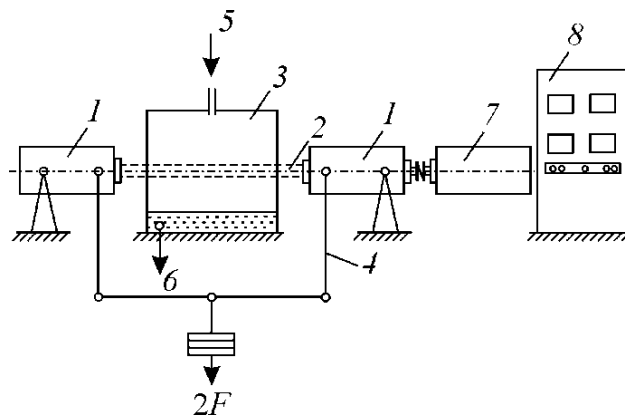


Рис. 3.4. Схема дослідної установки для випробувань зразків в умовах корозійної втоми: 1 – барабани; 2 – зразок; 3 – випробувальна камера з системою підведення корозійного середовища; 4 – важелі формування навантаження зразків; 5 – канал подачі корозійного середовища; 6 – система відведення корозивного середовища; 7 – двигун; 8 – пульт керування.

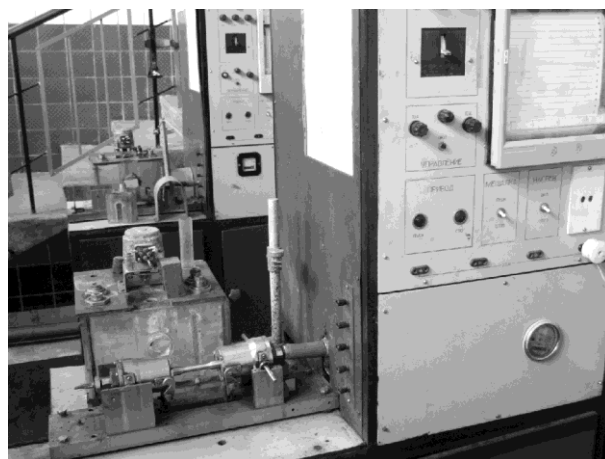


Рис. 3.5. Загальний вигляд установки для визначення опору втомі на повітрі

Число циклів до руйнування зразків N фіксувалося шляхом використання швидкісного імпульсного лічильника. З отриманих даних побудовано криві втоми в координатах: максимальне напруження при симетричному циклі навантаження σ_{\max} – кількість циклів до руйнування N , з яких визначено границю втоми. Випробування починали від напруження $2/3 \sigma_B$, з поступовим зниженням величини до виходу на максимальний рівень, при якому в межах прийнятої бази випробувань (10^7 для випробувань на повітрі і $5 \cdot 10^7$ циклів для випробувань у робочих середовищах) зразки не руйнувалися. Визначений рівень приймався за границю втоми σ_{-1} . Загальні характеристики установки для випробувань на втому [214]:

- діаметр робочої частини зразка d , мм 3...6 мм;
- довжина робочої частини зразка l , мм 85 мм;
- частота навантаження f , мм 1,7...50 Гц.

Відповідно до поставлених завдань, для проведення досліджень у корозійно - агресивних середовищах добрив, використано пристрій для періодичної, або постійної подачі середовища до зразка краплинним, або струменевим способами (рис. 3.6). У даній схемі дзеркало середовища контактує з повітрям, причому під час перемішування постійно збагачується киснем, що відображає реальні експлуатаційні умови розкидачів добрив.

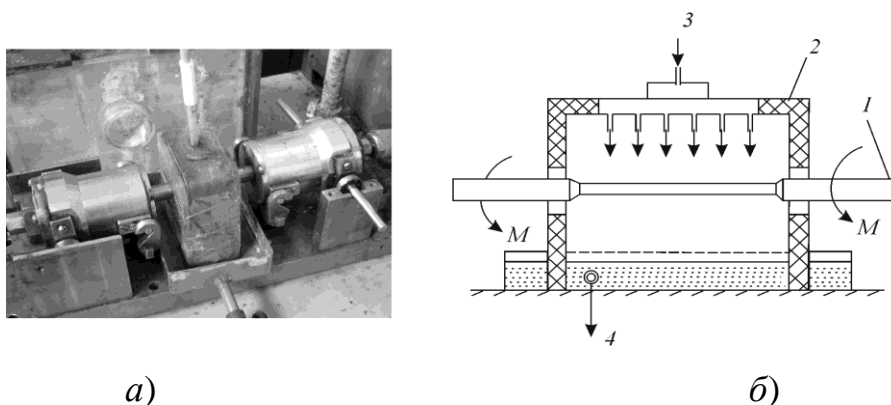


Рис. 3.6. Загальний вигляд (а) і схема системи підведення робочого середовища до зразків (б), навантажених за принципом чистого згину з обертанням:

1 – зразок; 2 – випробовувальна камера; 3 – система підведення корозійного середовища; 4 – система відведення корозійного середовища.



Рис. 3.7. Загальний вигляд установки для досліджень зразків в умовах корозійної втоми

Для отримання величини границі втоми випробовувалось не менше п'яти зразків, при рівні напружень в діапазоні $(0,95...1,05) \cdot \sigma_{-1}$. При цьому 2-3 з них залишались не зруйнованими після досягнення заданої бази випробувань. У підсумку криві втоми у повітрі і середовищах будували за результатами досліджень 10...15 зразків.

3.4. Методика визначення характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості матеріалів елементів розкидачів добрив

Для реалізації програми експериментальних досліджень використано методологічні підходи і дослідне устаткування, описані у [97], що дало змогу проводити випробування матеріалів на корозійну тріщиностійкість при

контрольованих електрохімічних умовах у вершині тріщини, а також дослідити зміни електрохімічного стану у вершині тріщини при зміні вихідних умов випробувань. Вказані дані були використані для встановлення взаємозв'язку між характеристиками корозійної тріщиностійкості досліджуваних матеріалів і параметрами локальних електрохімічних процесів в околі вершини тріщини.

У сучасній інженерній практиці характеристики тріщиностійкості конструкційних металів і сплавів [143] широко використовуються для оцінки фізико-механічного стану і залишкового ресурсу конструктивних елементів в заданих експлуатаційних умовах [146].

Однією з найважливіших характеристик опору матеріалу поширенню втомної тріщини є діаграма циклічної тріщиностійкості матеріалу - залежність швидкості росту тріщини da/dN від коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I , або ΔK_I [148, 166, 320]. Діаграми розташовані між двома граничними значеннями: нижнім пороговим значенням ΔK_{th} , яке відповідає величині ΔK_I , при якому ріст корозійно-втомної тріщини не відбувається, і верхнім ΔK_{fc} , яке відповідає величині ΔK_I , при чому настає неконтрольований катастрофічний ріст тріщини.

Для використання діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалу при розрахунках довговічності (залишкової довговічності) дефектних елементів конструкцій, вони аналітично описуються [24, 25, 320]. Відзначимо, що не зважаючи на значну кількість запропонованих у літературі аналітичних виразів для опису повної діаграми циклічної тріщиностійкості, найбільшого поширення в інженерній практиці набув підхід, який базується на використанні степеневі залежності типу Паріса [24, 25]

$$da/dN = C_i \cdot (\Delta K)^{n_i}, \quad (3.2)$$

де C і n – константи системи „матеріал - середовище”, які залежать від хімічного складу і структури матеріалу, умов випробувань і хімічного складу робочого середовища; i – порядковий номер ділянки; $\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$ –

розмах КІН в циклі навантаження; K_{\max} і K_{\min} – відповідно найбільше і найменше значення КІН у циклі навантаження.

В цілому, рівняння (1) описує середньоамплітудну (другу) ділянку діаграми, також вираз може бути використаний для опису низькоамплітудної (першої) і високоамплітудної (третьої) ділянок діаграми. Вказаний підхід є обґрунтованим, оскільки діаграми циклічної тріщиностійкості багатьох матеріалів при випробовуваннях у корозійних середовищах не мають класичної S-подібної форми, характерної для випробувань в інертних середовищах [97, 98]. Отже, для даних випадків кожен ділянку діаграми доцільно описувати степеневу залежністю Паріса, рис. 3.8.

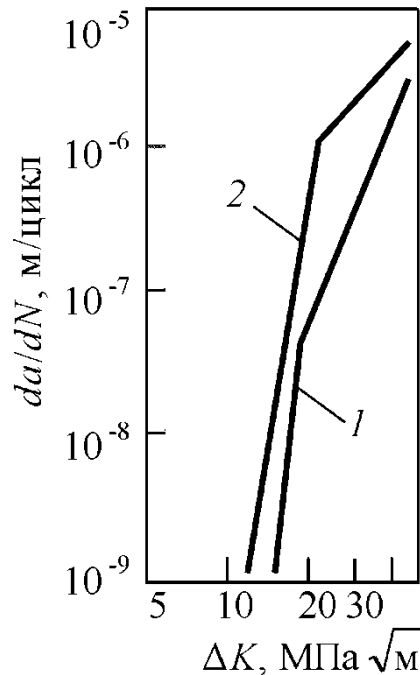


Рис. 3.8. Приклад запису діаграм циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів прямолінійними ділянками у подвійній логарифмічній системі координат для сталі 20 при випробуваннях у повітрі (1) і корозійному середовищі (2), [97]

Для побудови діаграм циклічної тріщиностійкості, які б коректно описували опір матеріалу поширенню тріщини в заданих робочих середовищах,

необхідне застосування спеціальних методик випробувань, які враховують фізико-механічні і фізико-хімічні умови в околі вершини тріщини [97, 166].

Відомо [97], що характеристики тріщиностійкості конструкційних металів значно чутливіші до зміни середовища випробувань у порівнянні з механічними характеристиками, одержаними при традиційних втомних випробуваннях. Дана перевага дає можливість адекватно встановити вплив експлуатаційних середовищ на характеристики міцності і довговічність вуглецевих конструкційних сталей.

В основу методики досліджень покладено балковий зразок з крайовою тріщиною (рис. 3.9), у якому в площині розвитку дефекту виконано циліндричний отвір з віссю перпендикулярною до фронту поширення тріщини (рис. 3.10). Значення коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщини в даному зразку, при навантаженні за схемою чистого згину визначено за формулою [97, 98, 212]

$$K_I = \left(6M / t \sqrt{w^3} \right) \left(\sqrt{\lambda} f(\lambda) / \sqrt[4]{(1-\beta)^3} \right), \quad (3.3)$$

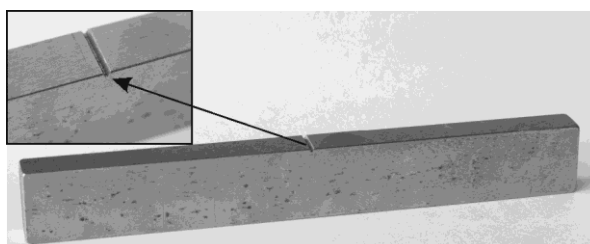
$$\text{при } 0 \leq \lambda \leq 0,8; 0 \leq \beta \leq 0,5;$$

де M – згинальний момент; t – товщина зразка; w – висота зразка; $\lambda = a/w$; a – довжина тріщини; $\beta = d/t$; d – діаметр отвору; $f(\lambda) = 1,99 - 2,47\lambda + 12,97\lambda^2 - 23,17\lambda^3 + 24,80\lambda^4 + 60,50\lambda^6$.

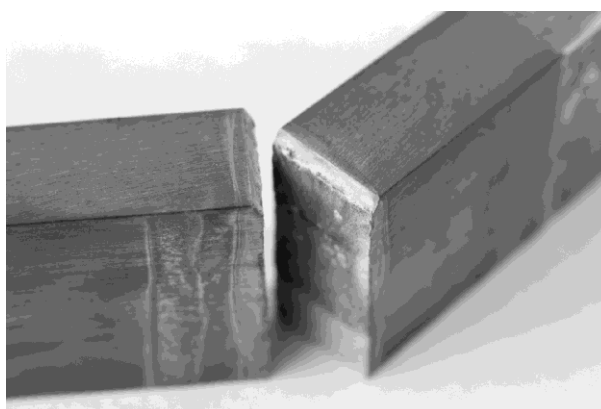
Методика вимірювання електрохімічних умов у тріщині в процесі випробування зразків на тріщиностійкість базується на використанні спеціальних здавачів - мініелектродів [97, 98], що розміщені в отворі у зразку. рН у вершині тріщини визначається шляхом вимірювання потенціалу між сурм'яним індикатором, встановленим у давачі - мініелектроді, що контактує з корозійним середовищем винятково у вершині тріщини і стандартним електродом порівняння з наступним переведенням цих значень на величину рН, згідно попередньо побудованої тарувальної залежності. Електродний потенціал

металу у вершині тріщини вимірювали до стандартного електроду порівняння. При цьому давач - мінелектрод для вимірювання електродного потенціалу здійснював електролітичний зв'язок вершини тріщини з стандартним електродом порівняння.

Принципова схема стабілізації електрохімічних умов у вершині тріщини зображена на рис. 3.11. Зразок *1* з розміщеним у ньому давачем - мікроелектродом) спеціальної конструкції встановлено у робочій камері *3* з корозійним середовищем. У камері симетрично відносно тріщини закріплено два допоміжні електроди з платини *4*. Електропровідна частина давача - мікроелектрода *2* з'єднана електролітично зі стандартним електродом порівняння *5*, а пустотіла частина - з мінінасосом *6*. Зразок, допоміжні електроди та стандартний електрод порівняння під'єднані за схемою [97, 98, 181] до потенціостата *7*.



a



б

Рис. 3.9. Загальний вигляд балкового зразка з нарізаним концентратором для випробувань конструкційних металів на корозійну тріщиностійкість до випробувань (*a*), після випробувань (*б*)

Постійність заданого складу і рН корозійного середовища в околі вершини тріщини досягалася неперервною примусовою циркуляцією середовища через порожнину тріщини з допомогою пустотілої частини давача - мікроелектрода, з'єднаного з мінінасосом. Задану величину електродного потенціалу у вершині тріщини E підтримували за допомогою потенціостата, змінюючи струм в колі „зразок – допоміжний електрод”. При цьому давач - мікроелектрод для вимірювання електродного потенціалу виконує у вершині тріщини контрольну функцію.

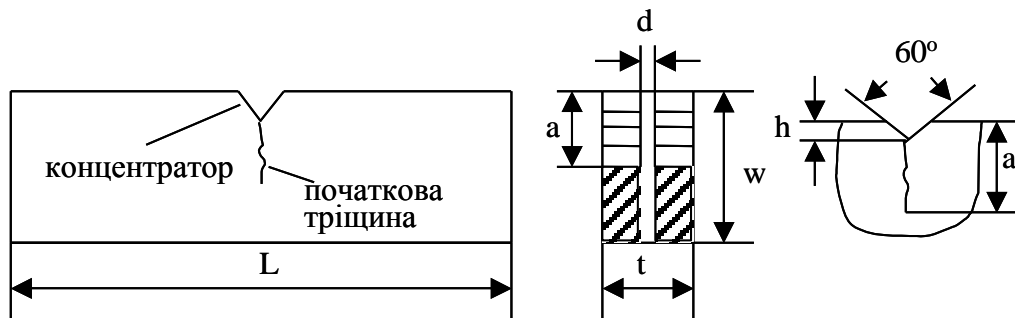


Рис. 3.10. Зразок для випробувань конструкційних металів на корозійну тріщиностійкість при контрольованих електрохімічних умовах у порожнині тріщини

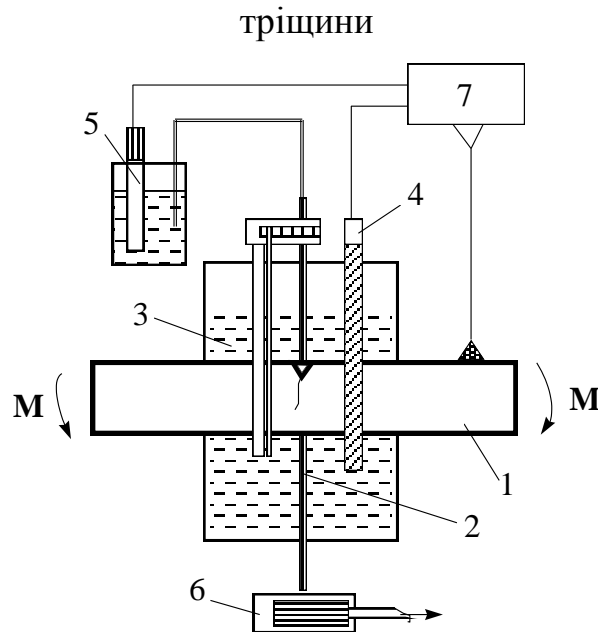


Рис. 3.11. Принципова схема стабілізації електрохімічних умов у вершині корозійної тріщини: 1 – зразок; 2 – давач – мікроелектрод; 3 – робоча камера; 4 – допоміжний електрод; 5 – стандартний електрод порівняння; 6 – мінінасос; 7 – потенціостат.

Дані випробування забезпечують отримання інформації про закономірність розвитку корозійної тріщини при заданих електрохімічних умовах незалежно від довжини початкової тріщини, початкового коефіцієнта інтенсивності напружень, часу дії середовища та інших факторів.

Програму експериментальних досліджень реалізовано з використанням спеціальної дослідної установки [97, 98, 181], яка дозволяє проводити випробування сталей в умовах корозійної втоми та базується на випробуваннях балкових зразків при циклічному навантаженні в умовах чистого згину (рис. 3.12).

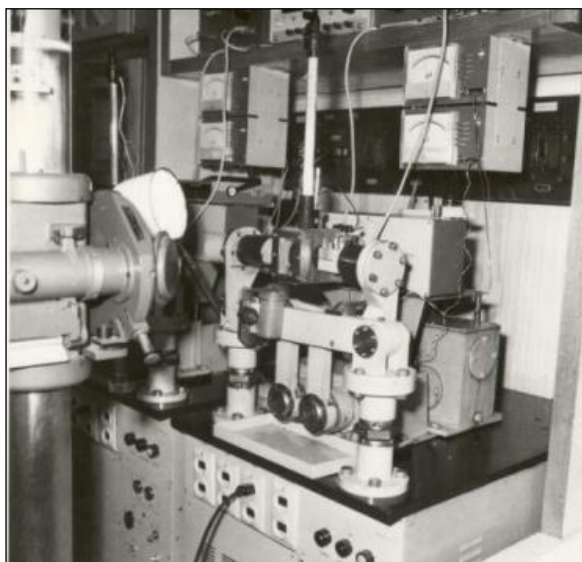
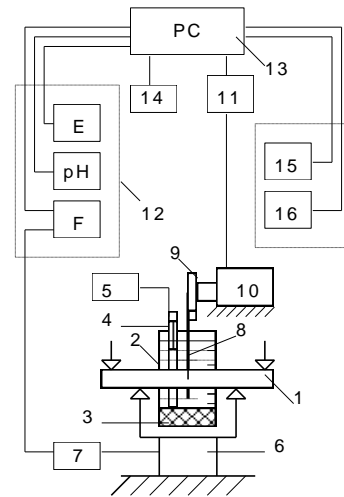


Рис. 3.12. Загальний вигляд установки для випробування призматичних зразків при чистому згині в умовах циклічного навантаження і впливу корозійних середовищ

Основний обсяг досліджень електрохімічних умов у порожнинах корозійних тріщин був виконаний на базі автоматичного комплексу апаратури для фізико-хімічних досліджень локального корозійного руйнування конструкційних матеріалів (рис. 3.13а). Опис даного комплексу наведено у літературі [97, 98, 181]. Його принципова схема представлена на рис. 3.13б.



а)



б)

Рис. 3.13. Загальний вигляд (а) і принципова схема (б) автоматичного комплексу для фізико-хімічних досліджень локального корозійного руйнування конструкційних матеріалів: 1 – зразок; 2 – камера; 3 – нагрівальний елемент; 4 – датчик температури; 5 – терморегулятор; 6 – датчик навантаження; 7 – пристрій реєстрації навантаження; 8 – електроди; 9 – механізм переміщення електродів; 10 – кроковий двигун; 11 – блок управління; 12 – блок вимірювання електрохімічних параметрів; 13 – персональний комп'ютер; 14 – клавіатура; 15 – монітор; 16 – принтер.

Робота установки відбувається в автоматичному режимі і забезпечує реєстрацію закономірностей розвитку тріщини в процесі руйнування зразка та одержання залежностей довжини тріщини від часу дії навантаження і робочого середовища. Окрім цього, синхронно реєструються значення рН корозійного середовища та електродного потенціалу у вершині тріщини, яка розвивається. За допомогою встановленої телекамери також можливо фіксувати зображення корозійної тріщини, встановлювати морфологічні особливостей її розвитку на довільній заданій стадії процесу руйнування матеріалу. Вся інформація про хід експерименту та одержані дані зберігається в комп'ютері, що дозволяє реалізувати множину, за необхідністю, варіантів обробки і систематизації результатів.

Результати випробувань для заданих умов досліджень представлено у вигляді діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості – залежностей швидкості росту тріщини da/dN від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I , який за значеннями глибини тріщини a і величини згинального моменту M розраховувався за формулою (3.2).

Швидкість росту тріщини визначалася, як відношення приросту її довжини a між двома послідовними вимірами n та $n + 1$, тобто

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{n+1} - a_n}{N_{n+1} - N_n}, \quad (3.3)$$

За одержаними даними побудовано відповідні діаграми циклічної тріщиностійкості досліджуваних матеріалів при заданих умовах випробувань.

3.5. Металографічні і фрактографічні дослідження механізмів руйнувань елементів металоконструкцій розкидачів

Всі металографічні та фрактографічні дослідження виконано у Центрі колективного користування науковими приладами (ЦККНП) „Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу” НАН України (див. www.ipm.lviv.ua), що функціонує на базі відділу Фізико-хімічних методів зміцнення матеріалів Фізико-механічного інституту НАН України і обладнаний сучасним науковим обладнанням виробництва фірм Carl Zeiss (Німеччина) та Oxford Instruments (Англія).

Характеристика мікроскопа і системи мікроаналізу. Електронно - мікроскопічні дослідження матеріалів проводились за допомогою скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy (рис. 3.14).

Схема скануючого електронного мікроскопа (SEM) приведена на рис. 3.15. SEM складається з наступних основних вузлів: електронної гармати

1...3, що генерує електрони; електронно-оптичної системи 4...10, яка формує електронний зонд і забезпечує його сканування на поверхні зразка 12; системи, що формує зображення 11...17. СЕМ має вакуумну камеру, яка призначена для створення необхідного вакууму у робочому об'ємі. Частинами мікроскопа є механічні вузли (шлюзи, гоніометричний стіл, тощо), що забезпечують встановлення і переміщення зразка.



Рис. 3.14. Загальний вигляд електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy

Електронна гармата складається з катода 1, циліндра Венельта 2, анода 3. Як катод використовується вольфрамова V-подібна спіраль. При нагріві катоду прямим пропусканням струму проходить термоемісія електронів. Електрони прискорюються напругою між катодом і анодом. Циліндр Венельта має високий від'ємний потенціал і служить для регулювання потоку електронів. Пучок електронів від гармати проходить через три електромагнітні лінзи 5, 6, 9. Стігматор 8 розміщений в об'єктивній лінзі 9, де також знаходяться дві пари електромагнітних котушок 7, кожна з яких служить для відхилення зонда. Котушки з'єднані з генератором 16, який забезпечує синхронність переміщення електронного зонда по зразку і електронного променя по екрану електронно-променевої трубки 15.

Зразок *12* кріпиться на предметному столику, який може переміщуватися в трьох взаємно перпендикулярних напрямках, також допускається нахил зразка на 90° до електронно-оптичної осі і обертання від 0 до 360° . На схемі СЕМ (рис. 3.15) представлено один з декількох наборів детектора, який використовують для реєстрації вторинних електронів *13*. У детекторі потік електронів перетворюється на електричний сигнал. Для мікроаналізу використовується кремнієво-літєвий енергодисперсійний детектор.

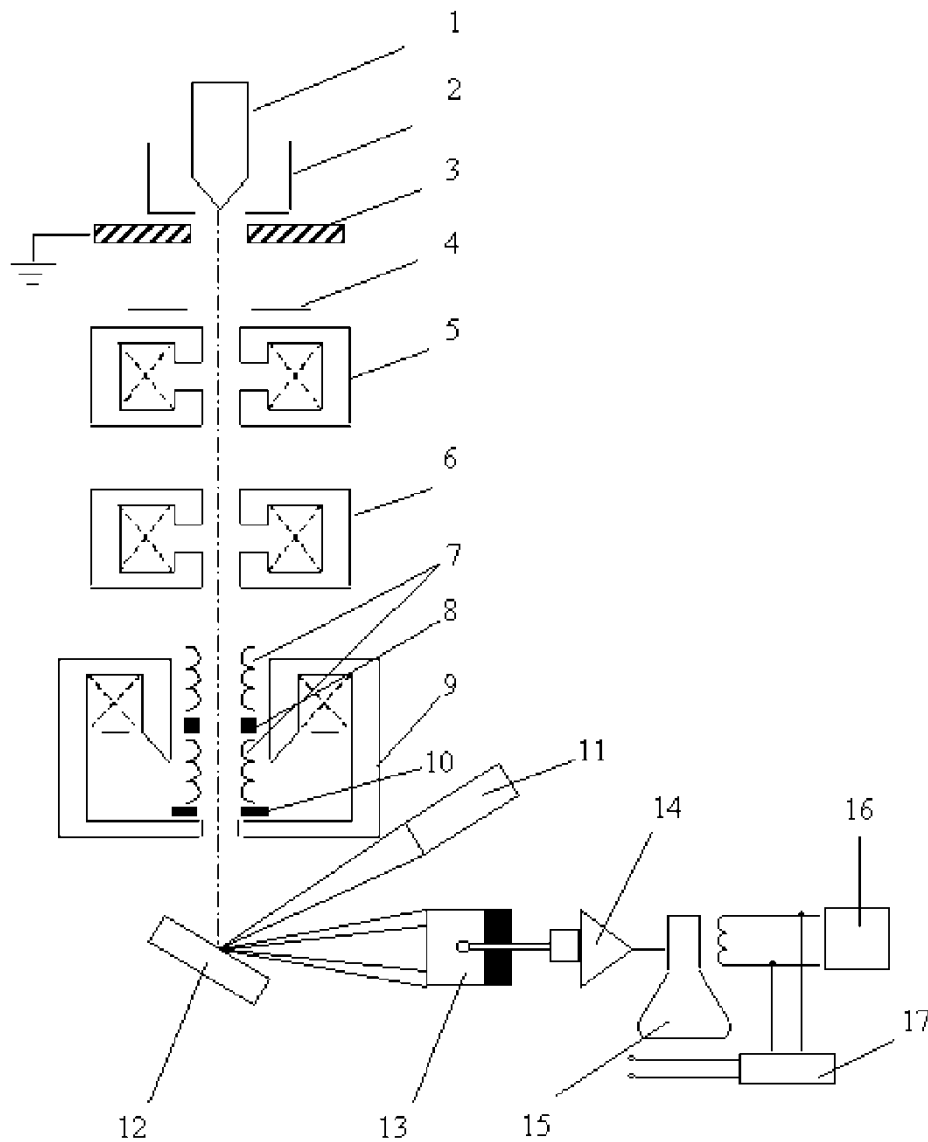


Рис. 3.15. Принципова схема електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy

Електронний мікроскоп Carl Zeiss включає в себе базовий блок EVO 40XVP із можливістю роботи у режимах високого вакууму, низького вакууму та наднизького вакууму в комплекті з:

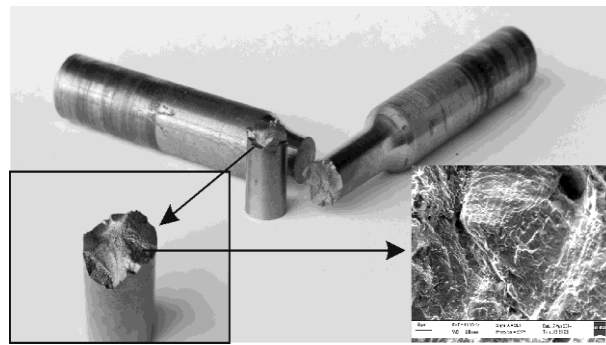
- безмасляною системою відкачки вакууму на базі форвакуумної помпи та турбомолекулярної помпи високої продуктивності без масляних ущільнень і підшипників, швидкість відкачки повітря з камери для стандартного зразка становить 3 хвилини;
- електронно-оптичною колоною для вольфрамового катоду;
- детекторами:
 - вторинних електронів Эвернхарта – Торнлі (SE);
 - 4-ох сегментним детектором відбитих електронів (BSD) з кріпленням на полюсному наконечнику (не потребує налаштування та юстування, не скорочує робочу відстань мікроскопу і постійно готовий до роботи, не займає окремого порту в камері мікроскопу);
 - вторинних електронів для низького вакууму (VPSE);
 - детектором поглинутого струму;
 - інфрачервоною камерою для спостереження за положенням зразка у камері мікроскопу;
- робочою камерою розміром 365 × 220 мм;
- столиком із повною моторизацією по 5-ти осях з точністю переміщення і повторюваністю позиції 1,5 мкм;
- програмним забезпеченням SmartSEM;
- комп'ютером.

Енергодисперсійний рентгенівський спектрометр INCA ENERGY 350 комплектується:

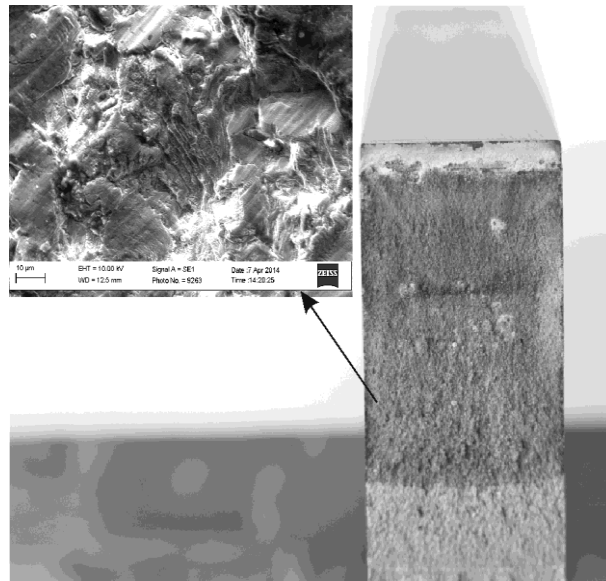
- літійовим детектором площею 10 мм, що забезпечує роздільну здатність 133 еВ, чутливість визначення домішки 0,01 %, локальність аналізу від 1 мкм на стандартних взірцях та до 0,1 мкм на плівках;
- дюаром на 7,5 літра для охолодження детектора рідким азотом;
- мікроаналітичним процесором INCA X-stream;

- системою захоплення відео зображення Microscope Image Capture System (MICS);
- комп'ютером;
- програмним забезпеченням Inca Energy:
 - опцією якісного аналізу в діапазоні від берилію до плутонію;
 - опцією кількісного аналізу в діапазоні від бору до плутонію;
 - автоматичним маркуванням піків;
 - автоматичним та ручним масштабуванням спектрів;
 - шести режимами отримання спектрів;
 - реконструкцією спектрів;
 - порівнянням спектрів.

Підготовка зразків для досліджень на електронному мікроскопі. На мікроскопі досліджували шліфи та поверхні об'єктів без попередньої підготовки (рис. 3.16). Приготування шліфів до досліджень на електронному мікроскопі в цілому здійснюється аналогічно дослідженням методами оптичної мікроскопії. Велика глибина різкості зображення на ЕМ дозволяє отримувати додаткову інформацію, проводячи глибоке травлення шліфів. Водночас при отриманні зображень у відбитих електронах шліфи не травляться. Зразки повинні бути електропровідними. Для забезпечення їх доброго електричного контакту з предметним столиком і для фіксації зразків при нахилі столика використовують спеціальні струмопровідні клеї або струмопровідну двохсторонню самоклеючу плівку. Перед дослідженнями зразки ретельно очищуються для запобігання утворення газоподібних продуктів, що утруднюють отримання вакууму при відкачуванні з камери мікроскопа і забруднюють його колону. Рекомендується проводити очищення зразків у розчинниках з використанням ультразвуку.



а)



б)

Рис. 3.16. Загальний вигляд зразків для досліджень на електронному мікроскопі після втомних досліджень (а) та досліджень на тріщиностійкість (б)

Підготовка зразків урахуванням особливостей проведення мікроаналізу. В цілому, підготовка металевих зразків для мікроаналізу не відрізняється від приготування зразків для отримання зображення на ЕМ, вони підготовлюються як звичайні металографічні шліфи з використанням шліфування та подальшого полірування. Однак, поверхня зразків повинна бути абсолютно плоскою і не мати рисок чи рельєфу наявність яких призводить до зниження точності визначення концентрації елементів. З цієї причини полірування виконується виключно механічно з використанням алмазних паст. Під час приготування шліфів не використовуються абразивні матеріали, які містять елементи, що

входять до складу досліджуваних зразків, оскільки абразивні частинки можуть проникати в поверхню зразка.

Електрополірування чи хімічне травлення поверхні зразків не проводиться, оскільки це може призвести до утворення мікрорельєфу та зумовити збагачення чи збіднення поверхні внаслідок селективного розчинення певних компонентів.

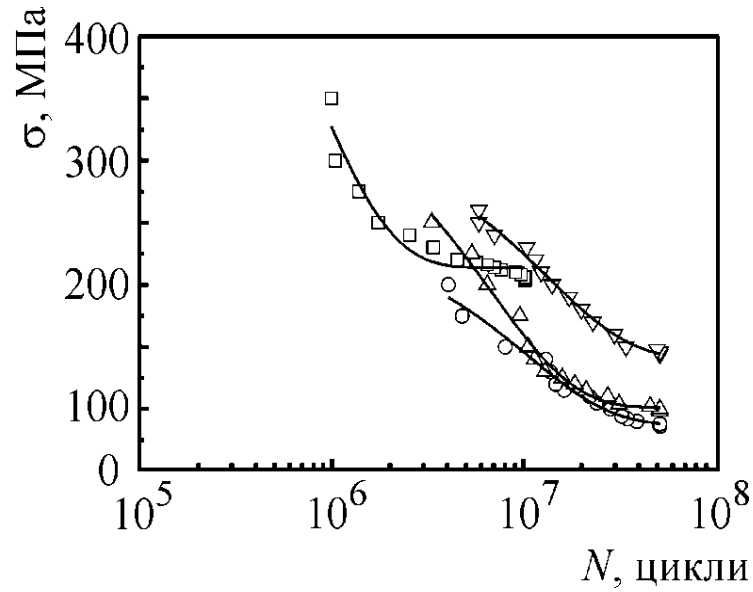
Для того, щоб виявити на зразку місце для проведення дослідження в рентгеноспектральному мікроаналізаторі, після полірування взірець слід необхідно протравити і відзначити необхідні місця відбитками мікротвердості. Після цього зразок повторно полірується до ступеня, коли травлення зникне, а маркування залишається.

У випадку, коли при заливанні шліфів використовувалась пластмаса, її слід ретельно видалити, оскільки під впливом електронних променів пластмаса випаровується і забруднює апаратуру. У всіх випадках досліджувані зразки повинні бути ідеально чистими. Ця вимога відноситься до електронної мікроскопії та до рентгеноспектрального мікроаналізу.

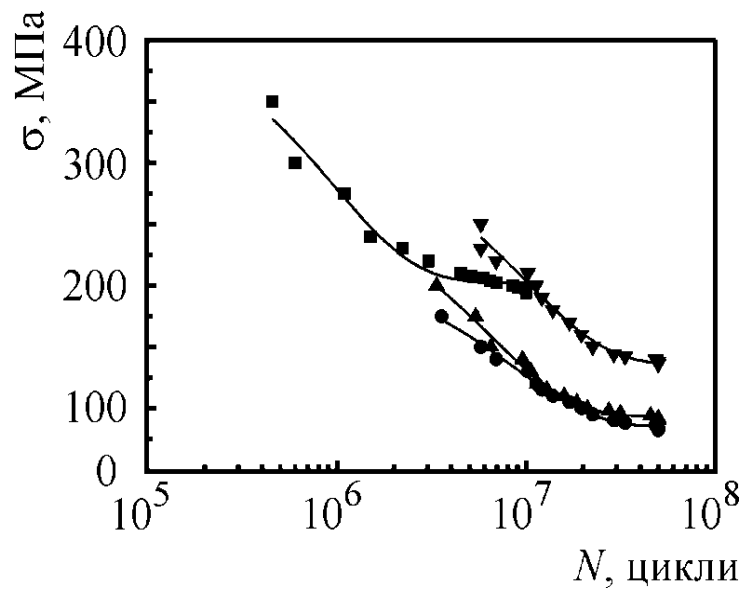
3.6. Вплив робочих агресивних середовищ на втомне руйнування матеріалів несучих систем машин для внесення добрив

Встановлено, у всьому діапазоні заданих навантажень опір сталі 20 корозійно-втомному руйнуванню в середовищах мінеральних добрив в порівнянні з повітрям і дистильованою водою суттєво знижується (рис. 3.17б, табл. 3.5). У розчині сульфату амонію умовна границя корозійної втоми знизилася в 2,2, а в розчині нітрофоски – в 2,5 рази порівняно з границею втоми на повітрі, і, відповідно в 1,9 і 2,2 рази в порівнянні дистильованою водою. Мінімально негативний вплив величину опору сталі 20 корозійній втомі виявив гній безпідстилковий змішаний. У досліджуваній змішаній гноївці умовна

границя втоми підвищилася на 8% відносно середовища дистильованої води, виявивши таким чином властивості інгібітора корозійно-втомного руйнування [59, 60, 208].



a



б

Рис. 3.17. Криві втоми сталі 20 (*a*) та Ст 3 (*б*) у середовищах: повітря □, ■; насичений розчин нітрофоски (○, ●) і сульфату амонію (△, ▲); змішаний безпідстилковий гній (▽, ▼).

Таблиця 3.5

Границі витривалості при випробуваннях у агресивних робочих середовищах

Матеріал	Повітря, МПа	Змішана гноївка, МПа	Дистильована вода, МПа	Мінеральні добрива, МПа	
				Сульфат амонію	Нітрофоска
Сталь 20	207	147	135	104	90
Ст 3	197	139	121	93	85

Тенденції зміни опору корозійно-втомному руйнуванню при впливі різних середовищ встановлено для Ст 3 (рис. 3.17а, табл. 3.5). Однак у даних середовищах опір втомному і корозійно-втомному руйнуванню Ст 3 виявився нижчим, ніж сталі 20. Як особливість відзначено значно менший вплив на границю витривалості обох сталей змішаної гноївки у порівнянні з середовищами мінеральних добрив. Крім того, відзначено відсутність негативного впливу органічного добрива на умовну границю втоми обох сталей порівняно з дистильованою водою.

Специфіка руйнування зразків при випробуваннях з деформуванням обертовим згином пов'язана з неможливістю уникнути контакту спряжених поверхонь зламів, що формуються внаслідок росту втомної тріщини, яка зароджується від бічної поверхні зразків під дією знакозмінних в циклі навантажень. Тому злами (рис. 3.18) порівнювали при різних, по можливості нижчого рівня максимальних напруженнях з метою мінімізації наслідків вказаного контакту на завершальному етапі руйнування.

Фрактографічні дослідження виявили типову картину руйнування обох сталей на повітрі. Визначено, тріщини на повітрі зароджені в одному (двох) місцях за периметром зразка, поширення вглиб перерізу відбулось серпоподібним фронтом (рис. 3.19). При цьому виявлено сформовані на зламі фестони, поперек яких розташовано втомні борозенки (рис. 3.20, 3.21). Межі між суміжними фестонами на зламі позначились гребенями в'язкого відриву, які часто мали сліди наклепу через невідповідність впадин і виступів під час контакту берегів тріщини протягом навантаження. Крок борозенок зростав в

міру просування тріщини від зовнішньої поверхні зразка до остаточного його руйнування, характеризувалось в'язким характером - зародження порожнин, їх подальший ріст та злиття з утворенням на поверхні класичного ямкового рельєфу.

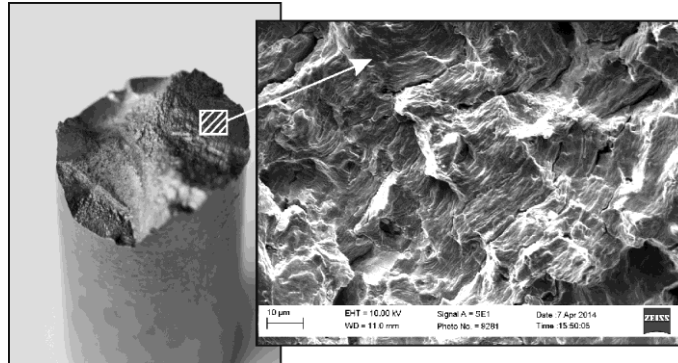


Рис. 3.18. Приклад визначення місця фрактографічного дослідження особливостей втомного руйнування зразків

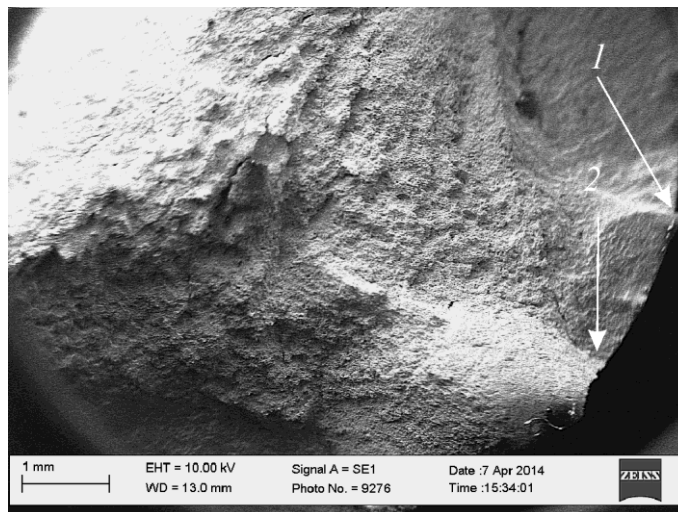


Рис. 3.19. Місця зародження тріщини на поверхні зразка і серпоподібний фронт поширення

Суттєва зміна механізму руйнування виявлена в робочих середовищах. Кількість зародків втомних тріщин від бокової поверхні зразків істотно зростає, фронт поширення змінюється. Як правило, досліджувані тріщини поширювалися вглиб перерізу зразків у вигляді клинів (рис. 3.22а). При вищій роздільній здатності мікроскопа, на зламах чітко ідентифіковано елементи між- і крізьзернового

руйнування, істотного вторинного розтріскування вздовж меж зерен (рис. 3.22б, в). Окрім цього, ділянки з втомними борозенками на зламах виявляються чітко лише в межах тих перлітних зерен, пластини перліту у яких орієнтовані перпендикулярно до магістрального напрямку поширення тріщини. Завдяки руйнуванню вздовж їхніх меж по фериту, можна спостерігати на зламі структуру перліту. Виявлення меж перлітних пластин стало можливим саме внаслідок впливу агресивних компонентів робочих середовищ добрив оскільки при випробуваннях на повітрі вказаного явища не спостерігалось.

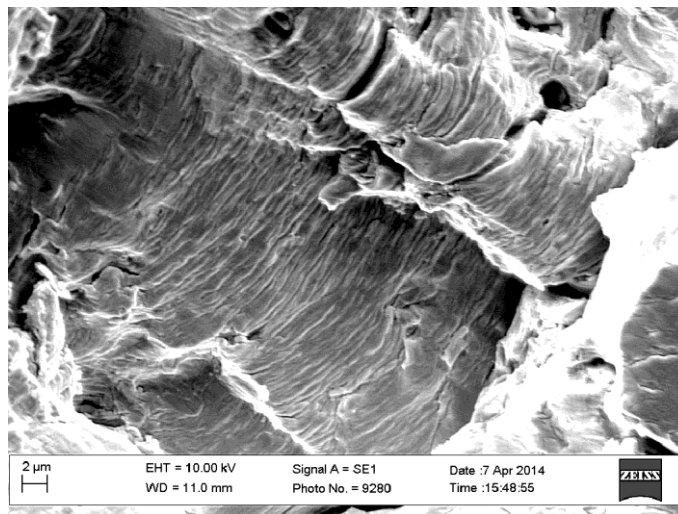


Рис. 3.20. Поверхні втомного руйнування сталі Ст 3 на повітрі

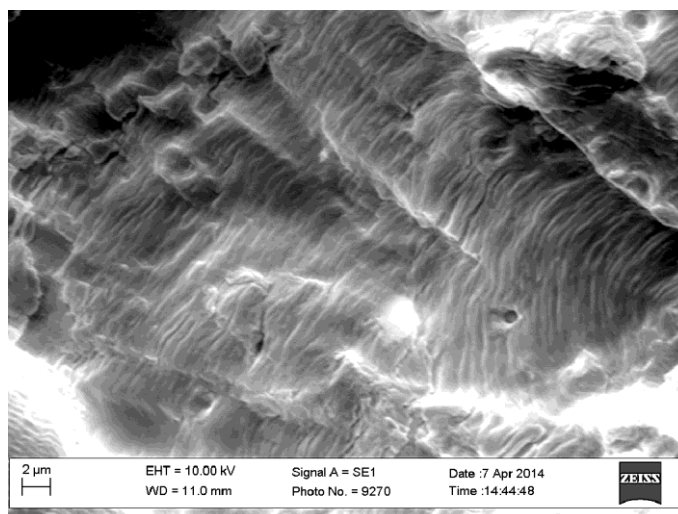


Рис. 3.21. Поверхні втомного руйнування сталі 20 на повітрі

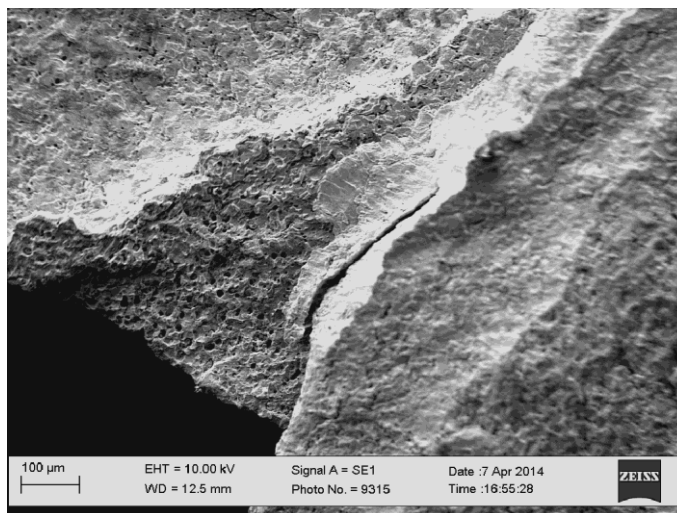
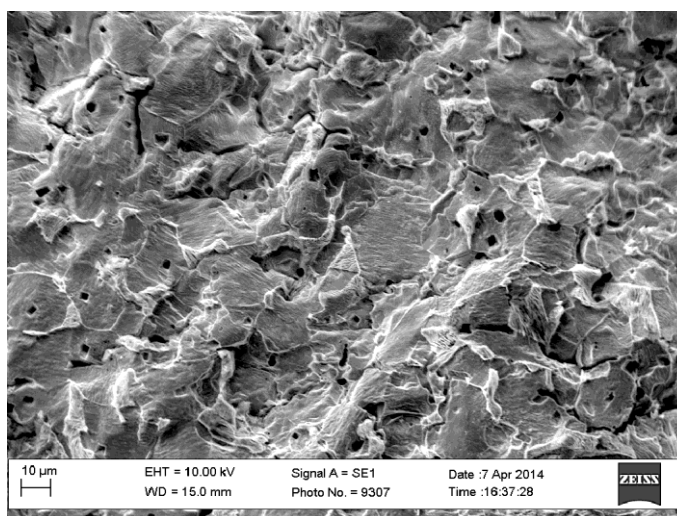
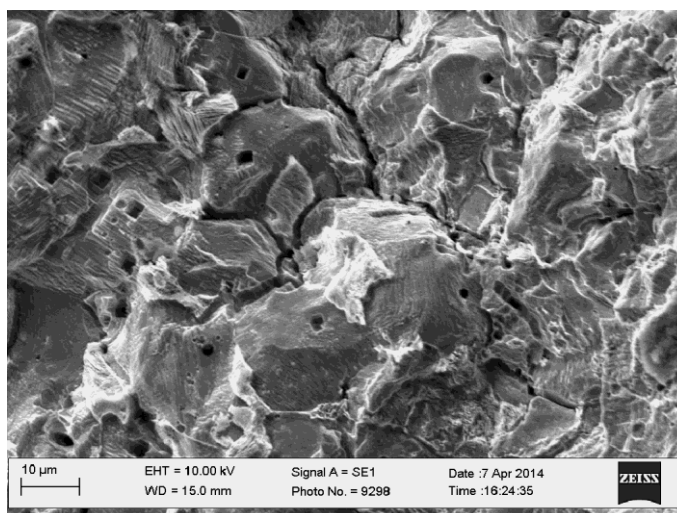
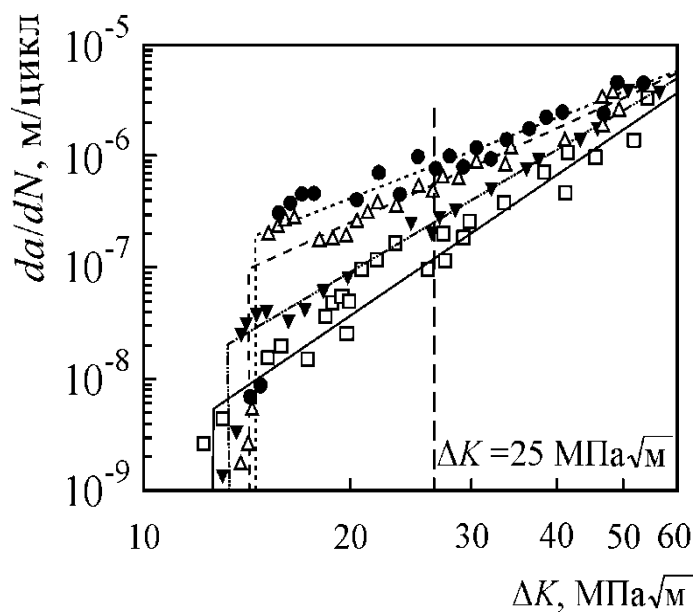
*a**б**в*

Рис. 3.22. Поверхні втомного руйнування сталі Ст 3 у розчині нітрофоски (а–в)

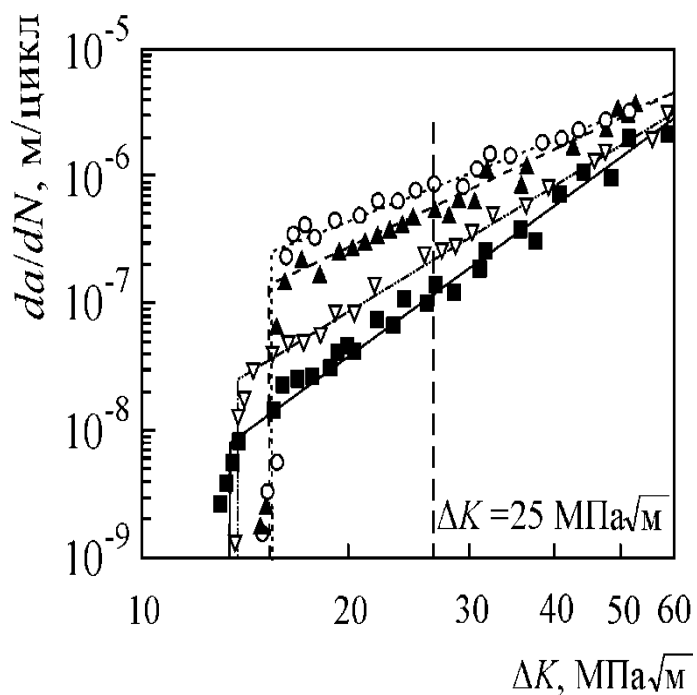
При випробуваннях в органічному добриві та дистильованій воді встановлено перевагу класичного втомного механізму руйнування з елементами міжзернового розтріскування, чим пояснюється значно менший вплив органіки на умовну границю втоми досліджуваних матеріалів металоконструкцій розкидачів добрив у порівнянні з мінеральними добривами [59].

3.7. Вплив добрив на циклічну тріщиностійкість матеріалів металоконструкцій сільськогосподарських машин

Оскільки досліджувані конструкційні сталі подібні за своїм хімічним складом (табл. 3.2), структурою та характеристиками міцності (табл. 3.3), загальні тенденції впливів агресивних робочих середовищ органічних і мінеральних добрив на розвиток втомних тріщин в порівнянні з повітрям у них подібні. Сталь 20 краще чинить опір корозійно-втомному розтріскуванню, діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості Ст 3 мають дещо стрімкіший характер, причому з незначними змінами величини ΔK відчутніше збільшується швидкість росту тріщини da/dN (рис. 3.23). Для порівняння впливу експлуатаційних середовищ на швидкість росту втомних тріщин вибрано характеристичне значення $\Delta K = 25 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}} = \text{const}$ (рис. 3.23) для якого визначено величини швидкостей росту втомних тріщин при заданих умовах (табл. 3.6), а також проведено їх порівняння з швидкістю росту тріщин в повітрі (табл. 3.7). Одержані результати доводять (табл. 3.6 і 3.7), що розглянуті робочі середовища мають відчутний вплив на швидкість поширення втомних тріщин у Ст 3 та сталі 20, швидкість розвитку тріщиноподібних дефектів може зростати від 5 до 25 разів у порівнянні з випробуваннями на повітрі. При цьому негативний вплив середовища на опір поширення тріщин в даних сталях зростає у послідовності: органічне добриво– сульфат амонію – нітрофоска.



a



б

Рис. 3.23. Вплив середовища на швидкість поширення втомної тріщини Ст 3 (а), сталь 20 (б) при $R = 0,32, f = 3,0$ Гц згідно (3.4): повітря \square, \blacksquare ; насичені розчини нітрофоски (\bullet, \circ) і сульфату амонію ($\triangle, \blacktriangle$); органічне добриво (гноївка змішана) ($\blacktriangledown, \triangledown$).

Таблиця 3.6

Вплив середовищ добрив на швидкість росту втомних тріщин
при характеристичному $\Delta K = 25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = \text{const}$

Сталь Середовище	da/dN , м/цикл			
	Повітря	Гноївка змішана ВРХ + свиняча	Мінеральні добрива	
			Сульфат амонію	Нітрофоска
Ст 3сп	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$
Сталь 20	$0,3 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 3.7

Порівняння швидкостей росту тріщин в різних середовищах
при характеристичному $\Delta K = 25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = \text{const}$

Сталь Середовище	$(da/dN)_c / (da/dN)_{нов}$			
	Повітря	Гноївка змішана ВРХ + свиняча	Мінеральні добрива	
			Сульфат амонію	Нітрофоска
Ст 3сп	1	5,6	11	18
Сталь 20	1	7	20	26,7

На підставі одержаних експериментальним шляхом даних [3], також визначено порогові коефіцієнти інтенсивності напружень ΔK_{th} що відповідають значенням ΔK_I , при яких не відбувається розвиток корозійно-втомної тріщини у Ст 3 та сталі 20 при заданих умовах випробувань (табл. 3.8). Слід зазначити, що ΔK_{th} є важливою характеристикою корозійно-втомного руйнування матеріалів [97, 320], за його величиною для досліджуваної системи „матеріал – середовище” можна визначити безпечний рівень напружень в елементах несучих систем с/г машин при наявності дефектності. Для розглянутих випадків значення параметра ΔK_{th} дещо зростає з зростанням ступеня агресивності робочого середовища (табл. 3.8). Це пояснюється тим, що в припорогових областях діаграм циклічної тріщиностійкості для Ст 3 та сталі 20 переважають корозійні процеси локального електрохімічного розчинення металу, які змінюють геометрію вершини тріщини, а отже, зменшують ефективну концентрацію напружень в її околі [59, 60, 97, 98, 208].

Таблиця 3.8

Порогові значення ΔK_{th} при випробуваннях у робочих середовищах, МПа $\sqrt{м}$

Сталь Середовище	Повітря	Гноївка змішана ВРХ + свиняча	Мінеральні добрива	
			Сульфат амонію	Нітрофоска
Ст 3	12,1	12,6	13,1	13,3
Сталь 20	12,7	13,0	14,1	14,1

Таблиця 3.9

Вплив складу середовища на константи залежності
типових матеріалів несучих систем розкидачів добрив

Робоче середовище	Ст 3		Сталь 20	
	$C, \frac{м/цикл}{(МПа\sqrt{м})^n}$	n	$C, \frac{м/цикл}{(МПа\sqrt{м})^n}$	n
Повітря	$1,6 \cdot 10^{-11}$	4,08	$3,7 \cdot 10^{-11}$	3,87
Гноївка змішана ВРХ + свиняча	$1,5 \cdot 10^{-10}$	3,66	$5,1 \cdot 10^{-10}$	3,2
Сульфат амонію	$7,2 \cdot 10^{-9}$	2,72	$4,5 \cdot 10^{-9}$	0,02
Нітрофоска	$3,1 \cdot 10^{-8}$	2,41	$6,5 \cdot 10^{-8}$	2,1

Для використання одержаних результатів [59, 60] в інженерних розрахунках з комплексної оцінки залишкової довговічності та ризиків руйнування дефектних елементів несучих систем причіпних розкидачів добрив з урахуванням дії робочих середовищ добрив, діаграми циклічної тріщиностійкості Ст 3 та сталі 20 аналітично описані за допомогою степеневі залежності [24, 25, 208]

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^n, \quad (3.4)$$

де C і n – константи системи „матеріал – середовище”, які залежать від хімічного складу і структури матеріалу, умов випробувань та хімічного складу середовища, значення приведено у табл. 3.9.

3.8. Висновки

У розділі експериментальним шляхом встановлено вплив робочих середовищ на втомне руйнування і циклічну тріщиностійкість матеріалів елементів несучих структур розкидачів добрив. Обґрунтовано вибір експериментальних і розрахункових методів, отримано результати:

1. Визначено особливості впливу середовищ на втомне руйнування сталей металоконструкцій машин для внесення добрив:

- опір сталі 20 корозійно - втомному руйнуванню в мінеральних добривах у діапазоні прикладених навантажень порівняно з повітрям суттєво знижується, зокрема в розчині сульфату амонію умовна границя корозійної втоми знижується в 2,2, в розчині нітрофоски – в 2,5 рази у порівнянні з границею втоми на повітрі. Встановлено тенденції зміни опору корозійно-втомному руйнуванню при впливі середовищ добрив Ст 3, для якої опір корозійно-втомному руйнуванню в усіх корозійно - агресивних середовищах є нижчим, ніж сталі 20;

- опір сталі 20 корозійно-втомному руйнуванню в органічних добривах у порівнянні з повітрям знизився на 25 %. Встановлено тенденції зміни опору корозійно-втомному руйнуванню Ст 3 в органічних добривах, який для Ст 3 нижчий, ніж сталі 20;

- встановлено значно менший вплив на границю витривалості сталей органічних добрив у порівнянні з мінеральними;

- на основі фрактографічних досліджень визначено особливості втомного руйнування в середовищах органічних і мінеральних добрив. Встановлено, що розчини мінеральних добрив спричиняють між- і трансзернове втомне руйнування з розшаруванням вздовж меж пластин перліту при умові їхньої орієнтації перпендикулярно до напрямку росту тріщини,

причому з ослабленням границь зерен та міжфазних границь спостерігається істотне зниження границі витривалості обох сталей в розчинах мінеральних добрив у порівнянні з органічними добривами.

2. Визначено вплив робочих середовищ добрив на характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалів тримких металоконструкцій розкидачів:

- робочі середовища при яких експлуатуються машини для внесення добрив суттєво впливають на швидкість поширення втомних тріщин у матеріалах несучих систем. Швидкість розвитку тріщиноподібних дефектів зростає при характеристичному значенні $\Delta K = 25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = \text{const}$ для Ст 3 в 11 разів (сульфат амонію) і 18 разів (нітрофоска) у порівнянні з випробуваннями на повітрі, для сталі 20 у 20 разів (сульфат амонію) та в 26,7 разів (нітрофоска) порівняно з випробуваннями на повітрі;

- швидкість розвитку корозійних тріщиноподібних дефектів у середовищі органічного добрива зростає при характеристичному значенні $\Delta K = 25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = \text{const}$ для Ст 3 в 5,6 разів, для сталі 20 у 7 разів в порівнянні з випробуваннями на повітрі;

- негативний вплив середовища на опір поширення тріщин в досліджуваних сталях зростає у послідовності: органічне добриво – сульфат амонію – нітрофоска.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

4.1. Вплив експлуатаційних середовищ і умов навантаження на поширення тріщин в матеріалах металоконструкцій сільськогосподарських машин

Мобільні сільськогосподарські машини працюють на відкритому повітрі в умовах дії на них різних факторів, які включають коливання температури, корозійно - агресивні середовища з широким спектром їх параметрів, динамічні навантаження, ін. Найбільший негативний вплив на ресурс елементів несучих металоконструкцій сільськогосподарських машин мають корозійно - агресивні середовища [74, 249, 270, 275]. Особливо це стосується розкидачів органічних і мінеральних добрив, металоконструкції яких знаходяться під дією мінливого навколишнього середовища, причому найбільш агресивними середовищами є вологі мінеральні і органічні добрива. Вплив даних середовищ значно скорочує довговічність, зокрема залишковий ресурс елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин при умові пошкодження захисних покриттів. На ділянках вражених корозією поверхонь несучих вузлів металоконструкцій, зароджуються корозійно-втомні поверхневі тріщини, які розвиваються до критичних розмірів, і, як наслідок, виникає небезпека руйнувань елементів машини. Швидкість росту корозійно-втомних тріщин є набагато більша від швидкості росту втомних в аналогічних металевих матеріалах [97, 212, 275, 311], це призводить до зменшення ресурсу (залишкового ресурсу) елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин, що необхідно враховувати при оцінці міцності і довговічності.

В даному розділі приведені результати досліджень впливу корозійно - агресивних середовищ (вологі органічні і мінеральні добрива, корозійно-активні ґрунти, ін.) на втомне руйнування матеріалів і їхніх зварних з'єднань в несучих конструкціях сільськогосподарських машин та залишковий ресурс елементів тримких металоконструкцій. Основні результати приведених досліджень опубліковано в роботах [191, 187, 207].

Несучі структури сільськогосподарських машин виконують технологічні процеси при дії жорстких корозійних середовищ. При внесенні органічних і мінеральних добрив, обробки полів отрутохімікатами для знищення шкідників, на поверхні металоконструкцій осідає пил від хімікатів, який у поєднанні з вологою створює агресивне середовище, що призводить до інтенсивних корозійних пошкоджень [97, 122, 138, 212, 249, 275, 311]. Швидкість процесів корозії залежить від ступеня агресивності середовищ, тривалості дії, температури, стану поверхні металу (складу та структури захисної плівки), хімічного складу металу і наявності механічних напружень, а також від конструктивних особливостей - зварних вузлів, болтових і заклепочних з'єднань, поєднань окремих елементів, що створюють порожнини, або щілини, в яких конденсується волога. Атмосферна корозія деталей сільськогосподарських машин може збільшитися біль як у десять раз за наявності агресивних середовищ – мінеральних і органічних добрив, отрутохімікатів, ґрунту. Частинки забруднень, що залишилися після очищення машин, за наявності вологи є хімічно активними і прискорюють процеси корозії. У відомих працях Севернева М., Северного А., ін. наголошено, що найглибші пітінги утворюються при корозії деталей у нітрофосці і сульфаті амонію (розділ 1). З органічних добрив найбільш корозійний активний торфогноєслужний і торфожижевий компости, найменше – екскременти корів і гній на їх основі. Наявність забруднень поверхонь деталей збільшує корозію, оскільки у поєднанні з вологою добрива стають електролітами, що інтенсифікує процеси корозії. Корозія найбільш небезпечна для деталей, що працюють при циклічних, або ударних навантаженнях (пружини, пружинні лапи

культиваторів, осі, вали і т. д.). відомо, термін служби деталей внаслідок втомних руйнувань на практиці часто скорочується на 40-60%. При аналізі зламів деталей (лап культиватора, валів, тощо) встановлено, що початком багатьох руйнувань були виразки і пітинги від корозії. Особливо активно руйнується тонколистова сталь, внутрішні поверхні ємностей для отрутохімкатів, тонкостінні профілі. Також типовими, постійно присутніми в аграрному виробництві експлуатаційними і корозійно – агресивними середовищами є водні розчини ґрунтів.

Аналіз корозійної активності ґрунтів. Значна кількість супутніх у корозійних процесах явищ, а також спроби виділити і класифікувати домінуючі типові чинники і напрямки розвитку процесів корозії с/г техніки стало причиною застосування багатьох методів оцінки корозійної активності ґрунтів [121, 122]. За достовірністю одержаних результатів дані методи не рівноцінні і їхнє застосування у різних країнах обумовлене значною кількістю техніко-економічних причин. У зв'язку з розвитком трубопровідного транспорту, вивчення корозійної активності ґрунтів було започатковано на початку століття. Величезний експериментальний матеріал свідчив про те, що різні ґрунти за корозійною активністю суттєво відрізняються [121, 122, 138]:

болотисті ґрунти та торф'яники містять органічні кислоти, сірководень, інколи вільну сірчану кислоту і можуть спричинити кислотну корозію сталі. Ці ґрунти є високо корозійно-активними;

гумусові ґрунти мають високу буферну здатність. В таких ґрунтах майже відсутня аерація, можливі утворення сульфідів як наслідок розкладання органічних речовин. Гумусові є ґрунти корозійно-активними;

глина – біла, жовта, коричнева, червона з причини наявності в ній сульфатів і сульфатовідновлюючих бактерій високо корозійно-активна;

ял – груба глина. Сильно корозійно-активна;

шлик – злежаний мул. Складається з органічних напіврозкладених речовин, гумозних, глинистих і вапняних компонентів, часто містить сульфід

заліза. Корозійна активність мулу зростає із збільшенням вмісту сульфїду заліза;

шлам (мул) – глинисті рихлі відкладення, вперемїшку з органічними речовинами. Анаеробний, дуже корозійно-активний внаслідок наявності органічних продуктів розкладу;

лес – це шарувата осадова порода. Мілкодисперсні частинки містять оксиди натрію, калію і кальцію. Лес анаеробний (не продувається повітрям), за відсутності сульфїдів слабоагресивний, при утворенні мікроелементів агресивний;

суглинок – менш пластичний, ніж глина. Складається з суміші глини і піску з включеннями заліза. Корозійна активність, аналогічна лесу;

марш – відкладення на дні річок, озер. Складається з суглинку, мулу, глини і торфу. Анаеробний, має високий вміст солей, високу вологість. Дуже корозійно-активний;

вапняк – осадова кам'яна порода дуже дрібнозернистої структури, що містить важкорозчинний CaCO_3 . Аеробний не корозійно - активний;

мергель – суміш глини і вапняку. Поділяється на вапняковий, глинистий і піщаний. Корозійна активність зазвичай така ж, як суглинку.

пісок – скупчення дрібних мінеральних зерен, переважно кварцу, різного розміру. У вологому стані анаеробний, зазвичай не корозійно-активний.

На підставі даного розгляду ґрунтів можна зробити висновок, що піщані ґрунти, піщано-мергельні, лесові, вапняно-мергельні і вапняні ґрунти, а також збагачені вапном гумусові ґрунти, суглинки, які добре аеруються, також суглинково-мергелеві ґрунти не є агресивними при умові, що на них не впливають екологічно небезпечні, наприклад, забруднені стічні води, і що корозійні елементи не утворюються внаслідок нерівномірної аерації і відсутні блукаючі струми [121, 122, 138].

Вплив екологічних забруднень особливо небезпечний для ґрунтів з поганою буферуючою здатністю. Гомогенні глинисті ґрунти, які не містять солей сульфїдів і сульфатів, органічних кислот, не корозійно-активні. Проте

при утворенні в глинистих ґрунтах анодів елементів диференціальної аерації, вони можуть в корозійному відношенні вважатися небезпечними. За хімічним складом, корозійно-активними є безвапнякові торф'янисті ґрунти і бідні вапном гумусові ґрунти, а також ґрунти, що містять мергель і сульфіди, також сланцеві ґрунти. В своїй більшості корозійно-активними є штучні ґрунти – подрібнені шлаки, сміття, а також ґрунти, забруднені сіллю, що використовується для боротьби з обледенінням, гербіцидами, добривами, стічними водами населених пунктів, сільськогосподарських і промислових підприємств. Вологість має значний вплив на корозійну активність ґрунтів [122, 138].

Вологість ґрунту [122, 138]. Наявність вологи робить ґрунт електролітом, спричиняючи електрохімічну корозію металів. Вода в ґрунті знаходиться у вигляді капілярної, зв'язаної і гравітаційної. Зв'язана вода не впливає на корозію. Висота підйому капілярної вологи залежить від ефективного радіусу пор у ґрунтах. Рівень ґрунтових вод та пористість ґрунту визначають вологість, яка впливає на швидкість корозії. Гравітаційна волога переміщується в ґрунті під дією сили тяжіння і впливає на режим вологості ґрунтів, ґрунти по різному утримують вологу. Важкі глинисті ґрунти утримують вологу протягом тривалого часу, піщані ґрунти – незначний часовий проміжок. Із збільшенням вологості ґрунту корозійна активність підвищується до межі, поки рівень вологості не досягне критичного рівня, далі із збільшенням вологості активність падає, дане явище пов'язується з зменшенням доступу кисню, необхідного для здійснення катодної реакції. Для кожного виду ґрунту існує власне значення критичної вологості, при якій корозійні втрати досягають максимальних величин, для глинистих ґрунтів критична вологість знаходиться у межах 12% - 25 %, для піщаних 10% - 20 %. У повітропроникних ґрунтах швидкість корозії сталі, особливо на початку, досягає максимуму при вмісті вологи 30%-50% вологості що відбувається внаслідок швидкої дифузії кисню в пористих ґрунтах ненасичених водою. Загальновідомо і експериментально підтверджено, при збільшенні вологості піску від 0% до 20 % швидкість дифузії кисню зменшується в 104 рази. У ґрунтах, які містять

більшу кількість води у порах, швидкість дифузії кисню знижується. У повітропроникних ґрунтах корозія зменшується з збільшенням рівня вологості до насичення, у мулистих ґрунтах, з вмістом глини 14%, мулу 68%, піску 18%, максимум втрат маси для вуглецевих сталей відповідає критичному вмісту води 31 %, причому після перевищення межі насичення ґрунту водою масові втрати різко знижуються. У глинисто-піщаних ґрунтах максимум швидкості корозії сталі спостерігається при вологості 25%-35%, при вологості 10% - 50 % корозія відносно мала. Для різних типів глин значення критичної вологості в межах 12%-35 %, для пісків 12%-20%, при цьому швидкість корозії в діапазоні від 5% до критичного значення змінюється для піску в 3 рази, глин в 10 разів. Таким чином, в повітропроникних зв'язаних ґрунтах швидкість корозії зменшується з збільшенням вологості до моменту насичення [121, 138].

Для кожного ґрунту існує власний визначений інтервал вологості, відповідаючий максимальній швидкості корозії. При малій зволоженості ґрунту мають місце значні омічні втрати, відповідно це утруднює електрохімічні процеси. Для більшості ґрунтів $pH = 6,0-7,5$, хоча зустрічаються лужні суглинки і солончаки з $pH = 7,5-9,5$, а також гумусові, кислі, та болотяні ґрунти з $pH = 3,0-6,0$. Вказані ґрунти відрізняються високою агресивністю. Мінералізація ґрунту змінюється в межах 10 міліграм/л - 300 міліграм/л, що позначається на швидкості корозії [122, 138].

Електропровідність ґрунтів. Збільшення кількості солей в ґрунтах полегшує протікання анодних процесів з причини депасивації анодних ділянок поверхні, а також катодних процесів, присутність у ґрунтах водорозчинних солей збільшує електропровідність. Максимальний вплив на корозійні процеси мають іони Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , ін.

Кислотність ґрунту коливається в межах pH 3-9. Внаслідок підвищення розчинності вторинних продуктів корозії, кислі ґрунти прискорюють корозію металів. За величиною pH розрізняють нейтральні (pH 6-8), кислі (pH 3-5) і лужні (pH 9-10) ґрунти.

Наявність мікроорганізмів. Мікроорганізми в ґрунтах можуть викликати суттєве місцеве прискорення корозії. Найбільшу небезпеку викликають анаеробні бактерії, які розвиваються в мулистих, глинистих і болотистих ґрунтах, сапропелях. Вказані бактерії в процесі життєдіяльності, аналогічно до бродіння, відновлюють у ґрунтах сульфати, споживаючи водень, що утворюється при катодному процесі, до сульфід-іонів виділенням кисню $\text{MgSO}_4 + 4\text{H} = \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2$ [11, 12, 121, 122]. Корозія металів, спричинена чи посилена дією мікроорганізмів, називається біологічною. Аеробні бактерії окислюють сірку, або викликають випадіння в осадок заліза. Перший вид бактерій оптимально розвивається при $\text{pH} = 3-6$, окислюючи сірку до сірчаної кислоти. При цьому на окремих ділянках концентрація сірчаної кислоти може бути 10%, що викликає різке збільшення швидкості корозії. Інший вид бактерій розвивається при $\text{pH}=4 \div 10$, поглинаючи залізо в іонному стані і виділяючи його у вигляді нерозчинних з'єднань, причому нерівномірне відкладення даних з'єднань призводить до збільшення гетерогенності поверхні, що є причиною підсилення корозії. Присутність в корозійному середовищі сульфідів і сірководню приводить до утворення на поверхнях виробів рихлих шарів сульфідів заліза, корозія має пітінговий характер. Кисень, який при цьому виділяється бере участь в катодній деполяризації корозійного процесу. Сульфід-іон є депасиватором, а також зв'язує іони заліза, утворюючи захисні плівки сульфїду - анодний процес полегшується. Температура ґрунту впливає дифузїю і кінетику електродних процесів, які визначають швидкість корозії. З збільшенням температури зростання швидкості корозії відбувається за експоненціальною залежністю.

Питомий електричний опір ґрунту є один з характерних показників корозійної активності ґрунтів по відношенню до сталі, функцією розглянутих властивостей ґрунту в комплексі. У визначених межах, згідно закону Ома, існує залежність: менший питомий електричний опір - більша швидкість корозії, яка дозволяє оцінити корозійну активність ґрунтів. Корозійна активність ґрунтів по відношенню до конструкційних сталей оцінюється:

- за величиною середньої катодної густини струму при зміщенні потенціалу катоду на 100 мВ у від'ємний бік від потенціалу корозії сталі;
- за питомим електричним опором ґрунту.

Вплив агресивних середовищ на довговічність машинобудівних сталей. В документах з експлуатації металоконструкцій [225, 226] відсутні обґрунтовані норми допустимих значень корозійних пошкоджень, зниження несучої здатності елементів конструкцій, що створює складнощі в обґрунтуванні нормативних термінів експлуатації, в оцінці граничного стану металоконструкцій, в плануванні капітальних витрат на виробництво і придбання матеріалів.

При розробці методів розрахунку залишкового ресурсу і міцності елементів конструкцій при корозійному і втомному руйнуваннях, виникає необхідність дослідження корозійної тріщиностійкості конструкційних сталей і зон зварних з'єднань, що використовуються в с/г машинобудуванні. У розділі приведено результати досліджень впливу експлуатаційних середовищ розкидачів добрив на корозійно-циклічну тріщиностійкість окремих базових для с/г машинобудування сталей [225, 226]. До таких матеріалів відносяться маловуглецеві і низьколеговані сталі Ст 3, Ст 5; сталі 10, 15, 20, 45, 5Гпс, ін. з яких виготовлюються несучі тонкостінні металоконструкції розкидачів. Основною характеристикою опору матеріалу корозійному руйнуванню є відома діаграма корозійного розтріскування, яка представляє собою залежність швидкості росту тріщини V від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I і характеризує статичну і циклічну тріщиностійкість металів в корозійних середовищах.

Розглянуто окремі результати досліджень і загальні закономірності корозійно - циклічної і корозійно - статичної тріщиностійкості матеріалів. Потенційна небезпека руйнування при дії корозійних середовищ суттєво змінюється в сторону збільшення при циклічних навантаженнях. Це зумовлено тим, що розвиток корозійно-втомної тріщини може відбуватись при рівні КІН нижчих від K_{ISCC} , досягнення якого є необхідною умовою для корозійно-

статичного росту тріщини на повітрі. У зв'язку з цим, сталі при вказаних умовах можуть характеризуватись підвищеною чутливістю до агресивної дії корозійних середовищ добрив при експлуатаційних нерегулярних циклічних навантаженнях [250].

Закономірності розвитку корозійно-втомних тріщин визначаються системою метал-середовище, також умовами навантаження R , частотою f , формою циклу навантаження, температурою випробувань, рівнем потенціалу зовнішньої поляризації E_n і т. д. Для системи конструкційна сталь – водневе середовище [251] зниження частоти навантаження прискорює розвиток тріщин в діапазоні збільшених значень КІН, в той час як в припороговій області спостерігається інверсія даного впливу і зростання тріщин сповільнюється. Фактор частоти навантаження, як правило, не впливає на кінетику руйнування високоміцних сталей на повітрі, проте проявляється при дії корозійно - агресивних середовищ. Зменшення f приводить до збільшення швидкості розвитку корозійно-втомних тріщин в низькоміцних сталях. Даний ефект максимальний в області середніх рівнів КІН [251], частотна залежність порогових значень КІН в корозійному середовищі має немонотонний характер з мінімумом ΔK_{thc} , що досягається при певній проміжній частоті. Важливим чинником трансформації кінетичних діаграм корозійно-втомного руйнування і утворення на них ділянок характерних для діаграм корозійного розтріскування є накладання катодної поляризації. Відповідно дослідженням [71] на кінетичній кривій втомного руйнування трубної сталі в умовах катодної поляризації появляється плато, в межах якого спостерігається сталість швидкості росту тріщини V . По мірі спадання частоти навантаження плато фіксується прибільш високих значеннях V , його довжина збільшується. Одна з особливостей визначення корозійно-циклічної тріщиностійкості матеріалів обумовлена специфікою електрохімічної ситуації в околі вершини тріщини, яка розвивається, що суттєво відрізняється від умов на поверхні випробовуваного зразка. Степінь цієї відмінності для системи метал – середовище залежить [23] від довжини тріщини, напружено-деформованого стану в її вершині, часу дії

середовища, потенціалу зовнішньої поляризації та інших чинників. У зв'язку з цим середовище може по різному впливати на формування зони передруйнування у вершині тріщини і тим самим, створювати різні впливи на процеси корозійно-втомного руйнування металу. З метою достовірного визначення необхідних характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалу в заданому корозійному середовищі авторами [23, 165-167] розроблена модель, згідно якої зона передруйнування матеріалу, деформованого у водному корозійному середовищі, характеризується трьома параметрами: максимальним значенням КІН в циклі K_{\max} ; значеннями показника середовища pH ; значеннями електродного потенціалу металу ϕ у вершині тріщини. Тоді швидкість зростання тріщини в металі при дії водного корозійного середовища визначається відомою функцією

$$V = f(C_i, K_{\max}, pH, \phi) \quad (4.1)$$

де C_i – стала, що характеризує циклічну тріщиностійкість матеріалу; i – кількість параметрів для заданої системи «матеріал-середовище».

В процесі розвитку корозійно-втомної тріщини, кожному значенню швидкості її росту на кінетичній діаграмі втомного руйнування повністю відповідають певні електрохімічні умови у вершині тріщини [23], залежні від початкового електрохімічного стану в момент старту початкової тріщини, а також від часу дії середовища і швидкості утворення нової поверхні. Тому основною і необхідною умовою для отримання однозначних даних про швидкість росту тріщини і корозійного середовища (інваріантних кінетичних діаграм втомного руйнування) є дотримання ідентичності електрохімічних умов у вершині тріщини по мірі її росту, тобто $pH = const$, $\phi = const$ [166, 167].

У реальній конструкції зміна параметрів pH і ϕ має вірогідний характер у зв'язку з можливим впливом випадкових експлуатаційних факторів, тому при розрахунках на довговічність виникає проблема вибору базової діаграми

втомного руйнування для необхідної системи «метал-середовище». Дана задача розв'язується шляхом побудови інваріантних діаграм, відповідним граничним електрохімічним станам у вершині корозійно-втомної тріщини.

Характер дії корозійного середовища на процес втомного руйнування визначається не тільки структурно-металургійним станом сталей і типом середовища, а також параметрами циклічного навантаження. Зокрема, склад середовища у вершині тріщини залежить від частоти і асиметрії навантаження, що у значній мірі обумовлює її активність, умов утворення свіжих поверхонь, а також доставки і накопичення компонентів середовища в зону передруйнування [224, 251, 253].

Вплив параметрів навантаження. Для більшості конструкційних металів, що знаходяться при експлуатації під сумісною дією циклічних навантажень і робочих середовищ, процес корозійно-втомного руйнування у залежності від конкретних умов навантаження, може відбуватися, як за механізмом корозійної втоми, так і корозійної втоми під напруженням [138]. Реалізація механізму росту корозійної тріщини визначатиметься комбінацією значень, контролюючи параметри - коефіцієнту асиметрії циклу R і частоти навантаження f . Зокрема, зменшення коефіцієнту асиметрії R , або збільшення частоти f призводить до придушення «скачка», тобто різкого прискорення росту тріщини. В результаті реалізується кінетична залежність, яка характерна для процесу корозійної втоми. Відповідно до експериментальних даних, отриманих при випробуваннях високоміцних сталей в широкому діапазоні значень частот і коефіцієнта асиметрії циклу для різних поєднань R і f , запропоновані [97, 251] вирази для визначення межі на кінетичній діаграмі корозійно - втомного руйнування між областями корозійної втоми і корозійної втоми під напруженням. Її місцерозміщення на діаграмі для досліджуваної системи метал-середовище визначається конкретними характеристичними значеннями частоти навантаження і коефіцієнту асиметрії циклу.

Згідно аналізу порогової тріщиностійкості ряду конструкційних сталей залежно від величини статичної розтягуючої складової [251], зростання R

обумовлює зниження ΔK_{th} при випробуваннях на повітрі, також в корозійному середовищі. При цьому послаблення ефекту закриття втомних тріщин вважається домінуючою причиною падіння припорогової циклічної тріщиностійкості матеріалів при підвищенні коефіцієнта асиметрії. У зв'язку з цим, при високих значеннях R та відсутності закриття тріщини, для конструкційних сталей зменшується структурна чутливість параметра ΔK_{th} . Так, якщо при $R = 0,05 \dots 0,1$, рівень ΔK_{th} змінюється від 3.5 до 7.5 $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$, то в діапазоні $R = 0,5 - 0,9$ порогові значення КІН знаходяться лише на рівні 2,5...3,5 $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$. Поріг корозійно-циклічної тріщиностійкості є більш структурно чутливим при високому коефіцієнті асиметрії навантаження, у випадку $R = 0,7 \dots 0,8$ величини ΔK_{thc} для досліджуваних машинобудівних сталей знаходяться в інтервалі 2 - 6 $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$.

З аналізу впливу коефіцієнта асиметрії на ΔK_{thc} двох алюмінієвих сплавів [21], випробовуваних при низькочастотному навантаженні у розчині морської води, зроблено інші висновки. В умовах навантаження при низькому коефіцієнті асиметрії водневе середовище діє негативно на тріщиностійкість обох сплавів. Разом з тим в області високих R порогові характеристики сплавів співпадають і не залежать від структури матеріалу і впливу корозійного середовища.

Чутливість вуглецевих сталей до дії середовищ помітно проявляється винятково у діапазоні наднизьких частот навантаження. Якщо при випробуваннях сталі 20Г на повітрі тип середовища не впливає на кінетику втомних тріщин (для визначення постійних рівнів ΔK), то оцінки тріщиностійкості в дистильованій воді в діапазоні частот 10...0.001 Гц виявили максимум прискорення, що зафіксовано при $f = 0,01 \text{ Гц}$ [255]. Для сталі типу 20ХН2МФА по мірі зниження частоти навантаження в дистильованій воді встановлено монотонний приріст коефіцієнта впливу середовища до рівня $f = 0,001 \text{ Гц}$ [32].

Кінетика корозійно-втомного руйнування в значній мірі залежить від форми циклу навантаження. Дослідженнями тріщиностійкості сталі 20ХН2МФА [32] встановлено, що ступінь прискорення середовищем росту тріщин в процесі навантаження за трикутним циклом ідентична з синусоїдальним циклом, хоча при навантаженні за прямокутним циклом інтенсифікації руйнування у всьому дослідженому діапазоні частот не має. Для сталі 20Г в умовах пульсуючого трапецеїдального циклу досліджено вплив статичних витримок при рівні КІН $K = K_{\max}$ [2]. Виявлено, що швидкість розвитку корозійно-втомних тріщин не залежить від тривалості витримок, не дивлячись на зміну частоти навантаження, а повністю контролюється тривалістю етапу активного навантаження.

Для розуміння феноменології докритичного росту тріщин велике значення мають оцінки кінетики втомного руйнування в залежності від фізико-хімічних чинників.

Вплив фізико-хімічних факторів. При дослідженні закономірностей росту корозійно-втомних тріщин, у залежності від типу середовища (підкислений розчин $NaCl$, повітря і силіконове масло) доведено, що поріг циклічної тріщиностійкості трьох нержавіючих сталей: аустенітної, аустенітно-феритної і мартенситної залежить від агресивності середовища і для кожної з сталей досягає максимального значення у присутності силіконового масла. У порівнянні з повітрям, в маслі рівень порогового КІН зростає, оскільки збільшується розмір пластичної зони і, відповідно, ступінь прояву ЗТ [25].

Для системи високоміцна сталь - дистильована вода виявлено, що обезкиснення води прискорює ріст тріщин при середніх значеннях ΔK , не роблячи впливу в низько - і високоамплітудних областях навантаження. Накладення зовнішньої катодної поляризації обумовило якісно аналогічний результат, хоча в хлоридному розчині прискорення розвитку тріщин також спостерігається при низьких КІН. Важливим чинником інтенсифікації руйнування є підвищення діапазону температур випробувань до 25...85 °С, особливо для високоамплітудної області. Ступінь прискореної дії температури

випробувань на ріст тріщин істотно залежить від частоти навантаження, досягає максимуму в середньому діапазоні досліджуваних частот ($f = 1 \text{ Гц}$).

За результатами випробувань високоміцних низько відпущених сталей в дистильованій воді, в низькоамплітудній області навантажень впливів температури випробувань в діапазоні $25...75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ не встановлено [122]. В той же час на середньоамплітудній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування з підвищенням температури виявлене прискорення розвитку тріщин. При цьому величина енергії активізації процесу корозійно-втомного руйнування залежить від рівня КН і частоти навантаження.

Вплив корозійних чинників на зародження тріщин. Корозійне середовище як вагомий фактор при втомі металів суттєво зменшує опір появі початкових тріщин. Окремі дослідники причину скорочення стадії зародження тріщини пояснюють електрохімічною гетерогенністю матеріалу в активних площинах ковзання, що призводить до утворення пітінгів (які можуть бути вихідними дефектами, також додатковими концентраторами напружень), інші вчені пов'язують пришвидшення зародження тріщин розміцненням захисних плівок на поверхнях металу, які утворюються у зв'язку із витримкою зразка в корозійному середовищі, проте вони піддаються руйнуванню за лініями інтенсивного ковзання. Виникає гальванопара з малою анодною ділянкою в зоні руйнування плівки і значною катодною, якою є суцільний оксидний шар на поверхні зразка. Таким чином, пришвидшується локальне розчинення металу за лініями ковзання, період зародження дефекту N_3 суттєво скорочується.

Вплив корозійного чинника на тріщиностійкість матеріалів. Розрізняють [163, 275, 279] три основних механізми впливу корозійного середовища на тріщиностійкість конструкційних матеріалів: адсорбційний спад міцності, водневе окрихчування, хімічне розчинення. Адсорбція поверхнево активних речовин на поверхні високо напруженого матеріалу у вершині тріщини призводить до зменшення поверхневої енергії і полегшує руйнування (ефект Ребіндера). Основним процесом, який прискорює докритичний ріст тріщини і спричиняє аварійні ситуації, є окрихчування малої області поблизу вершини

тріщини. Атомарний водень, який завжди присутній в чистому, або зв'язаному з нейтральними молекулами вигляді, в результаті дифузії здатний проникати в будь які метали. Розчинність водню при нормальних температурі і тиску складає від 10 до 100 см³ на 1 кг металу. Окрихчування спостерігається [163, 275] вже при концентрації в 2см³ на 1 кг металу, а з 10 см³ на 1 кг і стає небезпечним. Найбільш вразливим для проникнення водню є ділянки нової поверхні металу, не захищені окисною плівкою.

Основні типи кінетичних діаграм корозійно - втомного росту тріщин представлені в [163, 275] доводять, що корозійні середовища можуть суттєво змінювати конфігурацію діаграм, отриманих при аналогічних дослідженнях в інертних середовищах. Для сплавів, не схильних до корозійного розтріскування, кінетична діаграма має S-подібний вигляд. Зменшення частоти навантаження зсуває її в бік більших швидкостей росту [163, 275]. На діаграмах сплавів, схильних до корозійного розтріскування, при $K_{max}=K_{Isc}$ спостерігається прискорення швидкості росту тріщини, з подальшим виходом на горизонтальну ділянку [163, 275].

Сталі низької і середньої міцності при статичному навантаженні у слабо агресивних корозійних середовищах мало чутливі до корозійного розтріскування. Проте при циклічному навантаженні вплив середовища виражений сильніше і він, на відміну від випробувань на повітрі, залежить від частоти навантаження. Для сталі 20Г встановлено, що при випробуваннях в дистильованій воді для фіксованого значення КІН спостерігається максимум прискорення росту тріщини на середньоамплітудній ділянці КДВР при частоті навантаження 0,01 Гц [163]. Проте для інших сталей вплив середовища на ріст втомної тріщини може монотонно зростати із зменшенням частоти навантаження [32]. Той факт, що при зниженні частоти навантаження в області наднизьких частот швидкість росту тріщини повинна досягти насичення і перейти через максимум, можна передбачити, виходячи з відомих даних нечутливості вуглецевих сталей до корозійного розтріскування, оскільки в області низьких частот превалює фактор квазістатичної навантаженості. А

максимум впливу середовища на ріст втомної тріщини по відношенню до частоти залежить від конкретної системи метал-середовище і від умов навантаження – асиметрії, температури і т.д.

На корозійний ріст втомної тріщини на середньоамплітудній ділянці КДВР для низькоміцних сталей також впливає форма циклу навантаження. Наприклад, для сталі 20ХН2 встановлено, що характер зміни і кількісна оцінка впливу середовища для циклу трикутної форми та циклу з позитивним зубом співпадають з синусоїдальним циклом, тоді як навантаження за прямокутним циклом або циклом з від'ємним зубом не спричиняло прискорення росту втомної тріщини у всьому діапазоні частоти навантаження [32]. Випробування при умовах навантаження пульсуючим трапецеїдальним циклом із різною тривалістю витримки при максимальному навантаженні показало, що незважаючи на фактичну зміну частоти навантаження, швидкість росту втомної тріщини в сталі Х65 (аналог 20Г з мікролегуванням) не залежить від тривалості витримки при максимальному навантаженні, а цілком і повністю визначається тривалістю етапу активного навантаження [2].

На рис. 4.1 графічно зображено узагальнені дані кінетики корозійно-втомного руйнування сталей А533 (аналог 15Х2МФА) і А508 (аналог 15Х2НМФА) [290]. Максимальний вплив корозійного середовища на ріст втомної тріщини проявляється на середній та верхній ділянках КДВР при низькій частоті навантаження. За даними [3] чутливість даних сталей до дії корозійного середовища починає проявлятися при частоті 1 Гц і посилюється з її зниженням до 0,017 Гц. З подальшим зменшенням частоти вплив середовища незначно послаблюється. Швидкість росту втомної тріщини характеризується високою чутливістю до асиметрії циклу, відбувається збільшення з ростом асиметрії. Оцінки циклічної тріщиностійкості при низькій частоті і високій асиметрії, враховуючи умови експлуатації окремих механізмів технологічного обладнання аграрного виробництва, представляють особливий інтерес (рис. 4.2) і обов'язково проводяться при дослідженнях зон зварних швів з характерними високими залишковими напруженнями.

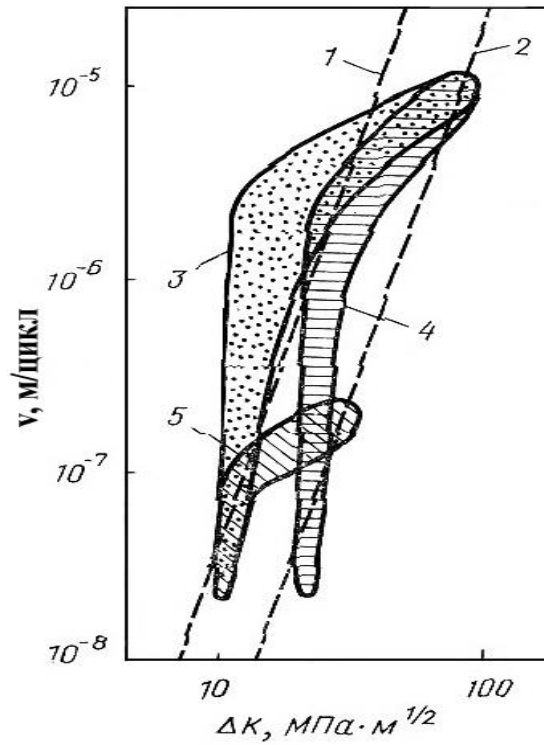


Рис. 4.1. Вплив параметрів навантаження на ріст тріщини в сталях А533 і А508:

1 – вода; 2 – повітря; 3 – 0,017 Гц, $R \geq 0,5$; 4 – 0,017 Гц, $R \leq 0,25$; 5 – 1 Гц, $R \geq 0,5$.

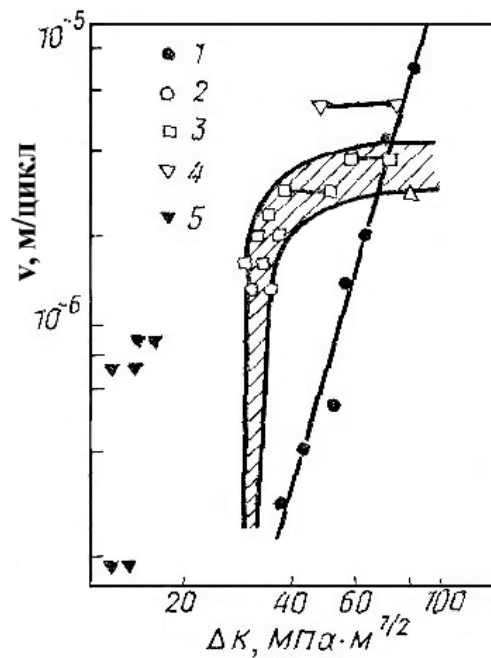


Рис. 4.2. Кінетика корозійно-втомного руйнування сталі А533-В при частоті 1 Гц: $R = 0,05$ (1), $0,16$ (2), $0,22$ (3), $0,25$ (4), $0,7$ (5).

При катодній поляризації на КДВР трубної сталі Х65 з'являється плато у межах якого швидкість росту втомної тріщини не залежить від КІН. З зменшенням частоти навантаження швидкість росту тріщини на плато збільшується [10, 36].

При контакті металічних матеріалів з розчинами, які проводять струм, проходить їхнє інтенсивне розчинення в результаті електрохімічної реакції (корозії). На відміну від хімічної корозії електрохімічна протікає більш інтенсивно і часто супроводжує наводнення металу. Це пов'язано з тим що, як правило, різнопотенціальна поверхня металу в контакті з електролітом представляє короткозамкнуту гальванічну комірку, в якій на аноді проходить реакція – розчинення металу з його подальшим окисленням, а на катоді – реакція відновлення. В даному розділі, в основному, розглядаються металічні сплави і кислі електроліти, з урахуванням водневих показників більшості робочих середовищ для розкидачів добрив, при контакті яких на катодній ділянці поверхні відбувається відновлення водню. Вказаний випадок є важливий тим, що поряд з хімічним руйнуванням металу при електрохімічній корозії відбувається наводнення металу, що спричиняє водневу крихкість і прискорене руйнування. Особливо явище проявляється при одночасній дії корозійно - активних середовищ і циклічних навантажень.

Як відомо [4, 6, 97, 212, 223, 275, 311], механізмами корозійно-втомного руйнування металічних тіл є процеси зародження та поширення втомних тріщин, які, в свою чергу, аналітично описуються функцією швидкості V втомної тріщини, яку можна представити [4, 6, 97, 212, 223, 275, 311] у вигляді (4.1), або розширено

$$V = \frac{dl}{dN} = f(\gamma, C_H) + mF^{-1}i_a(pH, \Pi_i) \quad (4.2)$$

де l – біжуча довжина тріщини; N – кількість циклів навантаження; γ – параметр, характеризуючий механічну ситуацію в зоні передруйнування біля

вершини тріщини, може дорівнювати: коефіцієнту інтенсивності напружень першого роду K_I , величині розкриття вершини тріщини δ , або величині деформації ε в зоні передруйнування; C_H – концентрація водню на поверхні вершини тріщини; m - грам-еквівалентна вага металу; F – число Фарадея; pH – водневий показник розчину електроліту біля поверхні вершини тріщини, Π_i – електродний потенціал на поверхні металу; i_a – густина струму корозії на поверхні металу.

Таким чином для дослідження корозійно-втомного руйнування елементу несучої металоконструкції розкидача добрив з тріщиною насамперед необхідно визначити параметри електрохімічної корозії металу в заданому розчині мінеральних і органічних добрив. В даному випадку, при дослідженнях електрохімічної корозії металів необхідно розглянути три основні задачі: 1) визначити локальні електричні поля в електроліті біля різнопотенціальних ділянок поверхні металу; 2) оцінити швидкості анодної реакції розчинення і катодної реакції відновлення (наводнення металу); 3) встановити кінетику приходу іонів водню з дальніх об'ємів електроліту до катодних ділянок поверхні металу.

Перша задача розглядалася багатьма вченими [7, 15, 74]. Недоліком є те, що у вказаних роботах недостатньо досліджені електричні поля для різних геометрій поверхні металу (особливо для тріщин) і зміни у часі.

В другій задачі недоліком досліджень [115, 130, 134, 136] є недостатньо повний розгляд процесів наводнення металу в результаті водневої деполяризації катоду.

Третя задача. Домінуючою задачею при оцінці довготривалої пошкодженості металу в результаті електрохімічної корозії є визначення кінетики приходу іонів водню до катодних ділянок поверхні металу. В літературі недостатньо досліджено процеси дифузії іонів дальнього і ближнього поля електроліту, особливо у тонких об'ємах (тріщинах), для такого випадку відповідні математичні моделі не розроблено.

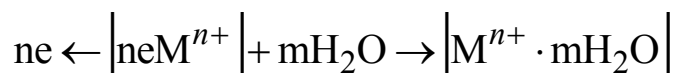
4.2. Окремі положення теорії електрохімічної корозії металів

При зануренні у електроліт металічного матеріалу, на поверхні, внаслідок гетерогенності, чи інших причин можуть виникнути коротко замкнуті гальванічні елементи, ділянки з більш електровід'ємним потенціалом стають анодами і розчиняються. Це пояснюється тим, що існує різниця потенціалів між різними структурними складовими сплавів, або домішками і основним металом. Окрім цього, різниця потенціалів деколи досить значна, що може бути наслідком різного стану окисної плівки, яка є на поверхні металу. При зануренні в електроліт, такі ділянки утворюють коротко замкнуті гальванічні елементи (мікроелементи). Теорія процесів, які при цьому виникають добре описана в літературних джерелах, наприклад [116, 279]. При зануренні металу в електроліт між ними проходить взаємодія, яка викликає різницю потенціалів на границі розділу метал-електроліт, це пояснюється тим, що водні розчини електроліту складаються з позитивно заряджених частинок (катіонів) і від'ємно заряджених (аніонів), які розміщуються в оболонці з води (гідратовані). Молекули води складаються із позитивних зарядів (H^+) і від'ємних (OH^-), розміщених в різних кінцях молекули. В свою чергу іони-атоми, які розташовані на поверхні металу притягуються диполями води і, якщо ці сили більші ніж сили зв'язку між іонами і електронами в металі, певна кількість іонів-атомів у вигляді гідратованих іонів переходить у розчин. Такі іони, внаслідок електростатичного притягання електронами металу, від його поверхні віддалитися не можуть. Утворений подвійний шар складається із електронів металу і гідратованих іонів розчину. Вказаний шар, який утворився на межі між металом і електролітом, визначає величину електродного потенціалу даного металу.

Величина скачка потенціалу на поверхні металу при його зануренні в електроліт, залежить не тільки від характеру подвійного шару, але і від процесів, які відбуваються на ньому. Потенціал, що виникає при зануренні

металу в електроліт, що не містить іонів даного металу, або в цьому електроліті не може встановитися рівновага переходу іонів металу в електроліт і навпаки, називається електродним потенціалом металу. Вплив складу електроліту на електродний потенціал металу дуже значний. Особливо це відчутно у випадку утворення на поверхні металу плівок з нерозчинних окислів.

Гальванічні елементи можуть виникати на поверхні забруднених металів, або, коли різниця потенціалу на поверхні металу викликана неоднорідністю структури, різною чистотою чи твердістю поверхні, наявністю плівок. В результаті різниці потенціалів виникає електричний струм і на поверхні металу відбувається електрохімічна корозія. Процеси на поверхні кородуючого в електроліті металу можна записати на основі [116, 279]. На анодних ділянках, потенціал яких електровід'ємний, відбувається розчинення металу, що аналітично описується відомою залежністю



де n – валентність металу; e – заряд електрону; $[neM^{n+}]$ – іон-атом на поверхні аноду; $[M^{n+} \cdot mH_2O]$ – гідратований іон в розчині. Вивільнені електрони перетікають від аноду до катоду $ne_A \rightarrow ne_K$.

На поверхні катоду електрони асимілюються певним відновлювачем. Якщо даного процесу немає, то потенціал катоду змінюється, зміщаючись у від'ємному напрямку, наближаючись за своїм значенням до потенціалу аноду. Таку зміну потенціалу внаслідок протікання струму називають поляризацією. Асиміляція електронів на катоді зменшує зміщення потенціалу катоду – його поляризацію. Цей процес називається деполяризацією.

Найбільш поширеними катодними реакціями є реакція відновлення іонів водню, яка супроводжується його виділенням в газоподібному стані $2H^+ + 2e \rightarrow 2H \rightarrow H_2$, і іонізація кисню, що супроводжується його поглинанням і утворенням іонів гідроксиду $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH$.

Виділення на катоді газоподібного водню є наслідком наступних процесів: переміщення гідратованих іонів водню H^+mH_2O до катоду, їх дегідратація $H^+mH_2O \rightarrow H^+ + mH_2O$, розрядження іона водню $H^+ + e \rightarrow H$, утворення молекул водню $H + H \rightarrow H_2$, віддалення водню від катоду внаслідок дифузії і відрив бульбашок водню.

В залежності від різних розчинів електроліту з різною кількістю іонів водню (рН) реакція іонізації кисню може проходити різними шляхами.

Слід відмітити, що реакція розрядження водню і іонізації кисню в присутності струмів відбувається при потенціалах значно зсунутих у від'ємному напрямку у порівнянні з потенціалами при відсутності струмів корозії. Тому потенціал виділення водню (φ'_{H_2}) значно відрізняється від потенціалу водню в даному розчині при відсутності струму (φ_{H_2}). Різниця вказаних величин ($\varphi'_{H_2} - \varphi_{H_2} = \eta$) називається перенапруженням виділення водню. Як показують дослідження у [53, 116, 279], величини перенапруження виділення водню залежать від матеріалу катоду і стану його поверхні. Чим більш шорстка поверхня тим перенапруження менше. З підвищенням температури перенапруження зменшується. Залежність перенапруження η від густини струму і визначається рівнянням Тафеля

$$\eta = a_1 + a_2 \lg i,$$

де a_1, a_2 - постійні.

Не дивлячись на те, що на поверхні металу є ділянки між якими протікає електричний струм різних потенціалів, в цілому вся система є електронейтральною. З даним явищем також пов'язано те, що корозія в електролітах складається з ряду спряжених між собою процесів, які не можуть протікати незалежно. Так, наприклад, анодний процес, тобто перехід металу в електроліт у вигляді іонів і нагромадження електронів в металі, довго тривати не може, так як на поверхні металу внаслідок взаємного притягання додатних іонів і електронів, утворюється подвійний електричний шар і процес

розчинення металу припиняється. Припиниться також вивільнення електронів, які переходять до катоду і розряд іонів водню, або утворення іонів гідроксилу. Тільки тоді, коли внаслідок зв'язування електронів на катодних ділянках порушиться подвійний шар, іони металу будуть переходити в розчин.

При проходженні струму потенціали анодних і катодних ділянок змінюються. Явище пов'язано з тим, що на аноді і катоді проходять відповідні реакції, які змінюють їх потенціали. Біля аноду збільшується концентрація іонів розчиненого металу, що призводить до утворення захисної плівки, яка екранує анод. Це викликає зсув потенціалу аноду. В свою чергу, в результаті недостатньо швидкого зв'язування електронів, що поступають з анодних ділянок, на катоді потенціал зміщується у від'ємну сторону. Даний процес називається поляризацією катоду. Таким чином, зсув потенціалу катоду у від'ємному напрямку залежить від можливості електронів розряджати іони водню. Внаслідок цього початкова різниця потенціалів коротко замкнутих гальванічних елементів значно відрізняється від різниці потенціалів, що встановилася через деякий проміжок часу дії елементів. На основі вище сказаного можна пояснити випадки корозії з виділенням водню. Для цього потрібно щоб потенціал на анодних ділянках був більш від'ємний від потенціалу виділення водню на катодних ділянках у даних умовах. Такий зв'язок між потенціалом аноду і катоду зрозумілий, так як при поляризації потенціал катоду зміщується у від'ємному напрямку.

Потенціал виділення водню $\varphi_{\text{H}_2}^*$ дорівнює сумі рівноважного потенціалу водню і величині перенапруження водню на мікрокатадах $\varphi_{\text{H}_2}^* = \varphi_{\text{H}_2} + \eta$.

Перенапруження виділення водню зміщує потенціал його виділення у від'ємному напрямку. Чим більш додатне значення рівноважного потенціалу водню, тим при менш від'ємному потенціалі проходить виділення водню на даному катоді. Звідси випливає, що чим більша концентрація іонів водню в розчині тим більш додатній потенціал розрядження іонів водню, більша різниця потенціалів і інтенсивніше виділяється водень. Отже, корозія при виділенні водню зустрічається переважно в кислих середовищах і тільки метали з дуже

електровід'ємним потенціалом можуть виділяти водень із нейтральних, або лужних розчинів.

Поряд з рекомбінацією водневих атомів може відбуватися водневе окрихчення металу, яке має важливе значення для інженерної практики і теорії процесів корозійних руйнувань. Воно пов'язане з реакцією дифузії атомарного водню в середину металу. Досить важливою величиною в цьому випадку є ступінь заповнення поверхні металу абсорбованим атомарним воднем C_{AH} (поверхнева концентрація). Ця величина визначається сумарною швидкістю виділення водню на поверхні металу і іншими поверхневими процесами на границі метал-електроліт.

Для встановлення кількісних величин, які стосуються швидкості виділення водню, прийнято наступні припущення. Нехай деаерований розчин містить надлишок сильного електроліту, іони якого не приймають участі в реакції. Далі, нехай розчин енергійно переміщується мішалкою, так що концентрація C_H^+ іонів гідроксонію $H_3O^+(H_2O)_x$ (з нього при контакті з електронами металу утворюється H_2) за винятком граничного шару Прандтля, тобто шару рідини, що прилягає безпосередньо до металу, всюди постійна. Окрім того, можна взяти такий об'єм металу, що за час тривалості досліду виділення водню не призведе до значного зменшення кількості іонів гідроксонію, і концентрація C_H^+ за межами пограничного шару буде залишатися постійною і рівною вихідній концентрації.

Згідно спрощеним представленням Нернста, розглядаємо пограничний шар як нерухомий, вільний від конвекції шар рідини товщиною d . В цьому випадку іони водню доставляються до поверхні металу тільки в результаті дифузії через пограничний шар, яка описується законом Фіка, тобто потік частинок пропорційний градієнту концентрації. У випадку металічного електроду з плоскою поверхнею, лінійні розміри якого великі в порівнянні з товщиною пограничного шару d , градієнт концентрації H^+ іонів буде відмінний від нуля тільки в напрямку, перпендикулярному до поверхні електрода. Якщо цей напрямок приймати за вісь Ox і ум прийняти, що зсув в додатну сторону

вздовж ОХ відповідає напрямку вглиб розчину, то потік іонів гідроксонію до поверхні металу буде пропорційний значенню градієнта dC_{H^+}/dx . Позначимо через S_0 величину поверхні металу, через D_{H^+} коефіцієнт дифузії H_3O^+ - іонів, Тоді число іонів гідроксонію, що дифундують за одиницю часу до поверхні металу (\dot{n}_{H^+})

$$\dot{n}_{H^+} = -S_0 D_{H^+} \frac{dC_{H^+}}{dx}, \quad (0 \leq x \leq d) \quad (4.3)$$

Величина D_{H^+} залежить від концентрації всіх розчинених речовин причому в середині пограничного шару постійна не завжди, однак припущення про постійність коефіцієнта дифузії, як загальновідомо, не викликає помилок. Можна припустити, що в стандартному стані величина dC_{H^+}/dx в середині пограничного шару на металі з плоскою поверхнею великих розмірів, незалежно від наявності крайових областей, всюди постійна, тобто

$$dC_{H^+}/dx = const, \quad (0 \leq x \leq d) \quad (4.4)$$

Прийняті спрощення призводять до введеного Нернстом допущення про лінійну зміну C_{H^+} в пограничному шарі від значень $(C_{H^+})_0$ для всіх значень $x \geq d$ до значення $(C_{H^+})_*$ при $x=0$. Таким чином, градієнт C_{H^+} в граничному шарі

$$\frac{dC_{H^+}}{dx} = \frac{(C_{H^+})_* - (C_{H^+})_0}{d} \quad (4.5)$$

Потім, в стаціонарному режимі швидкість дифузії \dot{n}_{H^+} дорівнює швидкості розряду H^+ - іону на електродній поверхні, а оскільки іони

одновалентні, також рівна швидкості цього перетворення. З врахуванням закону Фарадея

$$F\dot{n}_{\text{H}^+} = i_{\text{H}} \quad (4.6)$$

(F – стала Фарадея) отримуємо для густини струму i_{H} розряду H^+ – іонів (відповідно з виділенням молекули H_2) на поверхні металу вираз

$$i_{\text{H}} = FD_{\text{H}^+} \frac{(C_{\text{H}^+})_* - (C_{\text{H}^+})_o}{d} \quad (4.7)$$

Отже, густина струму i_{H} виділення водню від’ємна, так як $(C_{\text{H}^+})_* \leq (C_{\text{H}^+})_o$. Випадок $(C_{\text{H}^+})_* > (C_{\text{H}^+})_o$, для якого рівняння дає додатній струм, має місце при анодній іонізації молекулярного водню. Аналогічно, з (4.3) співвідношення (4.7) ще можна записати наступним чином [116, 279]

$$i_n = \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (4.8)$$

де φ - гальванічний потенціал; ε_1 – питома електропровідність електроліту.

Оскільки струм в електроліті є потоком іонів, то поле таких струмів буде описуватися рівняннями масопереносу, зокрема рівняннями Фіка. Співвідношення (4.3), (4.5), (4.7), (4.8) є певними аналогами I-го закону Фіка, а для опису розподілу концентрацій іонів, або величини потенціалу записується II-ий закон Фіка у вигляді [116]

$$\frac{\partial C_{\text{H}^+}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{H}} \frac{\partial C_{\text{H}^+}}{\partial x} \right) \quad (4.9)$$

або для розподілу потенціалу в електроліті

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\text{div}(\varepsilon_1 \text{grad} \varphi) \quad (4.10)$$

Співвідношення (4.10) справедливе для об'єму розчину електроліту, який не несе заряду. Якщо ε_1 є постійне в усьому електроліті і його параметри з часом мало змінюються, то (4.10) в даному випадку для квазістатичного випадку можна записати наступним чином

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi = 0, \quad (4.11)$$

де (x, y, z) – координати декартової системи координат, вибраної так, що початок O знаходиться на поверхні металу, а вісь OZ направлена в об'єм електроліту. Рівняння (4.11) є рівнянням Лапласа, розв'язок якого шукають в класі гармонійних функцій. При розв'язку рівняння (4.11) і знаходженню розподілу потенціалу φ і струмів i_n в електроліті для поверхні металу приймаються наступні положення [116]. Сума струмів i_n всіх n парціальних реакцій дорівнює нулю, тобто виконується умова електронейтральності.

Гальвано - потенціал в середині кожної з металічних фаз вважається постійним.

Розчин електроліту є однорідний, не несе заряду і має постійний опір $R_1 = \varepsilon^{-1}$.

На поверхнях ізоляторів нормальна складова $\partial \varphi / \partial n$ градієнта φ рівна нулю, тобто

$$\partial \varphi / \partial n = 0 \quad (4.12)$$

На поверхні електроду густина струму

$$\begin{aligned}
 \text{(ано́ду),} & \quad i_a = R_1^{-1} \partial\varphi/\partial n & (4.13) \\
 \text{(като́ду)} & \quad i_k = R_1^{-1} \partial\varphi/\partial n
 \end{aligned}$$

Сумарна густина струму i_c зв'язана з потенціалом електроду рівнянням сумарної поляризаційної кривої даного електроду. Якщо скористатися поняттям поляризації [116]

$$\pi\{i_c\} \equiv \Pi\{i_c\} - \Pi_k,$$

то дані рівняння можна записати у спрощеному вигляді

$$\begin{aligned}
 \Pi_A & \equiv (\Pi_A)_k + \pi_A\{i_c\}, \\
 \Pi_k & \equiv (\Pi_k)_k + \pi_k\{i_c\}
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

де Π_A – електродний потенціал аноду; Π_k – електродний потенціал като́ду; $(\Pi_A)_k$ – потенціал корозії (без струму) анодної частини поверхні металу; $(\Pi_k)_k$ – потенціал корозії (без струму) катодної частини поверхні металу. В спрощеному вигляді (4.14) запишуться

$$\begin{aligned}
 \Pi_A & \equiv (\Pi_A)_k + |\pi_A| i_c \\
 \Pi_k & \equiv (\Pi_k)_k + |\pi_k| i_c
 \end{aligned}
 \quad \text{або} \quad \frac{\partial\varphi}{\partial z} = \begin{cases} (\Pi_A)_k + |\pi_A| i_c; (x, y) \in S_A; \\ (\Pi_k)_k + |\pi_k| i_c; (x, y) \in S_k. \end{cases} \quad (4.15)$$

Отже, розв'язок задачі про розподіл струмів в електроліті біля поверхні металу описаний рівнянням (4.11) при граничних умовах (4.15).

Для випадку відсутності у металі напружень, при його контакті з електролітами, він покривається хімічно неактивними плівками, або, якщо іони металу проникають в розчин електроліту з ювенільної поверхні, утворений при

цьому продукт (гідроксид) повторно осідає на поверхню, що приводить до припинення подальшої електрохімічної реакції. Стійкість утвореної плівки залежить від наявності активного кисню, водневого показника розчину рН, електрохімічного потенціалу електроду (поверхні металу) і температури, причому захисна плівка може втратити стійкість при механічних навантаженнях. Розглянемо випадок металу з тріщиною, при циклічному розтягу симетрично відносно площини розміщення тріщини. При цьому вершина тріщини весь час пластично деформується з амплітудою деформацій розтягу ε і залишається без окисної плівки, яка руйнується. Вважаємо, що розчин електроліту кислий і на катоді (поверхні тріщини покриті окисною плівкою) відбувається відновлення водню, а на чистій поверхні вершини тріщини (аноді) – розчинення металу.

З аналізу експериментальних даних [212], електродний потенціал поверхні вершини тріщини можна наближено представити лінійною залежністю від ε . Тоді, на основі цього, а також результатів робіт [116, 279], електродні потенціали Π_A і Π_K , наближено, можна записати

$$\begin{aligned}\Pi_K &= (\Pi_K)_K - 0,059 pH, \\ \Pi_A &= (\Pi_A^{(o)})_K - A_o \varepsilon + \frac{R'T}{zF} \ln \frac{(Q_{Me})_{pівн}}{Q_{Me}}\end{aligned}$$

де $(\Pi_A^{(o)})$ - потенціал корозії (без струму) недеформованої поверхні вершини тріщини; A_o – константа, яка визначається з експерименту; R' - газова постійна; T – температура металу; F – число Фарадея; $(Q_{Me})_{pівн}$ - рівноважна степінь заповнення поверхні вершини тріщини атомами; Q_{Me} - степінь заповнення при заданій швидкості реакції. У більш спрощеному вигляді різницю потенціалів, яка визначає електрорушійну силу, можна записати у наступному вигляді

$$\Pi_K - \Pi_A = A_1 - 0,059 pH + A_o \varepsilon,$$

де A_1 – константа, яка визначається з результиуючого експерименту. Для макротріщини дане співвідношення

$$\Pi_K - \Pi_A = A_1 - 0,059 pH + A_o \varepsilon_{cf} K_I^2 K_{fc}^{-2} \quad (4.16)$$

де ε_{fc} - критична величина деформації при циклічному розтягу; K_{fc} - критичне значення коефіцієнта інтенсивності K_I при циклічному навантаженні.

Припустимо, що на поверхні металу в певний момент при механічному навантаженні утворюється ювенільна (чиста) поверхня S_o . Вважається, що вона контактує з розчином електроліту. Проте, ця поверхня не відразу репасивує, оскільки необхідний час для того, щоб метал вступив у взаємодію з молекулами води або аніонами розчину, щоб його концентрація перевищила концентрацію розчинності і відбулося осідання у вигляді нерозчинної плівки. На протязі цього часу, у зв'язку з розчиненням металу, потік електронів проходить через метал до катоду. При цьому кількість розчиненого металу M на аноді пропорційна кількості електрики Q , що пройшла через анод (закон Фарадея), тобто пропорційна силі струму i_a і часу t

$$M = mQF^{-1}; \quad Q = S_o \int_0^t i_a dt \quad (4.17)$$

де F - число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; i_a - густина анодного струму на поверхні S_o .

Тоді швидкість V_a розчинення анодної поверхні можна визначити

$$V_a = mF^{-1}i_a \quad (4.18)$$

Вважаємо, що в результаті взаємодії іонів металу з розчином електроліту поверхня аноду S_o рівномірно заповнюється гідроксидами. Можна припустити,

що швидкість падіння анодного струму буде пропорційна швидкості заповнення поверхні S_0 оксидами, тобто

$$\frac{di_a}{dt} = -\xi m F^{-1} i_a \quad (4.19)$$

де ξ - коефіцієнт пропорційності.

Інтегруючи (4.19) одержуємо зміну анодного струму протягом часу t

$$i_a = i_{a \max} \exp[-\xi m t / F], \quad (4.20)$$

де $i_{a \max}$ – значення анодного струму i_a в початковий момент, коли поверхня S_0 ще чиста.

Згідно закону Ома, сила струму

$$i_a = E R_0^{-1} \quad (4.21)$$

де E – електрорушійна сила; R_0 – омичний опір. При відсутності струму

$$E = \Pi_k - \Pi_A \quad (4.22)$$

де Π_k , Π_A – потенціали відповідно аноду і катоду при відсутності струму.

З початком руху струму внаслідок припливу до аноду і катоду відповідних іонів розпочинається зміна Π_k , Π_A . Відповідно змінюється концентрація іонів біля ділянок поверхні металу, що відповідають аноду і катоду, а також концентрація гідроксидів, що утворюються при взаємодії іонів металу з розчином електроліту. Внаслідок цього і змінюється омичний опір R_1 .

Припускаємо, логічно, що зміна омичного опору R_1 буде пропорційна об'єму гідроксидів біля поверхні металу, тобто

$$R_1 = R_o + k_1 M/S_a \quad (4.23)$$

де S_a – площа аноду; k_1 – коефіцієнт пропорційності, який знаходиться експериментально для кожної пари метал-електролітичний розчин.

На основі (4.17) і (4.20), співвідношення (4.23) запишеться наступним чином

$$R_1(t) = R_o + k_1 i_{amax} (1 - e^{-\xi mt/F}) \quad (4.24)$$

Вважаємо, що продукти електрохімічної реакції змінюють тільки омичний опір $R_1(t)$, а потенціали аноду і катоду не змінюються. Тоді, використовуючи співвідношення (4.22) і (4.24), рівність (4.21) набуде вигляду

$$i_a(t) = \frac{\Pi_k - \Pi_A}{R_o + k_1 i_{amax} [1 - \exp(-\xi mt F^{-1})]} (i_a = i_k). \quad (4.25)$$

Слід відмітити, що в [3, 116] також була запропонована аналітична залежність визначення сили струму i_a від різниці потенціалів $\Pi_k - \Pi_A$ омичного опору і поляризації електродів

$$i_a = \frac{\Pi_k - \Pi_A}{R_o + |\pi_A| + |\pi_k|} \quad (4.26)$$

Співвідношення (4.25) і (4.26) за структурою однакові, хоча отримані з різних міркувань. Співвідношення (4.25) отримане з припущення незмінності електродних потенціалів Π_k і Π_A і змінності омичного опору $R_1(t)$ в результаті

електродних реакцій, а рівність (4.26) встановлена в [3, 116] на основі припущення про незмінність $R_1(t) = \text{const}$ і поляризацію електродів анода і катода внаслідок наближення і розрядки на них іонів з розчину електроліту. Аналіз і співставлення (4.25) і (4.26) показує, що згадані вище гіпотези є поясненнями ми одного і того ж процесу з різних позицій і тому результат якісно отриманий однаковий.

4.3. Розрахункова модель визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій в агресивних середовищах при довготривалому статичному навантаженні

На основі енергетичного підходу розроблена і запропонована теорія опису сповільненого руйнування металевих матеріалів в умовах дії механічних навантажень і водневовмісних корозійно - агресивних середовищ. В основу нього покладено розрахункову модель, суть якої полягає в наступному.

Моделювання корозійних процесів біля вершини тріщини. Розглянемо випадок розтягу металевої пластини з тріщиною довжиною l (рис. 4.3) довготривалими зовнішніми зусиллями p .

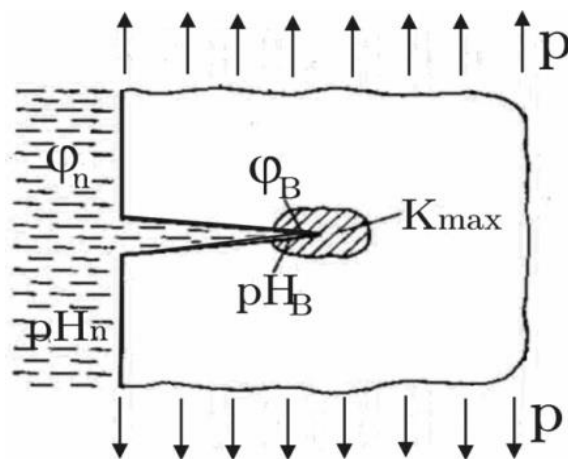


Рис. 4.3. Схематизація навантаженості тіла з тріщиною під дією корозійного середовища

Приймаємо, що напруження в пластині яка знаходиться в корозійно-активному середовищі з параметрами pH_n, ϕ_n , що проникає в середину тріщини і створює біля її вершини власні параметри pH_B, ϕ_B , симетричні відносно лінії поширення тріщини, причому механічна ситуація характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{\max} [249] (рис.4.3).

Розвиток тріщини у корозійно-активному середовищі під напруженням відбувається в умовах періодичної появи біля її вершини свіжо утвореної поверхні (СУП), вільної від пасивувального шару і активованої напруженнями [116, 134, 249]. Виникнення такої поверхні є початком функціонування гальванопари СУП (анод) – поверхня стінок тріщини (катод) вкрита пасивувальним шаром. У той же час вихідна гетерогенність свіжої поверхні й ініційоване нею утворення острівців пасивувального шару призводять до нерівномірного розподілу потенціалу, а отже, перебігу анодних і катодних реакцій у межах СУП. В умовах електрохімічної корозії водень проникає в метал під час катодного процесу [3, 116]. Оскільки дифузія водню із значних віддалей достатньо повільна, то зона передруйнування наводнюється, в основному, через поверхню локальних катодних зон.

Кінетика наводнення металу в зоні передруйнування залежить [15, 74, 115, 116, 130, 134] від параметрів напружено-деформованого стану в околі вершини тріщини та величини нестационарного потоку водню $J(t)$ з поверхні розділу метал – середовище в метал. Зміна $J(t)$ обумовлена електрохімічними процесами біля вершини тріщини. Отже, очевидною є необхідність побудови електрохімічної моделі процесу корозії у тріщині під напруженням, яка дозволила б визначити нестационарний потік водню в метал, як функцію параметрів: концентрації іонів у електроліті, навантаження, стандартного електродного потенціалу металу.

В процесі пасивації різних систем метал – середовище на металі можливе утворення або щільної плівки з високими корозійно - захисними властивостями, або високодисперсної колоїдної суміші гідратів, або пористої

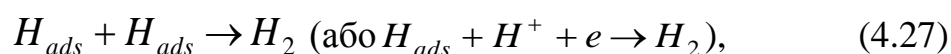
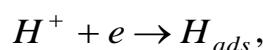
плівки, яка лише уповільнює корозію. Локалізація катодних і анодних зон у кожному вказаному випадку буде іншою [107]. Отже, для визначення кінетики наводнення зони передруйнування необхідно враховувати тип пасивувального шару і закономірності його утворення, чого не відтворюють існуючі моделі [49]. Вони також не враховують експериментальних даних [43, 49], які свідчать, що електрохімічні реакції між вершиною тріщини і її берегами протікають переважно на відстанях, спів розмірних з величиною розкриття у вершині тріщини.

Враховуючи вказані недоліки, пропонується побудова моделі, без вказаних вище недоліків, електрохімічних процесів у вершині навантаженої тріщини для системи метал-середовище, при взаємодії яких утворюється плівка з корозійно-захисними властивостями.

В основу моделі покладено наступне. Анодний процес відбувається виключно в межах СУП. Конкуруючими анодними реакціями є розчинення металу і виникнення пасивувальної плівки (ПП). Гетерогенність ініціює утворення в сприятливих місцях ізольованих острівців плівки і зростання їхньої ширини і товщини [49].

У момент виникнення свіжої поверхні катодний процес локалізується на прилеглий до СУП ділянці стінок тріщини, площа якої сумірна з СУП.

Надалі, в міру пасивації СУП, острівці ПП стають локальними катодними зонами. Катодний процес складається з послідовних реакцій [43, 49]



Реакція (4.27), що призводить до утворення пухирців газоподібного водню, конкурує з реакцією (4.27) переходу водню з адсорбованого H_{ads} на поверхні в абсорбований H_{ads} стан (рис. 4.4) [49].

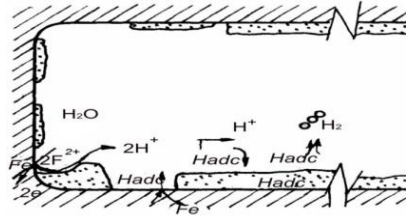


Рис. 4.4. Типова схематизація електрохімічних процесів біля вершини тріщини

Останнє явище обумовлює на поверхні металу концентрацію водню $C_0(t)$, яка в першому наближенні визначається як [76]

$$C_0(t) = B\sqrt[4]{it}, \quad (4.29)$$

де B - константа системи метал-середовище, яка визначається експериментально; i - густина катодного струму на острівцях ПП.

Як відомо [74, 130], що корозійна тріщина за відносно великі проміжки часу t_* поширюється стрибками малої довжини x_* , то можна вважати, що співвідношення (4.29) визначає максимальне значення концентрації водню в зоні передруйнування біля вершини корозійної тріщини. При цьому вважається, що переважаючим катодним процесом в околі СУП є воднева деполяризація, параметри якої повністю визначаються відомими [3, 43, 49, 75, 76, 107, 116] експериментальними даними. Використовуючи вище приведені результати, співвідношення (4.29) запишеться

$$C_0(t) = B\{i_{\max} [1 + k_1 R_0^{-1} i_{\max} (1 - \exp(-\xi m t F^{-1}))]^{-1}\}^{0,25}. \quad (4.30)$$

де F - число Фарадея; m - грам-еквівалентна вага металу; $i_{a \max}$ - значення анодного струму i_a в початковий момент, коли поверхня вершини тріщини ще

чиста; R_0 – омичний опір середовища; k_1, ξ – сталі, які залежать від pH середовища і визначаються експериментально [75].

Формулювання розрахункової моделі для випадку наскрізної тріщини.

Розглянемо пластину з прямолінійною тріщиною довжини $2l_0$ (рис. 4.5), яка знаходиться під дією симетричного відносно лінії розміщення тріщини довготривалого статичного рівномірно розподіленого навантаження P що викликає напруження σ і корозійно-агресивного середовища, які спричиняють поширення корозійно-механічної тріщини.

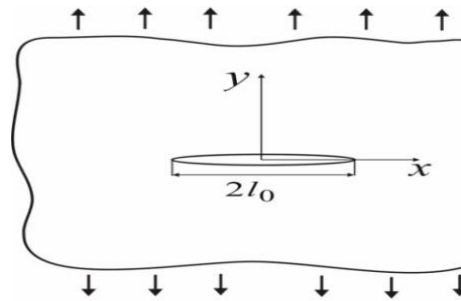


Рис. 4.5. Схема навантаження пластины з тріщиною

Задача полягає у визначенні залишкової довговічності такої пластины з врахуванням змін навантажень, тобто часу $t = t_*$, коли в результаті механічних навантажень і агресивного середовища корозійно-механічна тріщина виросте до критичного розміру l_* і пластина зруйнується.

Для розв'язку цієї задачі використано запропонований в [47, 48] енергетичний підхід, в основу якого покладений перший закон термодинаміки для випадку елементарного просування тріщини на величину Δl_c

$$A = W + \Gamma + Q + K \quad (4.31)$$

де A – робота зовнішніх сил; W – енергія деформування тіла після просування тріщини на величину Δl_c за час Δt , яку представимо в такому вигляді

$$W = W_s + W_p^{(1)}(l), \quad (4.32)$$

де W_s – пружна складова W ; $W_p^{(1)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій, що викликані рівномірно розподіленими напруженнями σ і залежить тільки від довжини тріщини l ; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить від довжини тріщини l , характеристик середовища і часу t ; Q – величина виділеної теплової енергії при руйнуванні тіла, яка вважається відносно малою величиною і нею нехтується при обчисленнях; K – кінетична енергія, яка для даного випадку також є малою величиною.

Так як виконується умова балансу енергії (4.31), умова балансу швидкостей зміни складових енергій також буде виконуватися

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t}. \quad (4.33)$$

Підставляючи (4.32) в (4.33), вказана умова запишеться у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right] \frac{dl}{dt} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t} = 0. \quad (4.34)$$

З (4.34) знаходиться величина швидкості поширення тріщини $V = dl/dt$

$$\frac{dl}{dt} = - \frac{\partial \Gamma}{\partial t} / \frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right]. \quad (4.35)$$

На основі результатів праць [48, 163] вираз в квадратних дужках в правій частині рівняння (4.35) запишеться

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right] = \gamma_c - \gamma_t, \quad (4.36)$$

де $\gamma_t = \delta_t \sigma_0$ – питома робота пластичних деформацій в зоні передруйнування біля вершини тріщини; $\gamma_c = \delta_{CC} \sigma_0$ – її критичне значення.

Шукана невідома величина енергії руйнування тіла Γ в (4.36) визначається аналогічно до результатів праць [43, 47, 48]

$$\Gamma = \Delta l_c \sigma_0 \delta_{CC}, \quad (4.37)$$

де α_0 – втомна характеристика матеріалу, визначається експериментально; δ_t – розкриття вершини тріщини при навантаженні F ; δ_{CC} – критичне значення розкриття тріщини при корозійному руйнуванні; δ_{scc} – нижнє порогове значення δ_t при якому тріщина не поширюється при корозійно-механічному навантаженні; σ_0 – середнє значення напружень в зоні передруйнування.

На основі результатів [43, 292], довжину елементарного стрибка Δl_c тріщини представимо як суму елементарного поширення тріщини l_a за рахунок анодного розчинення і механічного стрибка l_m як наслідку механічного навантаження і наводнення при електрохімічній корозії, тобто

$$\Delta l_c = l_a + l_m. \quad (4.38)$$

Використовуючи результати [43, 105], величини Δl_c , l_a , δ_{CC} , які є складовими (4.37) і (4.38), визначаються

$$l_m = \beta(\delta_t - \xi), \quad l_a = Fm^{-1}n^{-1} \int_0^{\Delta t} i(t)dt, \quad \delta_{CC} = \delta_c - AC_H(\Delta t). \quad (4.39)$$

де F - число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – валентність металу; ξ, β, A - константи, які визначаються експериментально [43].

Поширення корозійно-механічної тріщини при незначному впливі анодного процесу. Приймається, що корозійно-механічна тріщина поширюється з відносно великою швидкістю, відповідно вплив анодного процесу несуттєвий, домінуючу роль має механічно-воднева складова стрибка тріщини, тобто $l_m \gg l_a$. Тоді підставляючи (4.36)-(4.39) в (4.35) з врахуванням відомих результатів [43, 47, 48], отримаємо рівняння для визначення періоду докритичного росту тріщини $t = t_*$ в пластині при дії довготривалих зусиль F і корозійного середовища

$$\frac{dl}{dt} = - \frac{[\partial(\delta_{CC} l_m) / \partial t]_{t=\Delta t}}{\sigma_0 (\delta_{CC} - \delta_t)}. \quad (4.40)$$

Для повноти математичної моделі до (4.40) додамо, відповідно, наступні початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad (4.41)$$

$$t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad (4.42)$$

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_C. \quad (4.43)$$

На основі (4.38), (4.39) співвідношення (4.37) запишеться

$$\Gamma(t) = \sigma_0 [\delta_C - AC_H(t)] [\beta(\delta_t - \xi) + Fm^{-1}n^{-1} \int_0^t i(t) dt] . \quad (4.44)$$

Використовуючи результати роботи [43], зміну концентрації водню $C_H(t)$ в часі t в зоні передруйнування для невеликих проміжків часу можна на основі (4.29) представити наступним чином

$$C_H(\Delta t) \approx B \sqrt{\Delta t i_{\max}} . \quad (4.45)$$

Тоді, враховуючи (4.44), (4.45), похідна з рівняння (4.40), набуде вигляду

$$\partial(\delta_{cc}\Delta l_c)/\partial t \approx -\eta\sigma_0(\delta_t - \xi). \quad (4.46)$$

де $\eta = 0,25\beta AB^4 \sqrt{(\Delta t)^{-3} i_{\max}}$. Час Δt підготовки елементарного стрибка тріщини довжиною Δl_c можна виразити через швидкість її поширення V

$$\Delta t \approx V^{-1} \Delta l_c. \quad (4.47)$$

Вважаючи, що $\delta_c \gg AC_H(t)$ і позначаючи $\xi = \delta_{scc}$, на основі (4.38), (4.39), (4.46) і (4.47) рівняння (4.40) запишеться

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1(\delta_t - \delta_{scc})}{(\delta_c - \delta_t)^4}, \quad \eta_1 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot i_{\max} (\beta AB)^4. \quad (4.48)$$

Отже, з рівняння (4.48), при $\delta_t = \delta_{scc}$ швидкість корозійно-механічної тріщини дорівнює нулю, а при $\delta_t < \delta_{scc}$ від'ємна, що доводить, при $\delta_t < \delta_{scc}$ тріщина не буде поширюватися, тобто δ_{scc} є нижнім пороговим значенням на кінетичній діаграмі поширення корозійно-механічної тріщини [249].

Розглянемо випадок макроскопічної тріщини, коли справедливі співвідношення [42]

$$\frac{\delta_t(l)}{\delta_{cc}} = \frac{K_I^2(l)}{K_{IC}^2}, \quad \delta_{scc} = \frac{K_{scc}^2}{\sigma_0 E}, \quad \delta_t(l) = \frac{K_I^2(l)}{\sigma_0 E}. \quad (4.49)$$

Підставляючи (4.49) в (4.48)

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1 [K_I^2(l) - K_{scc}^2]}{[K_{IC}^2 - K_I^2(l)]^4}. \quad (4.50)$$

де K_I - коефіцієнт інтенсивності напружень; K_{IC}, K_{scc} - відповідно верхнє і нижнє порогові значення КІН на кінетичній діаграмі поширення корозійно - механічної тріщини.

Для повноти математичної моделі до (4.50) на основі (4.41)-(4.43) і (4.49) додамо наступні початкову і кінцеву умови

$$\begin{aligned} t = 0, \quad l(0) = l_0; \\ t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \end{aligned} \quad (4.51)$$

Таким чином, при експериментально визначених K_{IC} , K_{sc} , η , також побудованих аналітичних залежностях для визначення K_I , розв'язок поставленої задачі запишеться співвідношеннями (4.49)-(4.51).

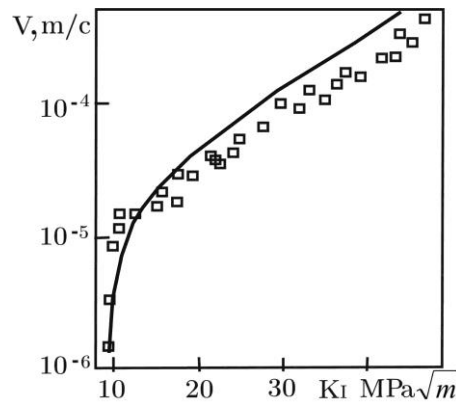


Рис. 4.6. Порівняння експериментальних і розрахункових даних для сталі

45XN2MFA: лінія – за формулою (4.50) при $K_{sc} = 9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$,
 $\eta = 1,1 \cdot 10^6 (\text{МПа})^2 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $K_{IC} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; \square – експериментальні дані [251, 252].

Достовірність отриманого виразу перевірено за експериментальними даними (рис. 4.6) [251, 252] для сталі 45XN2MFA (випробування в дистильованій воді). З рис. 4.6, експериментальні дані (\square) незначно відхиляються від суцільної лінії, апроксимованої за (4.50), що підтверджує коректність розробленої розрахункової моделі (4.50), (4.51).

Поширення корозійно-механічної тріщини з малою швидкістю.
 Розглянемо випадок великої активності анодних процесів, має місце залежність $l_a \geq l_m$. Тоді поширення корозійно-механічної тріщини буде, в основному, відбуватись з однаковою швидкістю, а кінетична діаграма швидкості росту

тріщини (ШРТ) матиме плато [97, 212, 249, 311] (рис. 4.7 [252]). Це пояснюється тим [249], що в результаті тривалих проміжків часу Δt інкубаційного періоду підготовки елементарного стрибка тріщини відбувається роз'їдання і затуплення її вершини з ростом K_I , зменшення концентрації напружень і, відповідно, стабілізація швидкості V . При даних діаграмах ШРТ наближена, з похибкою на збільшення запасу довговічності.

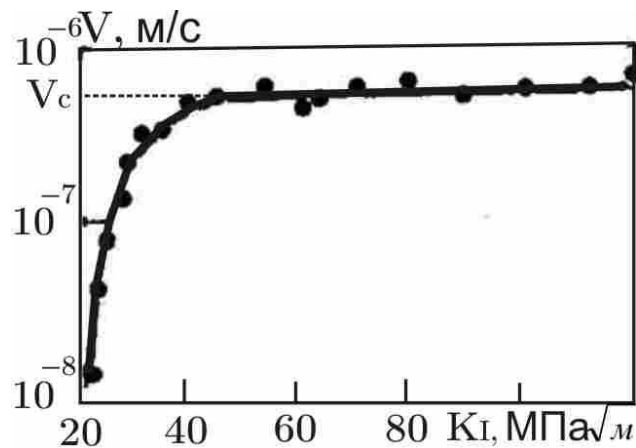


Рис. 4.7. Кінетична діаграма ШРТ сталі 45XN2MФА в водному розчині CrO_4^{-2}

Отже, корозійно-механічна тріщина постійно рухається з однаковою швидкістю V_c , при цьому залишкова довговічність тонкостінного елемента конструкції $t = t_*$ буде визначатися формулою

$$t_* = V_c^{-1}(l_* - l_0). \quad (4.52)$$

Кінетика поширення корозійно-механічної тріщини у пластині значних розмірів у порівнянні з розмірами тріщини. Розглянемо квадратну пластину з стороною a , з початковою тріщиною довжиною l_0 , при дії корозійного середовища яка розтягується постійними рівномірно розподіленими довготривалими статичними зусиллями інтенсивності σ , направленими перпендикулярно до лінії поширення тріщини (рис. 4.5). Задача полягає у

визначенні часу $t = t_*$, по досягненню якого тріщина виросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Для спрощення розв'язку задачі вважається, що розміри пластини набагато більші від розміру тріщини, тобто $a \gg l$. В даному випадку задача буде аналогом задачі Гріффітса для випадку поширення корозійно-механічної тріщини в пластині, з цієї причини коефіцієнт інтенсивності напружень K_I знаходиться за відомою залежністю

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l}. \quad (4.53)$$

Підставляючи (4.53) в (4.50), при визначенні періоду докритичного росту тріщини $t = t_*$ для даного випадку отримується математична модель

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1 [\pi l \sigma^2 - K_{scc}^2]}{[K_{IC}^2 - \pi l \sigma^2]^4}, \quad (4.54)$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0;$$

$$t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (4.55)$$

Інтегруючи (4.54) при умовах (4.55), одержується

$$t_* = \eta^{-1} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[K_{IC}^2 - \pi l \sigma^2]^4}{\pi l \sigma^2 - K_{scc}^2} dl, \quad (4.56)$$

де величина l_* визначається з (4.52) і (4.55) наступним чином

$$l_* = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma^2}. \quad (4.57)$$

Для пластини з сталі 45ХН2МФА, для якої $K_{sc} = 9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$,
 $\eta = 1,1 \cdot 10^6 (\text{МПа})^2 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $K_{IC} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $l_* = 0,055 \text{ м}$, $\sigma = 120 \text{ МПа}$ (4.58)

Використовуючи вказані дані, співвідношення (4.56) запишеться

$$t_* = 353 \cdot 10^4 \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{[1-\varepsilon]^4}{\varepsilon - 33 \cdot 10^{-3}} d\varepsilon \quad (\varepsilon_0 = l_0 l_*^{-1}) \quad (4.59)$$

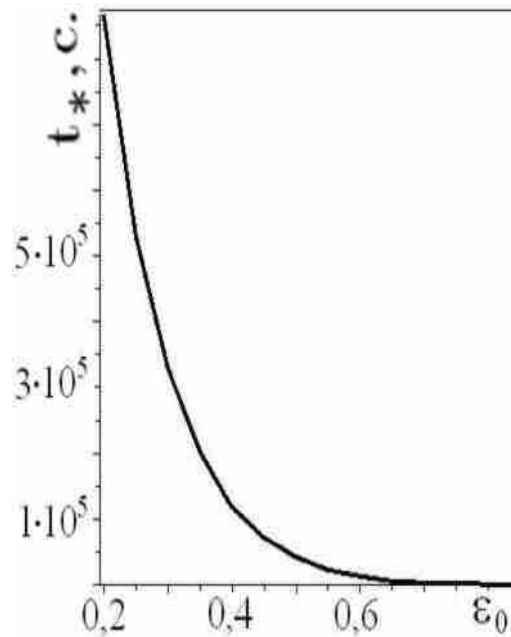


Рис. 4.8. Залежність залишкової довговічності пластини t_* від початкової довжини тріщини ε_0 .

На основі (4.59) побудована графічна залежність залишкового ресурсу пластини $t = t_*$ від безрозмірного значення початкового розміру тріщини ε (рис. 4.8) Як видно з рис. 4.8, збільшення початкового розміру тріщини у корозійно – агресивних середовищах при досліджених навантаженнях різко зменшує залишкову довговічність пластини.

4.4. Визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій при дії циклічних навантажень і корозійно - агресивних середовищ

Побудова розрахункової моделі. Розглядується випадок послаблення пластини в агресивному середовищі початковою прямолінійною тріщиною довжиною $2l_0$, яка розтягується циклічними рівномірно розподіленими зусиллями, які діють перпендикулярно до лінії росту тріщини. Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження пластини $N = N_*$, по досягненню якої корозійно-втомна тріщина виросте до критичної величини $l = l_*$, пластини зруйнується.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно побудувати розрахункову модель визначення кінетики поширення корозійно-втомної тріщини. Для оптимізації розв'язку задачі вважається, що напружено-деформований стан в пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщини. Аналогічно, застосовуємо енергетичний підхід для побудови кінетичного рівняння поширення корозійно-втомної тріщини, в основу якого покладено перший закон термодинаміки [47, 48] (див. (4.31)) для випадку елементарного просування корозійно-втомної тріщини на величину Δl_c , що визначається співвідношеннями (4.38), (4.39). На відміну від попереднього, величина W енергії деформування тіла після просування тріщини на величину Δl_c запишеться у вигляді

$$W = W_s + W_p^{(1)}(l) + W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t), \quad (4.60)$$

де W_s – пружна складова W ; $W_p^{(1)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій в зоні передруйнування, що залежить винятково від довжини тріщини l ; $W_p^{(2)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій від зовнішніх зусиль, яка виділяється при постійній довжині тріщини під час інкубаційного

періоду підготовки її скачка Δl_c і залежить винятково від часу t (або кількості циклів навантаження $N = tT^{-1}$, T - період циклу); $W_p^{(3)}(t)$ - робота пластичних деформацій під час розвантаження тіла і стиску зони передруйнування, яка залежить винятково від t і генерується самим тілом.

Оскільки для даного випадку виконується умова балансу енергії (4.31), то буде виконуватися умова балансу швидкостей зміни складових енергій, яка в часовій аналогії кількості циклів N запишеться

$$\frac{\partial A}{\partial N} = \frac{\partial W}{\partial N} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N}. \quad (4.61)$$

Підставляючи (4.60) у (4.61), дана умова запишеться

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] \frac{dl}{dN} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N} - \frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} = 0. \quad (4.62)$$

З рівняння (4.62) знаходиться величина швидкості поширення тріщини $V = \partial l / \partial N$

$$\frac{dl}{dN} = \left[\frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} - \frac{\partial \Gamma}{\partial N} \right] / \frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right]. \quad (4.63)$$

На основі результатів [48, 163] вираз в квадратних дужках в правій частині рівняння (4.63) запишеться

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] = \gamma_{fc} - \gamma_t. \quad (4.64)$$

де $\gamma_t = \delta_t \sigma_0$ - питома робота пластичних деформацій в зоні передруйнування біля вершини тріщини; $\gamma_{fc} = \delta_{fc} \sigma_0$ - її критичне значення.

Підставляючи (4.64) в (4.63), отримується

$$\frac{dl}{dN} = \left[\frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} - \frac{\partial \Gamma}{\partial N} \right] / \sigma_0 (\delta_{fc} - \delta_t). \quad (4.65)$$

Величини $\partial W_p^{(3)} / \partial N$, $\partial \Gamma / \partial N$ визначаються на основі [42, 44, 45] і співвідношень (4.37)-(4.39), (4.46)

$$\partial W_p^{(3)} / \partial N = \beta \sigma_0 [(\delta_{t \max} - \delta_{t \min})^2 - (\delta_{sc}^{(\max)} - \delta_{sc}^{(\min)})^2], \eta_2 = 0,25 \beta A B^4 \sqrt{Ti_{\max}} \quad (4.66)$$

$$\partial \Gamma / \partial N = -\eta_2 \sigma_0 T (\delta_{t \max} - \delta_{sc}^{(\max)}) + \sigma_0 F T n^{-1} m^{-1} i(T) [\delta_{fc} - A C_H(T)],$$

де $\delta_{t \max}$, $\delta_{t \min}$, $\delta_{sc}^{(\max)}$, $\delta_{sc}^{(\min)}$ - відповідно максимальні і мінімальні величини розкриття вершини тріщини протягом зміни навантаження за цикл [249, 311]; δ_{fc} - критичне розкриття.

На основі співвідношення (4.66), рівняння (4.65) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\beta [(\delta_{t \max} - \delta_{t \min})^2 - (\delta_{sc}^{(\max)} - \delta_{sc}^{(\min)})^2] + \eta_2 (\delta_{t \max} - \delta_{sc}^{(\max)})}{\delta_{fc} - \delta_{t \max}}. \quad (4.67)$$

Для випадку макроскопічної тріщини, коли справедливі співвідношення (4.49), вираз (4.67) запишеться

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\beta_1 (1-R)^4 (K_{I \max}^4 - K_{sc \max}^4) + \eta_2 (K_{I \max}^2 - K_{sc \max}^2)}{K_{fc}^2 - K_{I \max}^2}, \quad \beta_1 = 0,25 \beta E^{-1} \sigma_0^{-1}, \quad (4.68)$$

де $K_{I \max}$ - максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень за цикл; K_{fc} , $K_{sc \max}$ - відповідно верхнє і нижнє порогові значення КІН на

кінетичних діаграмах поширення втомної і корозійно-механічної тріщин;

$R = K_{I_{\min}} / K_{I_{\max}}$ - коефіцієнт асиметрії циклу навантаження [249].

Для максимальної коректності математичної моделі до рівняння (4.50) на основі (4.41)-(4.43) і (4.49) додаються початкова і кінцева умови

$$N = 0, \quad l(0) = l_0; \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (4.69)$$

Після чого співставимо співвідношення (4.68) з результатами експериментальних даних (рис. 4.9) для сталі 17Г1С [35, 249], випробуваної на повітрі та у 3%-му розчині $NaCl$.

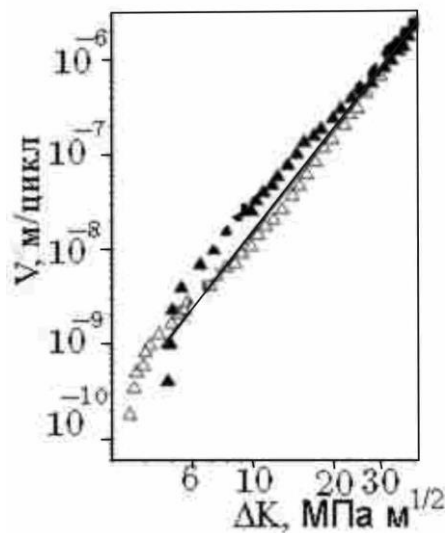


Рис. 4. 9. Діаграми втомного руйнування сталі 17Г1С на повітрі \diamond ; в 3%-му розчині $NaCl$, частота 1Гц при $R=0,1$ \blacktriangle

В результаті, для опису кінетичної діаграми росту втомної тріщини в сталі 17Г1С на повітрі одержується рівняння

$$\frac{dl}{dN} \approx 12 \cdot 10^{-9} \frac{(K_{I_{\max}}^4 - 81)}{12996 - K_{I_{\max}}^2}. \quad (4.70)$$

Аналогічно, для випадку проведення випробувань у 3%-му розчині $NaCl$ $E_{кор}$, для опису кінетичної діаграми поширення корозійно-втомної тріщини в сталі 17Г1С одержується наступне рівняння

$$\frac{dl}{dN} \approx \frac{5 \cdot 10^{-6} (K_{I_{max}}^2 - 25)}{12996 - K_{I_{max}}^2}. \quad (4.71)$$

Припорогове поширення корозійно-втомної тріщини. Для випадку, коли в припороговій області КДВР поширення корозійно-втомної тріщини ($K_{fc} \gg K_I \rightarrow K_{sc}$) є велика активність анодних процесів у порівнянні з механічним руйнуванням, тобто має місце залежність $l_a > l_m$. При цьому поширення корозійно-втомної тріщини на заданій ділянці буде відбуватися з однаковою швидкістю, а кінетична діаграма швидкості росту корозійно-втомної тріщини (ШРКВТ) матиме плато [98, 209, 310, 311] (рис. 4.10 [207]).

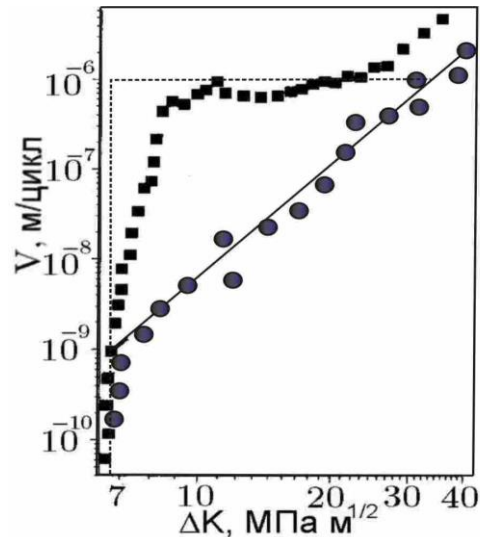


Рис. 4.10. Кінетичні діаграми втомного руйнування сталі 17Г1С при $E_n = -2B$, $R = 0,5$: на повітрі ●; 3%- ний розчин $NaCl$ ■; пунктирна лінія - модельне представлення корозійної частини діаграми.

Описане пояснюється тим [98, 249], що в результаті великих проміжків часу Δt інкубаційного періоду підготовки елементарного стрибка тріщини має місце з ростом K_I затуплення вершини, зменшення концентрації напружень і,

відповідно, стабілізація швидкості V . На таких ділянках діаграм ШРКВТ наближено (з похибкою на запас довговічності) можна вважати (модельна частина діаграми на рис. 4.10 зображена пунктирною лінією до перетину з діаграмою втомного поширення тріщини при вказаному значенні коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I_{\max}} = K_{II}$), що корозійно-механічна тріщина весь час рухається з однаковою швидкістю V_c .

Таким чином, кінетична діаграма ШРКВТ описується наступними співвідношеннями:

$$\text{на ділянці } K_{scc} < K_{I_{\max}} \leq K_{II}, V = V_c; \quad (4.72)$$

$$\text{на ділянці } K_{II} < K_{I_{\max}} < K_{fC}, \frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I_{\max}}^4 - K_{scc \max}^4) (K_{fC}^2 - K_{I_{\max}}^2)^{-1}$$

Вказані співвідношення використовуються при визначенні залишкового ресурсу (періоду докритичного росту корозійно-втомної тріщини) тонкостінних елементів конструкцій при циклічних навантаженнях у корозійно - агресивних середовищах.

Визначення періоду докритичного росту наскрізної корозійно-втомної тріщини в пластині. Нехай нескінченна пластина послаблена прямолінійною тріщиною початкової довжини $2l_0$ циклічно розтягується в нескінченно віддалених точках довготривалими напруженнями амплітудою σ , які перпендикулярні до лінії розміщення тріщини. При цьому вважається, що в тріщину потрапляє агресивне середовище, властивості якого згадані вище (ріст корозійно-втомної тріщини описується рівняннями (4.72) і даними з рис. 4.10). Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження $N = N_*$, до моменту росту тріщини до критичної величини, руйнування пластини.

Для розв'язку вказаної задачі, на основі вище викладеного, запишеться наступна математична модель

$$V = V_c, K_{scc} < K_{I \max} \leq K_{li}; \frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I \max}^4 - K_{scc \max}^4) (K_{fC}^2 - K_{I \max}^2)^{-1}, K_{li} < K_{I \max} < K_{fC},$$

$$N = 0, l(0) = l_0; N = N_*, l(N_*) = l_*, K_I(l_*) = K_{fC}. \quad (4.73)$$

Для даної силової схеми коефіцієнт інтенсивності напружень K_I визначається за [311]

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l}. \quad (4.74)$$

Для пластини з сталі 17Г1С, її навантаження відбувається при амплітуді циклу $\sigma = 200 \text{ МПа}$, і дії 3%-го розчину NaCl при потенціалі наводнення $E_n = -2\text{В}$ і $R = 0,5$ (рис. 4.10). При вказаних вихідних даних співвідношення (4.73) набудуть точного вигляду

$$\frac{dl}{dN} = 10^{-6}, 12 < K_I < 64;$$

$$\frac{dl}{dN} = 45 \cdot 10^{-11} (K_{I \max}^4 - 20736) (12996 - K_{I \max}^2)^{-1}, 64 < K_I < 114. \quad (4.75)$$

$$N = 0, l(0) = l_0; N = N_*, l(N_*) = l_*, K_I(l_*) = 114 \text{ МПа м}^{0,5}.$$

Для визначення залишкового ресурсу $N = N_*$ пластини проінтегруємо співвідношення (4.75) при заданих умовах. В результаті цього одержиться

$$N_* = N_1 + N_2, N_1 = 10^6 (l_1 - l_0),$$

$$N_2 = 2 \cdot 10^9 \int_{l_1}^{l_*} (158 \cdot 10^8 l^2 - 20736)^{-1} (12996 - 13 \cdot 10^4 l) dl. \quad (4.76)$$

Величини l_1, l_* з (4.76) визначаються з рівностей

$$K_I(l_*) = K_{fC}, K_I(l_1) = K_{li}.$$

В результаті отримується $l_* = 0,103 \text{ м}$, $l_1 = 0,033 \text{ м}$. Підставляючи дані в (4.76):

$$N_* = (33 \cdot 10^3 - 10^6 l_0 + 15510) \quad (0,001 < l_0 \leq 0,033); \quad (4.77)$$

$$N_* = 1650(l_0^{-1} + 10 \ln l_0 + 13,3) \quad (0,033 \leq l_0 < 0,103)$$

На рис. 4.11 за співвідношеннями (4.77) побудовано графічну залежність залишкового ресурсу $N = N_*$ пластини від початкового розміру тріщини l_0 (крива 1).

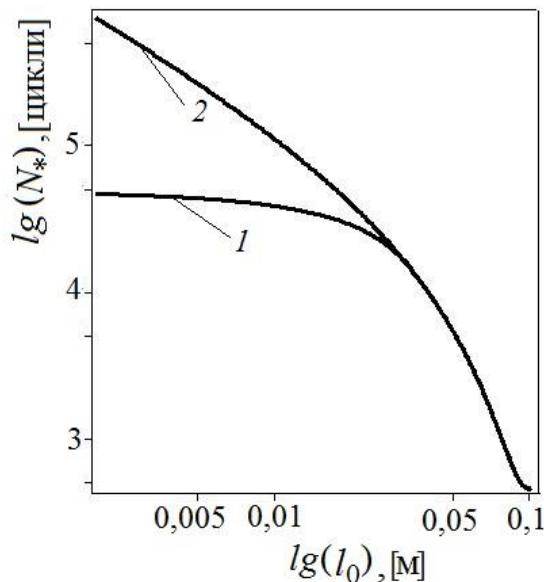


Рис. 4. 11. Графічна залежність залишкової довговічності N_* пластини від початкового розміру тріщини l_0 : 1 - з врахуванням дії корозійного середовища; 2 – без врахування дії середовища.

Також, додатково побудовано за рівнянням (4.75) залежність $N_* \sim l_0$ для випадку відсутності корозійного середовища при еквівалентному силовому навантаженні пластини (крива 2). Отже, з рис. 4.11 вплив корозійного середовища (зменшення довговічності) відчутний при рості тріщини від 0,001 м до 0,033 м ($l_{th} < l < l_1$), потім відбувається просто поширення втомної тріщини.

Це пояснюється тим, що при $l > l_1$ швидкість поширення тріщини настільки велика що сповільнені корозійні процеси не встигають реалізуватися.

4.5. Поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій значних перетинів

Розглядується трьохмірне тіло, послаблене плоскою поверхневою тріщиною з корозійно - агресивним середовищем контуру L і початковою площею S_0 , навантажене циклічно зусиллями з амплітудою p , яка викликає напруження σ (рис. 4.12).

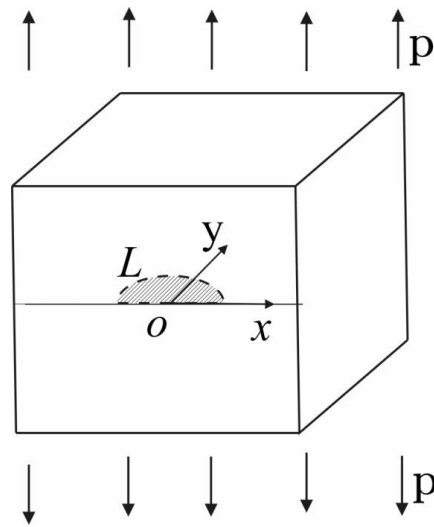


Рис. 4.12. Схема навантаження тіла з плоскою поверхневою тріщиною

Зовнішні розтягуючі навантаження амплітудою P прикладені так, що напружено-деформований стан в тілі буде симетричним відносно площини росту тріщини, тобто описується в околі її вершини винятково коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I . Задача полягає у визначенні часу, чи кількості циклів навантаження $N = N_*$, по досягненню якої тіло зруйнується.

Для розв'язання поставленої задачі будується математична модель у вигляді диференціальних рівнянь з початковими і кінцевими умовами, що описують даний процес. Приймається, що тріщина рухається неперервно від початкового розміру $S = S_0$ до кінцевого $S = S_*$. Це припущення коректне з причини, що реальний скачкоподібний рух корозійно-втомної тріщини супроводжується скачками малого розміру ΔS_c за відносно великі проміжки часу Δt_c ($\Delta t_c = T\Delta N$, де ΔN - кількість циклів навантаження протягом елементарного стрибка тріщини). У зв'язку з цим можемо записати швидкість V росту тріщини

$$V = \frac{dS}{dt} \approx \frac{\Delta S_c}{\Delta t_c}. \quad (4.78)$$

Аналогічно попередньому, запишемо рівняння енергетичного балансу для даного нерівноважного процесу

$$Q + A = W + \Gamma + K. \quad (4.79)$$

де $Q = const$ – величина теплової енергії; A – робота зовнішніх сил; W – енергія деформування тіла, після просування тріщини на величину ΔS_c , яка запишеться аналогічно (4.60) наступним чином [44, 45]

$$W = W_s + W_p^{(1)}(S) + W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t), \quad (4.80)$$

Враховуючи вище сказане і диференціюючи за кількістю циклів навантаження N компоненти рівняння енергетичного балансу (4.79), отримуємо рівняння балансу швидкостей зміни енергетичних складових

$$\frac{\partial A}{\partial N} = \frac{\partial W}{\partial N} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N}. \quad (4.81)$$

Враховуючи, що компоненти енергії деформування є складними функціями від S і N , а площа неявно залежить від N і підставляючи вираз (4.80) в (4.81), одержується

$$\frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] \frac{dS}{dN} - \frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N} = 0. \quad (4.82)$$

З (4.82) знайдено величину швидкості зміни площі тріщини під час її поширення $V = dS/dN$

$$\frac{dS}{dN} = \frac{\partial (W_p^{(3)} - \Gamma)}{\partial N} \bigg/ \frac{\partial}{\partial N} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right]. \quad (4.83)$$

На основі (4.64) і (4.83)

$$\frac{dS}{dN} = \frac{\partial (W_p^{(3)} - \Gamma)}{\partial N} \bigg/ (\gamma_{fc} - \gamma_t). \quad (4.84)$$

Для повноти математичної моделі додамо (аналогічно (4.69)) до виразу (4.84), відповідно, початкову і кінцеву умови

$$N = 0, \quad S(0) = S_0. \quad (4.85)$$

$$N = N_*(T), \quad S(N_*) = S_*, \quad (4.86)$$

де критичне значення площі S_* тріщини і γ_{fc} , γ_t визначається [313]

$$\gamma_t(S_*) = \gamma_{fC}, \gamma_{fC} = \sigma_0 \delta_{fC}, \gamma_t = \sigma_0 \int_L \delta_{t\max}^2(s) ds \left[\int_L \delta_{t\max}(s) ds \right]^{-1}. \quad (4.87)$$

Таким чином, кінетичне рівняння (4.84) і умови (4.85)-(4.87) складають математичну модель дослідження докритичного росту корозійно-втомної тріщини в елементах конструкції при симетричному навантаженні.

Реалізація математичної задачі (4.84)-(4.87) для конкретних випадків спричиняє значні математичні труднощі. В зв'язку з цим, розв'язок задачі необхідно відповідно до [46] спростити.

Отже за результатами попереднього параграфу (див (4.68)), швидкість росту розглядуваної вище тріщини V при її прямолінійному поширенні пов'язується з параметрами напружено-деформованого стану в зоні передруйнування наступними співвідношеннями

$$V = f(K_{I\max}), \quad (4.88)$$

$$f(K_{I\max}) = \frac{\beta_1(1-R)^4(K_{I\max}^4 - K_{sc\max}^4) + \eta_2(K_{I\max}^2 - K_{sc\max}^2)}{K_{fC}^2 - K_{I\max}^2}.$$

Далі, відповідно до [42, 46], розглянемо випадок, коли руйнування проходить в одній площині трьохвимірному тіла під дією циклічних навантажень і корозійно – агресивного середовища. Оскільки швидкість поширення тріщини V направлена по нормалі до контуру, то переміщення за час ΔN довільної точки M біжучого контуру тріщини в напрямку нормалі (рис. 4.13 [42, 46]) визначатиметься наступним чином

$$MM' = \Delta N \cdot V \quad (4.89)$$

Звідси, приріст радіус-вектора Δr полярної системи $O r \varphi$ (рис.4.13) запишеться у вигляді

$$\Delta\rho = \frac{|MM'|}{\cos\theta} = \frac{\Delta N \cdot V}{\cos\theta}, \quad (4.90)$$

де θ – кут між напрямком радіус-вектора ρ і нормаллю до контуру тріщини MM' .

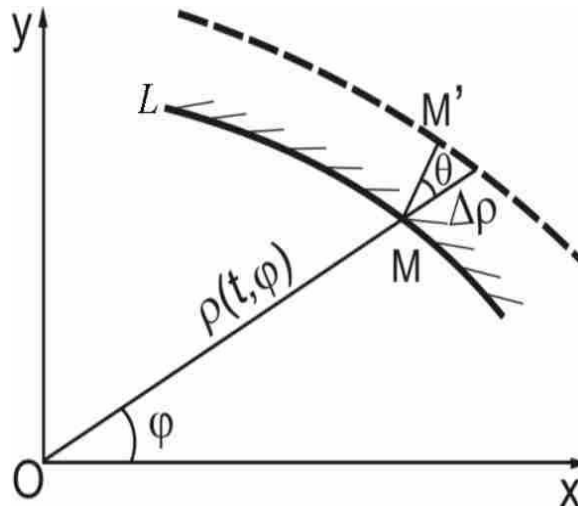


Рис.4.13. Схема локального росту плоскої корозійно-втомної тріщини

З аналізу геометричної побудови, рис.4.13 одержується [42, 46]

$$\cos\theta = \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\right)^2}}. \quad (4.91)$$

Підставляючи (4.91) в (4.90) і переходячи до границі при $\Delta N \rightarrow 0$, величина V визначається наступним чином

$$V = \frac{\partial\rho}{\partial N} \left(1 + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial\rho}{\partial\varphi} \right)^2 \right)^{-1/2}. \quad (4.92)$$

З іншого боку, на основі (4.88) і (4.92), для знаходження невідомої функції $\rho = \rho(N, \varphi)$ одержане диференціальне рівняння

$$\frac{\partial \rho}{\partial N} = f(K_{I\max}) \left(1 + \rho^{-2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (4.93)$$

при початкових і кінцевих умовах,

$$\begin{aligned} N = 0, \quad \rho(0, \varphi_0) &= \rho_0; \\ N = N_*, \quad \rho(N_*, \varphi_*) &= \rho_*. \end{aligned} \quad (4.94)$$

В даному випадку співвідношення (4.93) і (4.94) визначають задачу для визначення кінетики поширення і періоду N_* докритичного росту плоскої тріщини. Для встановлення величин ρ_*, φ_* додається умова (критерій Ірвіна [26])

$$K_{I*}(\rho_*, \varphi_*) = K_{Ic}. \quad (4.95)$$

Для реалізації математичної моделі (4.93)-(4.95) пропонується наступний наближений підхід [42, 46], згідно якого зміна площі рухомої тріщини розглядуваної конфігурації, наближено така, як для півкругової тріщини радіусом a рівної початкової площі, а швидкість поширення контуру тріщини приймається сталим у всіх його точках (дане припущення приймається для максимального значення $K_{I\max}$, при цьому одержаний залишковий ресурс N_* має похибку на запас довговічності модельованого тіла), тобто рівняння (4.93) спрощується до вигляду

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta_1(1-R)^4 [K_{I\max}^4(a) - K_{sc\max}^4] + \eta_2 [K_{I\max}^2(a) - K_{sc\max}^2]}{K_{fC}^2 - K_{I\max}^2(a)} \quad (4.96)$$

при початкових і кінцевих умовах

$$\begin{aligned} N = 0, & \quad \sqrt{2\pi^{-1}S_0} = a_0; \\ N = N_*, & \quad a(N_*) = a_*. \end{aligned} \quad (4.97)$$

При цьому, максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I\max}$ для півпростору з поверхневою півкруговою тріщиною при його розтягуванні напруженнями σ визначається на основі результатів [62] наступним чином

$$K_{I\max} = 1.17\sigma\sqrt{a}. \quad (4.98)$$

Підставляючи (4.98) в рівняння (4.96) і інтегруючи його при записаних умовах (4.97), для визначення періоду $N = N_*$ докритичного росту корозійно-втомної тріщини початкової площі $S = S_0$ в півпросторі отримаємо формулу

$$N_* = \int_{a_0}^{a_*} \frac{K_{fc}^2 - 1,37a\sigma^2}{\beta_1(1-R)^4[1,87a^2\sigma^4 - K_{scc\max}^4] + \eta_2[1,37a\sigma^2 - K_{scc\max}^2]} da, \quad (4.99)$$

$$\text{де } a_0 = \sqrt{2\pi^{-1}S_0}, \quad a_* = 0,73K_{fc}^2\sigma^{-2}.$$

Наприклад, при розгляді сталі 17Г1С [35], корозійне середовище: 3% – ний розчин NaCl, частота навантаження 1Гц, коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0,1$, амплітуда навантаження $\sigma = 200$ МПа. Критична величина розміру тріщини в даному випадку $a_* = 0,237$ м, а кінетична діаграма росту корозійно-втомної тріщини буде описуватися (4.71). Підставляючи вказані дані у (4.99) і чисельно інтегруючи підінтегральний вираз, отримаємо значення N_*

$$N_* = 2 \cdot 10^5 (a_0 - 0,419 \ln a_0 - 0,84) \text{ цикли.} \quad (4.100)$$

На основі вказаного, на рис. 4.14 побудовано графічну залежність періоду докритичного росту корозійно-втомної тріщини від розміру початкової тріщини a_0 .

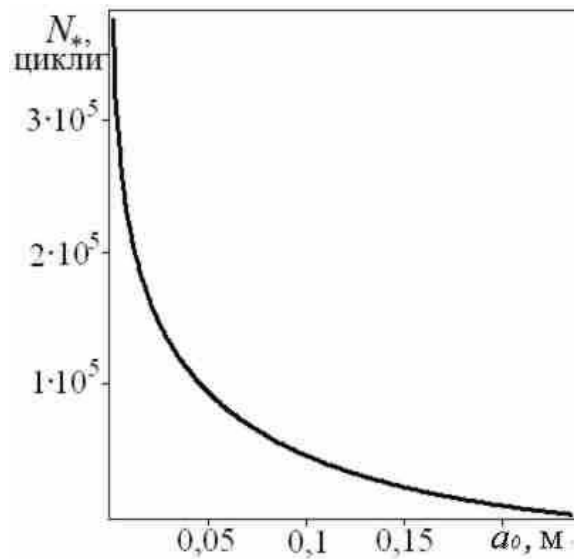


Рис.4. 14. Графічна залежність залишкової довговічності N_* пластини від початкового розміру тріщини a_0

Отже, виходячи з рис. 4.14, зменшення розмірів a_0 тріщини різко збільшує період докритичного росту тріщини N_* .

Залишковий ресурс пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною. Розглянемо нескінченну пластину з сталі 17Г1С [35] товщиною h , послаблену поверхневою півеліптичною тріщиною у яку потрапляє 3% – ний розчин NaCl з півосями a_0 і b_0 ($b_0 > a_0$), (рис. 4.15). Пластина розтягується у нескінченно віддалених точках перпендикулярно до площини поширення тріщини рівномірно розподіленими циклічними зусиллями амплітуди σ з частотою 1 Гц і асиметрією циклу $R=0,1$. Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження $N = N_*$, по досягненню якого контур корозійно-втомної тріщини виросте до протилежної поверхні. При цьому вважаємо, що кінетична діаграма поширення корозійно-втомної тріщини в матеріалі пластини описується аналітичною залежністю (4.71). Дана задача є

розрахунковою моделлю визначення залишкового ресурсу (чи порушення герметичності) тонкостінних посудин з поверхневими тріщинами.

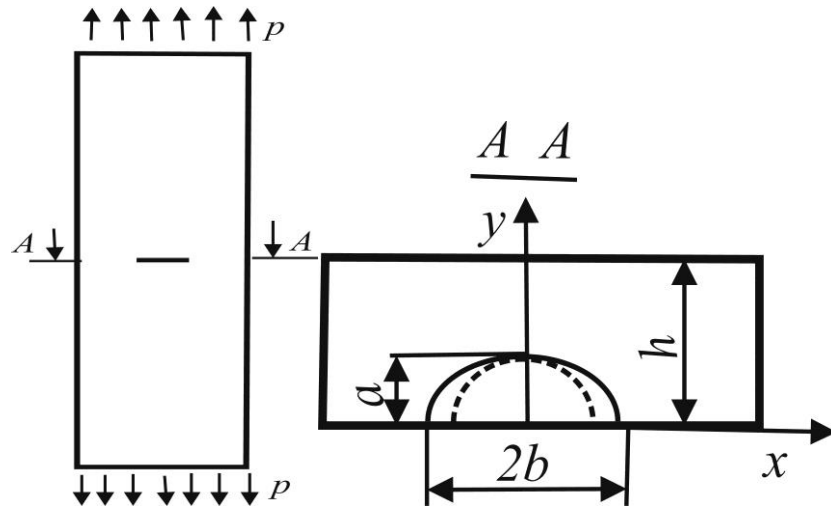


Рис. 4.15. Схематизація розтягу пластини значної товщини з поверхневою півеліптичною тріщиною

Розв'язок поставленої математичної задачі знаходиться наближено, аналогічно вище викладеному, методом еквівалентних площ [46]. Згідно цього методу зміна площі внаслідок поширення корозійно-втомної тріщини розглядуваної конфігурації буде, наближено, така, як для півкругової тріщини радіусом a аналогічної початкової площі, а швидкість поширення точок її контуру приймається однаковою. Замінюючи дану задачу на модельну, в якій контур тріщини в пластині півколовий радіусом a обмежує площу рівну півеліптичній реальній тріщині, вибираємо найбільше значення КІН вздовж такого кругового контуру, а саме [46]

$$K_I = 2\sigma\sqrt{h\pi^{-1}}F(\varepsilon), \quad F(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon}(1,01 + 0,067\varepsilon^3)(1,57 - 0,51e^{-0,21\varepsilon^2}), \quad \varepsilon = ah^{-1}. \quad (4.101)$$

Підставляючи (4.101) в (4.71), для визначення періоду $N = N_*$ отримується наступне рівняння

$$\frac{d\varepsilon}{dN} \approx \frac{5 \cdot 10^{-6} h^{-1} [4h\pi^{-1}\sigma^2 F^2(\varepsilon) - 25]}{12996 - 4h\pi^{-1}\sigma^2 F^2(\varepsilon)} \quad (4.102)$$

при початковій і кінцевій умовах

$$N = 0, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 = h^{-1} \sqrt{a_0 b_0}; \quad N = N_*, \quad \varepsilon = 1$$

Для визначення $N = N_*$ проінтегруємо (4.102) в межах заданих початкової і кінцевої умов. В результаті цього отримаємо

$$N_* = 2 \cdot 10^5 h \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{[12996 - 4h\pi^{-1}\sigma^2 F^2(\varepsilon)]}{[4h\pi^{-1}\sigma^2 F^2(\varepsilon) - 25]} d\varepsilon. \quad (4.103)$$

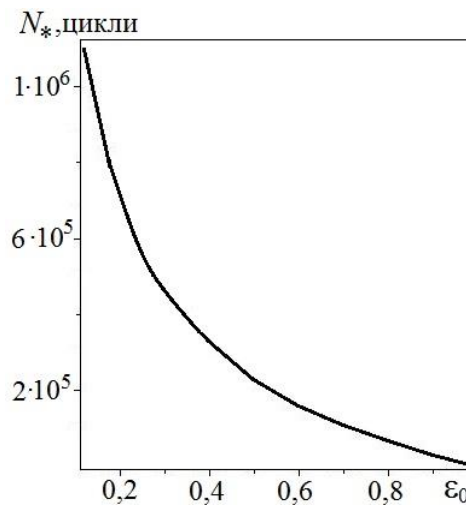


Рис. 4.16. Графічна залежність періоду N_* росту поверхневої корозійно-втомної тріщини у пластині від початкового розміру ε_0

Для числового аналізу співвідношення (4.103) приймемо, що $h = 0.04$ м, $\sigma = 70$ МПа, в результаті цього співвідношення (4.103) набуде вигляду

$$N_* = 8 \cdot 10^3 \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{12996 - 250F^2(\varepsilon)}{250F^2(\varepsilon) - 25} d\varepsilon. \quad (4.104)$$

За (4.104), побудовано графічну залежність періоду N_* росту корозійно-втомної тріщини від її початкового розміру ε_0 , рис. 4.16.

Отже, незначне збільшення початкового розміру ε_0 значно зменшує період докритичного росту корозійно-втомної тріщини, рис. 4.16

4.6. Висновки

1. Проведено аналіз ґрунтів за корозійною активністю і впливом на довговічність матеріалів металоконструкцій сільськогосподарських машин.

2. Для випадку найбільш агресивного типу корозії матеріалів несучих елементів розкидачів добрив – електрохімічної корозії, з метою коректного математичного опису її кінетики і оцінки пошкодженості матеріалів обґрунтовано базові аспекти визначення основних параметрів корозії.

3. На основі першого закону термодинаміки розроблено розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту наскрізних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій при сумісній дії довготривалих статичних навантажень і корозійно - агресивних середовищ. Модель адаптовано до двох видів корозійного впливу середовищ: неефективні анодні процеси - корозійно-механічна тріщина рухається з відносно великою швидкістю, та ефективні анодні процеси - роз'їдання з затупленням вершини тріщини, яка росте з постійною швидкістю. Коректність підтверджено реалізацією моделі на прикладі визначення залишкового ресурсу пластини з сталі 45ХН2МФА з прямолінійною тріщиною при дії довготривалих статичних навантажень в дистильованій воді.

4. Розроблено розрахункову модель визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій з наскрізними тріщинами при дії циклічних навантажень і корозійно-агресивних середовищ. В основу моделі

покладено перший закон термодинаміки і положення механіки втомного поширення тріщин. Модель адаптовано для випадків розвитку тріщини в результаті циклічних навантажень з значною швидкістю, при чому в повній мірі не реалізуються анодні процеси, а також для випадку, коли анодні процеси активні - на кінетичній діаграмі в припороговій області спостерігається сходінка. Ефективність розробленої моделі продемонстровано на прикладі визначення залишкового ресурсу пластини з сталі 17Г1С послабленої наскрізною тріщиною при дії циклічних навантажень на повітрі і у 3%-му розчині NaCl, $E_p = -2В$. Встановлено, що корозійне середовище може зменшити залишковий ресурс пластини на порядок.

5. Для випадку дії циклічних навантажень і корозійно-агресивних середовищ на елементи металоконструкцій з поверхневими тріщинами отримано сукупність математичних співвідношень у вигляді нелінійного диференціального рівняння в часткових похідних, та початкових і кінцевих умов для визначення залишкового ресурсу. Запропоновано ефективний метод наближеного розв'язку вказаної задачі. Реалізацію даної математичної моделі продемонстровано при визначенні залишкового ресурсу пластини з сталі 17Г1С послабленої поверхневою півеліптичною тріщиною при дії циклічних навантажень у 3%-му розчині NaCl. Доведено, що незначне збільшення початкового розміру тріщини значно зменшує період докритичного росту корозійно-втомної тріщини.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ НЕСУЧИХ СИСТЕМ РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КОРОЗІЙНО - АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

5.1. Основи методики визначення ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин

При виконанні технологічних операцій металоконструкції сільськогосподарських машин перебувають під негативним впливом отрутохімікатів, органічних і мінеральних добрив, атмосфери, ґрунту. Наприклад, на машини для захисту рослин, для внесення добрив, впливає рідинна й атмосферна корозія. Вся ґрунтообробна техніка абразивно та корозійно зношується. Машинно-тракторний парк піддається механічному зношуванню в період роботи та корозійним руйнуванням під дією оточуючого середовища (дощу, сонця, вітру і т. д.), а також корозії, в т.ч. у неробочий період. У значній степені корозією вражаються металеві частини сільськогосподарських машин (розділ 1), швидкість якої збільшується при контактах з ґрунтами, рослинністю, отрутохімікатами, добривами, ін. Відомо, через корозійні руйнування відбувається до 35 % відмов сільськогосподарських машин і агрегатів. Міцність вуглецевих сталей і сірих чавунів знижується на 40-60%, зношування деталей у з'єднаннях збільшується у 2- 4 рази. Щорічно сільське господарство країни має великі матеріальні збитки від недотримання умов зберігання і порушення антикорозійного захисту. Для коректного прогнозування виходу з ладу сільськогосподарських машин важливе значення має розробка методів прогнозування їхнього ресурсу з врахуванням дії фактичної експлуатаційної навантаженості і корозійно - агресивних середовищ.

В даному розділі запропоновано методику оцінки ресурсу роботи машин для розкидання добрив і її застосування при розрахунках довговічності і залишкової довговічності несучих систем розкидачів мінеральних і органічних добрив. Основні положення розділу автором опубліковано у [187, 191, 194]

Сільськогосподарські машини працюють в умовах змінних в часі навантажень при впливах корозійно - агресивних середовищ в результаті чого відбуваються втомні руйнування базових несучих елементів. Дане втомне руйнування відноситься до найбільш поширених видів сповільненого руйнування у аграрному виробництві. На початковій стадії процесу руйнування, зазвичай, спостерігається поступове виникнення і накопичення мікрodefektів. Якщо розміри defektів співставні з характерними розмірами мікроструктури (наприклад, величиною зерна), дана стадія називається стадією зародження тріщини, або інкубаційним періодом, який закінчується локалізацією процесу розсіяного руйнування з виникненням зростаючої макротріщини. Часто основну частину періоду довговічності матеріалу (праці Рибак Т.І., Дмитриченка С.С., Підгурського М.І., ін.) займає не зародження мікротріщин, а наступний період повільного квазістатичного зростання тріщини – розвитку від початкового до критичного розмірів. Кінцевою стадією динамічного росту тріщини є повне руйнування.

Діаграма втоми. Базовим документом, який описує опір втомному руйнуванню досліджуваного матеріалу виробу є діаграма втоми (крива Велера) [144], яка будується на основі використання 8 - 10 і більше зразків, досліджених при різних напруженнях σ з забезпеченням ідентичності частоти, форми циклу і коефіцієнта асиметрії R . Діаграма втоми має специфічний асимптотичний характер з виходом її нижньої частини на рівень напружень, при якому деталь чи зразок не руйнується (рис. 5.1). Максимальне напруження σ_R , яке відповідає заданій базі випробувань, називається межею витривалості. При симетричному циклі навантаження межу витривалості звичайно позначають σ_{-1} (індекс є значенням коефіцієнта асиметрії циклу, в даному випадку $R = -1$). Діаграми

втоми найчастіше будуються в координатах $\sigma - \lg N$ і значно рідше в координатах $\sigma - N$ чи $\lg \sigma - \lg N$.

Внаслідок циклічного навантаження у металі накопичується пошкодженість, яка при різних діапазонах прикладених напружень, що відповідають області мало – і багатоциклової втоми проявляється по-різному. Процес втоми поділяється на три етапи, рис. 5.1 [111, 144, 248]: I – протікання у металі процесів зміцнення, а також розміцнення, які можуть мати різні закономірності залежно від природи металу та умов навантаження; II – утворення тріщин у невеликих приповерхневих об'ємах металу, що супроводжується виникненням концентраторів напружень в даних об'ємах; III – поширення тріщини, яке закінчується повним руйнуванням зразка, або виробу. Схематичне представлення інтервалів довговічності, що відповідають вказаним стадіям, зображено на рис. 5.1.

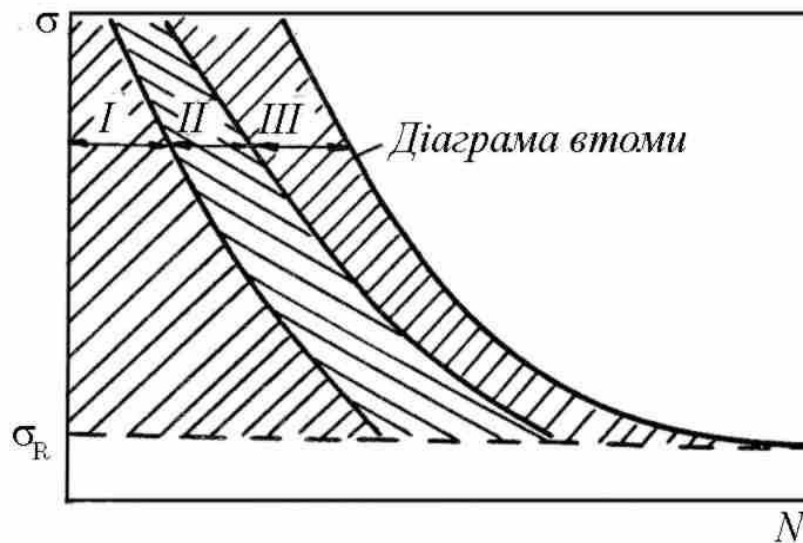


Рис. 5.1. Характерні етапи процесу втоми: I – зміцнення, розміцнення; II – зародження тріщини; III – поширення тріщини.

У зв'язку з тим, що механіка руйнування вивчає переважно третю стадію втоми, у літературі [319] також зустрічається поділ процесу втоми на дві стадії: зародження тріщини (їй відповідає кількість циклів N_3) і поширення до критичної величини (N_D). Відносна тривалість стадії поширення тріщини N_D у

повній довговічності виробу N_p може змінюватись в межах від 5 до 95% і залежить від природи і структури матеріалу, відносного рівня прикладених навантажень, характеру напруженого стану (в тому числі концентрації напружень), активності робочих середовищ, інших факторів [111, 144, 298].

Поскільки зародження втомної тріщини визначається накопиченням мікропластичної деформації, стадія утворення тріщини у більшості металів і сплавів із середньою і високою пластичністю контролюється рівнем виникаючих при навантаженні дотичних напружень. Таким чином, інтенсивне утворення втомної мікротріщини спостерігається в глибині площин ковзання у напрямі максимальних дотичних напружень. У свою чергу, поширення утвореної магістральної тріщини пов'язане з переорієнтацією площини декогозії у площину максимальних нормальних напружень. На даній властивості базується один з методів розділення стадії ініціювання і поширення втомних тріщин.

Мікротріщини втоми, що зародилися у смугах ковзання, продовжують свій розвиток у межах цих смуг у напрямку дії максимальних дотичних напружень. При одновісному навантаженні розтягом-стиском цей напрям відповідає площинам, розміщеним під кутом 45° до бокової поверхні зразка. Співпадіння площини поширення тріщини з напрямом дії максимальних дотичних напружень пояснюється тим, що в кожному окремому зерні полікристалу є достатня кількість потенціальних систем активного ковзання, що дозволяє задіяти площини, які найсприятливіше орієнтовані для реалізації зсуву. У зв'язку з таким характером розвитку пошкоджуваності початковий ріст тріщин називається кристалографічним.

На поверхні гладкого зразка при циклічному навантаженні виникає значна кількість мікротріщин, хоча більшість з них припиняє свій ріст, досягнувши довжини, яка не перевищує десяти мікрометрів. Окремі з них продовжують розвиватись, об'єднуючись між собою, а також за рахунок поглиблення у площині дії початкових екструзій та інтрузій. З ростом довжини відбувається переорієнтація зсувної тріщини у площину дії максимальних

напружень розтягу. Таким чином, закінчується I стадія кристалографічного поширення тріщини, яка звичайно не перевищує десятих частин міліметра. Стадія субкритичного поширення тріщини (II стадія), що протікає за схемою нормального відриву, закінчується при досягненні тріщиною критичної довжини, що відповідає спонтанному короткочасному руйнуванню (долому) всього зразка. Зсувова тріщина, що розвивається на I стадії втомі, називається тріщиною Форсайта [111], за іменем дослідника, який систематично досліджував початкові стадії втомної пошкоджуваності.

Перехід від I до II стадії руйнування пов'язаний зі зміною траєкторії тріщини, його оцінка металографічними чи іншими доступними способами є досить затруднена, у зв'язку із цим розділити періоди зародження і поширення тріщини при втомі металів також надзвичайно складно. На даний час дане принципове питання методично не вирішене.

Основні етапи корозійно-втомного руйнування конструкцій. При втомі металів, як додатковий фактор, корозійне середовище значно зменшує опір появі початкових тріщин. Окремі вчені скорочення етапу зародження тріщини пояснюють електрохімічною гетерогенністю матеріалу в активних площинах ковзання, що призводить до утворення пітінгів, які, самі по собі, можуть бути і вихідними дефектами і додатковими концентраторами напружень. Інші вчені пов'язують пришвидшення зародження тріщин явищами розміщення захисних плівок на поверхні металу. Дані плівки утворюються у зв'язку із витримкою зразка в корозійному середовищі, хоча піддаються руйнуванню за лініями інтенсивного ковзання. Виникає гальванопара з малою анодною ділянкою в зоні руйнування плівки і значною катодною, якою є суцільний оксидний шар на поверхні зразка. Таким чином, пришвидшується локальне розчинення металу в смугах ковзання, період зародження N_3 суттєво скорочується.

Основні несучі елементи металоконструкцій сільськогосподарських машин є, в більшості випадків, тонкостінними стержневими елементами, які знаходяться під дією згинальних змінних в часі навантажень. Ресурс металоконструкції визначається ресурсом найслабших ланок, якими, очевидно,

є найбільш навантажені елементи. Згідно сучасної теорії втоми (механіки сповільненого руйнування елементів конструкцій при змінних навантаженнях [30, 42, 144, 163, 298, 319]), ресурс елемента конструкції N_p при змінних навантаженнях визначається

$$N_p = N_3 + N_d. \quad (5.1)$$

де N_3 - період зародження втомної тріщини; N_d - період докритичного росту тріщини.

Це означає, що втомне руйнування елемента конструкції триває дві стадії: зародження втомної тріщини і її докритичний ріст. З позиції стабільності втомного руйнування існує три способи розрахунку ресурсу елемента металоконструкції:

1) ресурс елемента конструкції N_p визначається періодом зародження тріщини N_3 , незначна частина займає її ріст, при цьому $N_p \approx N_3$;

2) в елементі конструкції є невелика тріщина і ресурс визначається періодом докритичного росту, тобто $N_p \approx N_d$;

3) період зародження тріщини N_3 і період її докритичного росту N_d займають співмірні проміжки довговічності елемента конструкції, тому його ресурс N_p буде визначатися співвідношенням (5.1).

Визначення періоду зародження тріщини. Відносне значення періоду N_3 зародження тріщини до повної довговічності N_p елемента конструкції може змінюватися в межах до 90% у залежності від природи і структури матеріалу, відносно рівня прикладених напружень, характеру напруженого стану, активності зовнішніх середовищ і інших факторів [144, 163, 298, 319]. Для бездефектних елементів конструкцій при одновісному розтягу, згину, визначення періоду зародження втомної тріщини базується на діаграмі втоми матеріалів (кривій Велера), рис. 5.2 [144, 163, 298, 319].

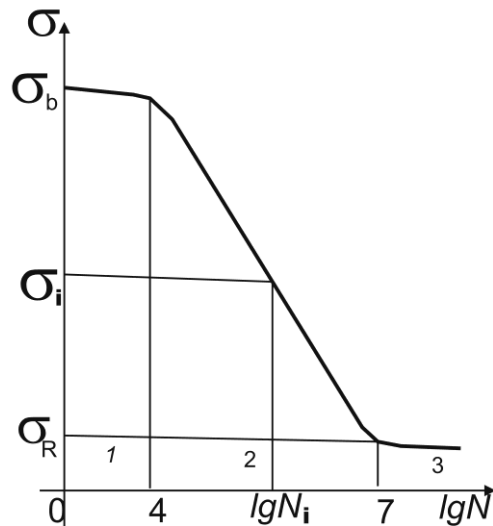


Рис. 5.2. Діаграма втоми матеріалів (діаграма Велера) : 1- ділянка малоциклової втоми; 2- ділянка обмеженої довговічності; 3 – ділянка за межею втоми.

Дана крива, як правило [144, 163, 298, 319], будується з заданою для досліджуваного елемента конструкції частотою, середовищем, формою циклу і коефіцієнтом асиметрії R в координатах $\sigma \sim \lg N$, де величина напружень σ змінюється в межах $\sigma_b \geq \sigma \geq \sigma_R$, для σ_b - границі міцності матеріалу; σ_R - максимального значення напружень (границя втоми матеріалу), при якому досліджуваний зразок витримає задане число навантажень, що називається базою випробувань. Величина σ_R визначається при заданій асиметрії циклу R . Якщо цикл навантаження симетричний ($R = -1$), то границя втоми позначається σ_{-1} . Для багатьох матеріалів база випробувань задається у кількості 10^7 циклів. Діаграма втоми, зображена на рис. 5.2, розділяється на три частини: 1 – область малоциклової втоми, кількість циклів навантаження змінюється в межах $0 \leq N \leq 10^4$; 2 – область обмеженої довговічності, де кількість циклів навантаження змінюється в межах $10^4 \leq N \leq 10^7$; 3 – область - за границею втоми $N \geq 10^7$.

З досліджень та аналізу експлуатаційних параметрів роботи несучих металоконструкцій сільськогосподарських машин (розділи 1 і 6), навантаження

більшості з них знаходиться в межах обмеженої довговічності. Тому розрахунок періоду зародження тріщини для таких елементів проводиться, виходячи із залежностей $\sigma \sim \lg N$ для області обмеженої довговічності. На основі результатів робіт можна зробити висновок, що ця залежність буде наближено лінійна і аналітично запишеться [144, 163, 298, 319]

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \lg \frac{N_0}{N}. \quad (5.2)$$

де σ_0, N_0 - характеристики втомного руйнування матеріалів в межах області обмеженої довговічності ($10^4 \leq N \leq 10^7$), які визначаються на основі експериментальних досліджень.

Тоді період зародження втомної тріщини N_3 в елементі конструкції, в якому зовнішнє навантаження викликає амплітуду змінних в часі напружень σ , буде визначатися на основі (5.2) (див. також рис. 5.2) наступним чином

$$N_3 = N_0 10^{-\sigma \sigma_0^{-1}}. \quad (5.3)$$

Отже, для визначення періоду $N = N_3$ зародження корозійної макротріщини в елементі конструкції необхідно, згідно даних експериментальних випробувань, визначити характеристики σ_0, N_0 області обмеженої довговічності діаграми Велера. Методика експериментальних досліджень в корозійно - агресивних середовищах і знайдені з її допомогою відповідні значення характеристик матеріалів металоконструкцій рам причіпних розкидачів добрив представлена у розділі 3.

Визначення періоду докритичного росту корозійно - втомної тріщини.
Розглядується тонкостінний балковий елемент конструкції, в якому зародилася макротріщина початковою довжиною l_0 , який навантажений зовнішніми

циклічним зусиллями, що викликають напружено-деформований стан симетричний відносно площини розташування тріщини. Приймається, що у тріщину проникає корозійно - агресивне середовище, яке разом з циклічними навантаженнями є причиною поширення корозійно - втомної тріщини. Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту корозійно втомної тріщини $N = N_D$, що зародилася в досліджуваному елементі металоконструкції. Для розв'язку сформульованої задачі скористаємося теорією, розвинутою у розділі 4. При цьому вважається, з експериментальних досліджень сталей рам розкидачів добрив, що кінетичні діаграми поширення корозійно - втомних тріщин мають ділянки - плато при нижньому пороговому значенні (див. рис. 4.10). Тоді визначення періоду $N = N_D$ докритичного росту корозійно - втомної тріщини приводиться до наступної математичної задачі

$$V = V_c, K_{sc} < K_{I_{\max}} \leq K_{I_i}; \quad (5.4)$$

$$\frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I_{\max}}^4 - K_{sc_{\max}}^4) (K_{fc}^2 - K_{I_{\max}}^2)^{-1}, K_{I_i} < K_{I_{\max}} < K_{fc},$$

з заданими початковою і кінцевою умовами

$$N = 0, l(0) = l_0; N = N_D, l(N_D) = l_*, K_I(l_*) = K_{fc}. \quad (5.5)$$

де $K_{I_{\max}}$ - максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень за цикл; $K_{fc}, K_{sc_{\max}}$ - відповідно, верхнє і нижнє порогові значення КІН на кінетичних діаграмах поширення втомної і корозійно-механічної тріщин; $R = K_{I_{\min}}/K_{I_{\max}}$ коефіцієнт асиметрії циклу навантаження; V_c - постійне значення швидкості припорогового поширення корозійно - втомної тріщини до перетину з діаграмою втомного поширення тріщини при певному значенні коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I_{\max}} = K_{I_i}$ (розділ 4, (4.72)); β_1 -

характеристика корозійно - втомного руйнування матеріалу (формула (4.68)), яка знаходиться експериментально.

Отже, якщо експериментально знайдено характеристики V_c , β_1 , K_{fC} , $K_{scc\max}$, K_{Ii} , то період $N = N_D$ докритичного росту корозійно - втомної тріщини в досліджуваному елементі знаходиться при розв'язуванні математичної задачі (5.4), (5.5).

5.2. Визначення довговічності коритних профілів при дії циклічних навантажень і корозійно - агресивних середовищ добрив

В несучих металоконструкціях сільськогосподарських машин застосовуються стержневі тонкостінні елементи, поперечним перерізом яких є коритний профіль. Нормальні напруження в поперечному перерізі [175]

$$\sigma = \frac{M}{W_x}, \quad (5.6)$$

де M - величина згинального моменту, W_x - осьовий момент опору поперечного перетину.

Досліджуваний елемент розглядається як балка, що циклічно згинається моментом M (рис. 5.3). Геометричні характеристики балки зображено на рис. 5.3. Завдання полягає у визначенні довговічності $N = N_p$.

Розв'язок задачі здійснюється на основі (5.1), тобто у вигляді суми періодів зародження втомної тріщини N_3 і її докритичного росту N_D . Величина N_3 знаходиться на основі залежностей (5.3) і (5.6), в результаті чого одержується формула

$$N_3 = N_0 10^{-M W_x^{-1} \sigma_0^{-1}}. \quad (5.7)$$

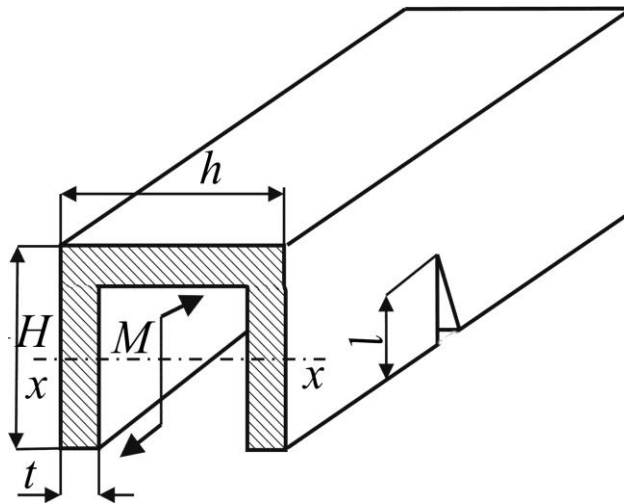


Рис. 5.3. Розрахункова схема балки коритного профілю

У (5.7.) осьовий момент опору поперечного перерізу W_x даної балки визначається на основі [175]

$$W_x = \frac{J_x}{y_1}, y_1 = \frac{ht + 2H^2 - 2t^2}{2h + 4H - 4t}, y_1^1 = H - y_1, \quad (5.8)$$

$$J_x = 0,08[ht^3 + 2t(H - t)^3] + ht(y_1 - 0,5t)^2 + 2t(H - t)[0,5(H - t) + t - y_1]$$

Далі, обчислимо період докритичного росту втомної тріщини, що зародилася. Для цього скористаємося математичною моделлю (5.4), (5.5). В результаті чого, проінтегрувавши диференціальне рівняння (5.4) при початкових і кінцевих умовах (5.5), для визначення періоду докритичного росту втомної тріщини N_D отримаємо залежність

$$N_D = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{1}{\beta_1(1 - R)^4} \int_{l_i}^{l_*} \frac{K_{fc}^2 - K_{Imax}^2}{K_{Imax}^4 - K_{sc}^4} dl. \quad (5.9)$$

Де довжина тріщини l_i визначається з рівняння

$$K_I(l_i) = K_{li}. \quad (5.10)$$

Отже, задачу приведено до визначення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I_{\max}}$ для вказаної силової схеми навантаження балки з тріщиною, рис. 5.3. Для більшості випадків у машинобудуванні, для елементів металоконструкцій не допускаються великі розміри тріщин, навіть при умові, коли вони не критичних розмірів. Тоді наближене визначення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I може бути спрощеним. Нехай тонкостінний елемент металоконструкції з поверхневою тріщиною довжини l_0 навантажений так, що напружено-деформований стан в ньому симетричний відносно лінії розміщення тріщини. Одним із граничних станів для даного випадку при визначенні величини K_I буде півплощина з поверхневою тріщиною [163, 311]

$$K_I = 1,12\sigma_{ном}\sqrt{\pi l_0}. \quad (5.11)$$

Враховуючи це, запишемо КІН для тріщини як

$$K_I = \sigma_{ном}\sqrt{\pi l_0}(1,12 + F(\varepsilon)), \quad (5.12)$$

де $\varepsilon = l_0 / D$; D - лінійний розмір поперечного перетину розглядуваного елемента конструкції по лінії розміщення тріщини; $\sigma_{ном}$ - номінальне напруження у вершині тріщини; $F(\varepsilon)$ - безрозмірна функція, причому $F(\varepsilon) \rightarrow 0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. В кожному конкретному випадку функція $F(\varepsilon)$ визначається по різному в залежності від специфіки форми елемента конструкції і тріщини в ньому.

В даному випадку, для визначення K_I коритного профілю з боковою тріщиною, скористаємося інтерполяційною формулою (5.12), вважаючи, що K_I для вказаного випадку буде приблизно такий, як і у випадку згину моментом M смуги з поверхневою тріщиною довжини l_0 аналогічної товщини t з осьовим

моментом опору поперечного перетину W_x . Представляючи функцію $F(\varepsilon)$ поліномом за степенями ε ($\varepsilon = l_0 / (2H + h)$) і порівнюючи (5.12) до відповідного розв'язку [33, 145] чистого згину смуги з поверхневою тріщиною l_0 при $\varepsilon \approx 0,5$, знаходиться наступна формула для визначення величини K_I

$$K_I = \frac{\sqrt{2H + h}M}{W_x} \sqrt{\pi\varepsilon} [1,12 + F(\varepsilon)], \quad (5.13)$$

$$F(\varepsilon) = 0,52\sqrt{\varepsilon} (1 + 6,42\varepsilon^2 - 6,53\varepsilon^3 + 5,86\varepsilon^4)$$

Підставляючи (5.13) в (5.9), для визначення періоду докритичного росту тріщини N_D отримується наступна залежність

$$N_D = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 (2H + h)}{\beta_1 K_{scc}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_* = \frac{l_*}{h + 2H}, \quad \varepsilon_i = \frac{l_i}{h + 2H}, \quad (5.14)$$

$$f_1(\varepsilon) = \frac{\pi M^2 \varepsilon (h + 2H)}{W_x^2 K_{fC}^2} [1,12 + F(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2 M^4 \varepsilon^2 (h + 2H)^2}{W_x^4 K_{scc}^4} [1,12 + F(\varepsilon)]^4$$

Отримані співвідношення (5.1), (5.7) і (5.14) дають можливість записати ресурс N_P досліджуваної балки у вигляді

$$N_P = N_0 10^{-M W_x^{-1} \sigma_0^{-1}} + \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 (2H + h)}{\beta_1 K_{scc}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon \quad (5.15)$$

Для практичного застосування залежності (5.15), необхідно експериментально визначити характеристики матеріалу $N_0, \sigma_0, V_c, K_{scc}, K_{fC}, K_{II}, \beta_1$, а також геометричні параметри балки і її навантаження. Також у (5.15) входить величина малого порядку l_0 , яка порівнюється до розміру структурного параметру матеріалу [164]. Проте для практичних розрахунків, щоб зароджену тріщину вважати макроскопічною і

правомірно користуватися формулою (5.15), доцільно вибирати l_0 не менше двох міліметрів. В такому випадку обчислена величина N_P буде занижена, тобто отримана похибка зміститься в запас довговічності балки.

Наприклад, обчислюється довговічність $N = N_P$ тонкостінного елемента коритного профілю рамної металоконструкції з Ст 3 січенням $180 \times 80 \times 5$, що циклічно згинається моментом амплітудою M за схемою, зображеною на рис. 5.3. При цьому доцільно розглядати два випадки: навантаження відбувається на повітрі, а також в розчині нітрофоски як найбільш агресивному з позицій корозійно - втомної пошкоженості, розділ 3. В даному випадку розрахунок відбувається згідно (5.15). Механічні та втомні характеристики Ст 3, які знаходяться в (5.15), визначаються згідно даних розділу 3. В результаті цього дані характеристики запишуться:

при випробуваннях на повітрі

$$N_0 = 1,51 \cdot 10^8 \text{ цикли}, \beta_1 = 4,51 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, K_{fC} = 102 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}},$$

$$\sigma_0 = 120,18 \text{ МПа}, K_{th} = 12,81 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, R = 0,1;$$

при випробуваннях в розчині нітрофоски

$$\sigma_0 = 95,63 \text{ МПа}, N_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ цикли}, K_{fi} = 50 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, V_C = 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ м/цикли}$$

Знайдені характеристики отримано з аналізу кінетичних діаграм втоми, одержаних в розділі 3, частково зображених на рис. 5.4 і 5.5.

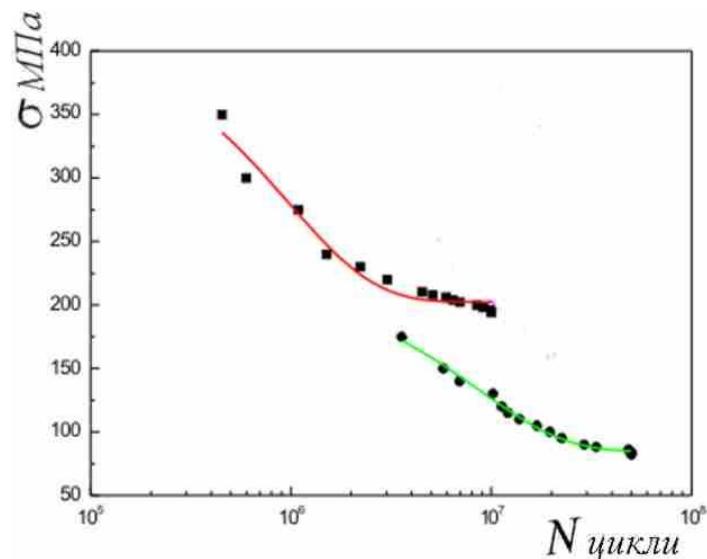


Рис. 5.4. Криві Велера Ст 3: повітря – ■; розчин нітрофоски - ●.

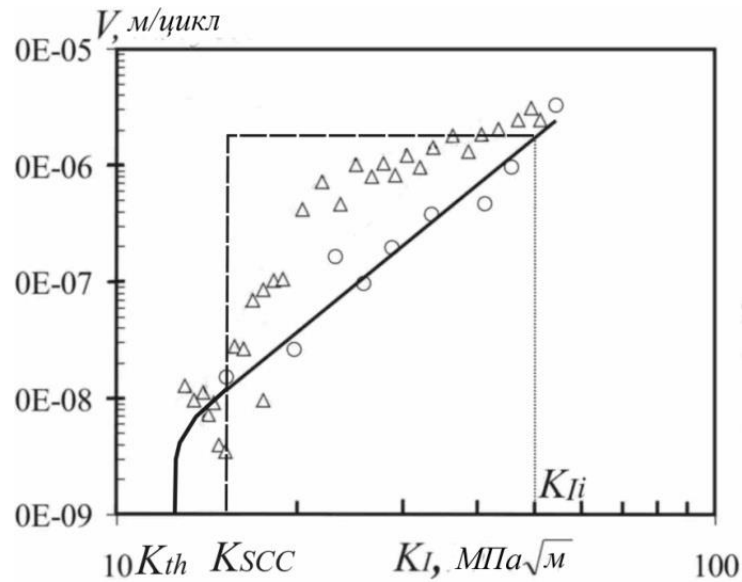


Рис. 5.5. Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин в Ст 3: повітря – о; розчин нітрофоски – ^.

На основі приведених даних, залежність (5.15) набуде шуканого вигляду для кожного випадку навантаження профілю на повітрі, а також у розчині нітрофоски:

повітря

$$N_p^{(II)} = 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/120,18} + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (5.16)$$

розчин нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/95,63} + 4,31 \cdot 10^5 (558,43\sigma^{-2} - 0,002) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (5.17)$$

$$\varepsilon_i = 1745,09\sigma^{-2}, \quad \varepsilon_* = 5513,66\sigma^{-2}.$$

При цьому величина l_i , яка є складовою (5.14), (5.15), знайдена з рівнянь $K_I(\varepsilon_i) = K_{II}$, $l_i = H\varepsilon_i$ і визначається наближено для даного випадку як $l_i \approx 558,43\sigma^{-2}$.

На основі (5.16) і (5.17), на рис. 5.6 побудовано графічні залежності довговічності $N = N_p$ досліджуваного профілю від максимального значення

амплітуди напружень σ в перетині $N_p^{(п)}$ - при випробуванні на повітрі і $N_p^{(к)}$ - при випробуванні в розчині нітрофоски.

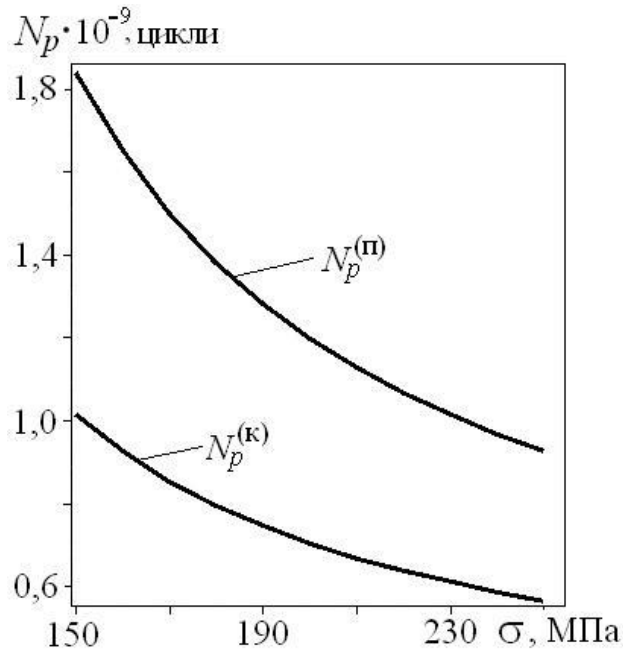


Рис. 5.6. Графічна залежність довговічності $N = N_p$ несучого елемента розкидача від рівня напружень σ : $N_p^{(п)}$ - повітря; $N_p^{(к)}$ - розчин нітрофоски.

Отже, дія розчину мінеральних добрив, зокрема нітрофоски, більше ніж на 80% зменшує ресурс профілю.

5.3. Визначення періоду докритичного росту тріщин у балкових несучих системах відкритих профілів металоконструкцій причіпних розкидачів добрив

Стандартизовано при виготовленні металоконструкцій причіпних розкидачів добрив найбільш поширеними несучими елементами є швелери, Z – подібні і Ω - подібні профілі (розділ 1). Довговічність несучої структури розкидача добрив лімітується ресурсом елементів, які найбільш навантажені і працюють в максимально агресивних середовищах. У зв'язку з цим, визначення

довговічності таких елементів описується залежністю (5.1) у якій період зародження корозійно - втомної тріщини N_3 визначається на основі інформації з кривих Велера. Обчислення періоду N_D докритичного росту досліджуваної тріщини для випадку металоконструкцій розкидачів добрив, які працюють при циклічних навантаженнях під дією агресивних середовищ математично ускладнено з причин недостатньої вивченості процесів.

Досліджуються балкові тонкостінні елементи металоконструкцій відкритого профілю, послаблених поверхневими прямолінійними тріщинами довжиною l_0 при дії циклічного згину. Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту тріщини $N = N_D$ (залишковий ресурс), тобто такої кількості циклів навантаження несучої конструкції, по досягненню якої тріщина виросте до величини $l = l_*$, експлуатувати конструкцію буде можливим винятково після усунення вказаного дефекту.

Розв'язок даної задачі реалізовано з допомогою математичних співвідношень (5.4), (5.5).

Згин тримкої балки Z - подібного профілю. Згідно розрахункової схеми, балка Z – подібного профілю з крайовою тріщиною навантажена згинальним моментом M (рис. 5.5). Для реалізації математичної моделі (5.4), (5.5) в даному випадку необхідно мати аналітичний опис коефіцієнта інтенсивності напружень як функції W_x . Осьовий момент опору поперечного перетину W_x знайдено на основі [175]

$$W_x = (6H)^{-1} [hH^3 - (h-t)(H-2t)^3]. \quad (5.18)$$

Для одержання математичної залежності прикладного науково – технічного типу досліджуються два випадки. Перший випадок – довжина тріщини l мізерно мала у порівнянні із іншими геометричними розмірами поперечного перетину Z – подібного профілю, відповідно, напружений стан в

околі вершини тріщини еквівалентний розтягу напруженнями σ напівнескінченної пластини з крайовою тріщиною (див. (5.11)).

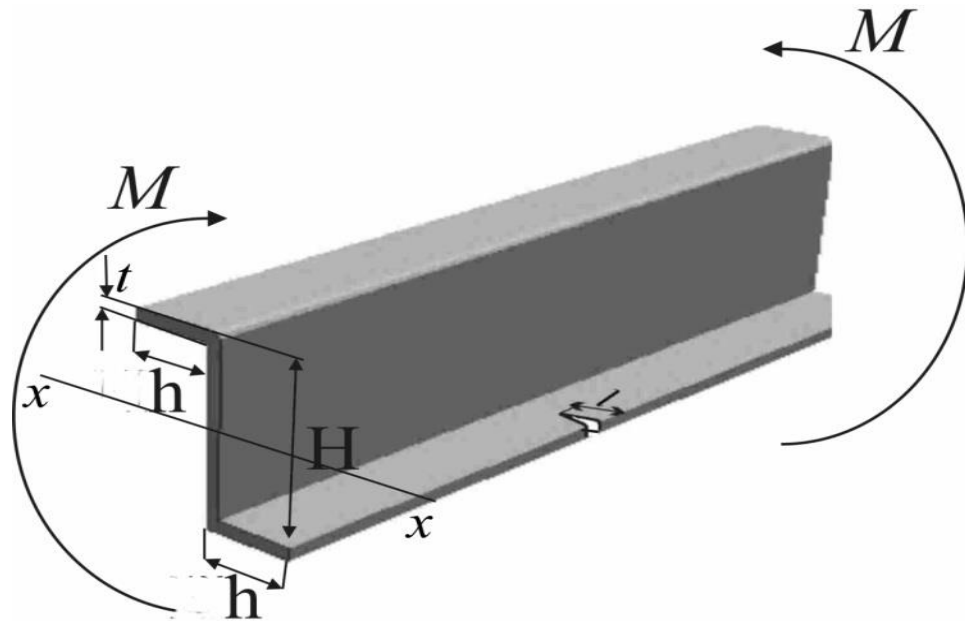


Рис. 5.5. Схема навантаження несучого лонжерона (балки Z – подібного перетину) розкидача добрив

Другий випадок – розміри тріщини такі, що її контур знаходиться в зоні близькій до нейтральної осі поперечного перетину, отже, для визначення КІН можна скористатися розв’язком задачі про згин моментом M полоси з крайовою тріщиною (5.12). Тоді, записавши невідому функцію $F_2(\varepsilon_2)$ у вигляді поліному з коефіцієнтами, які максимально наближають співвідношення для КІН у даних двох граничних випадках, отримаємо залежність для K_I

$$K_I = \sigma \sqrt{2h} \sqrt{\pi \varepsilon_2} [1,12 + F_2(\varepsilon_2)], \quad (5.19)$$

$$F_2(\varepsilon_2) = 0,52 \sqrt{\varepsilon_2} (1 + 6,42 \varepsilon_2^2 - 6,53 \varepsilon_2^3 + 5,86 \varepsilon_2^4), \quad \varepsilon_2 = l_0 (2h + H)^{-1}$$

Підставивши (5.19) в рівняння (5.4) і проінтегрувавши його в межах початкових і кінцевих умов (5.5), в результаті, для визначення періоду докритичного росту тріщини $N = N_D^{(1)}$ отримується наступна залежність

$$N_{\mathcal{D}}^{(1)} = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 (H + 2h)}{\beta_1 K_{th}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_* = \frac{l_*}{2h + H}, \quad \varepsilon_i = \frac{l_i}{2h + H}, \quad (5.20)$$

$$f_1(\varepsilon) = \frac{\pi \sigma^2 \varepsilon (2h + H)}{K_{fC}^2} [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2 \sigma^4 \varepsilon^2 (2h + H)^2}{K_{th}^4} [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$

Одержані співвідношення (5.1), (5.3) і (5.20) дають можливість записати ресурс N_P досліджуваної балки у вигляді

$$N_P = N_0 10^{-\sigma/\sigma_0} + \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 (H + 2h)}{\beta_1 K_{th}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon. \quad (5.21)$$

Для проведення розрахунків за (5.21), необхідно експериментально визначити характеристики матеріалу $N_0, \sigma_0, V_c, K_{th}, K_{fC}, K_{fi}, \beta_1$, геометричні параметри балки, її навантаженість. Також у (5.21) є величина l_0 , яка має відносно малий порядок, порівнюваний до порядку розміру структурного параметру матеріалу [164]. Для практичних розрахунків за (5.21) необхідно розглядувану зароджену тріщину привести до макроскопічних розмірів, довжина l_0 приймається не менше двох міліметрів. В такому випадку розрахована величина N_P буде занижена, отримана похибка зміститься в запас довговічності [164].

Розглянемо розрахунок довговічності $N = N_P$ балки Z – подібного профілю лонжерону розкидача добрив типу ПРТ, матеріал - Ст 3, геометричні розміри поперечного перетину $200 \times 60 \times 5$, металокопструкція згинається циклічно моментом амплітудою M за схемою рис. 5.5. При цьому, доцільно розглянути три випадки: навантаження балки відбувається на повітрі, при дії розчину нітрофоски, у змішаній гноївці (1/2 ВРХ + 1/2 свиняча). В даному випадку розрахунок проводиться за (5.21). Механічні та втомні характеристики Ст 3 в (5.21) визначаються згідно даних розділу 3. В результаті, шукані характеристики запишуться:

при випробуваннях на повітрі

$$\begin{aligned} N_0 &= 1,51 \cdot 10^8 \text{ цикли}, \beta_1 = 4,51 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, K_{fC} = 102 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \\ \sigma_0 &= 120,18 \text{ МПа}, K_{th} = 12,81 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, R = 0,1; \end{aligned} \quad (5.22)$$

при випробуваннях в розчині мінерального добрива (нітрофоска)

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 95,63 \text{ МПа}, N_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ цикли}, K_{ii} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \\ V_C &= 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ м/цикл}, \end{aligned} \quad (5.23)$$

при випробуваннях в змішаному органічному добриві, гноївці

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 121,56 \text{ МПа}, N_0 = 1,44 \cdot 10^8 \text{ цикли}, \beta_1 = 4,81 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, l_i = l_0, \\ V_C &\approx 0, K_{th} = 11,21 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, R = 0,1, K_{fC} = 101 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Дані характеристики отримано з аналізу кінетичних діаграм втоми, одержаних в розділі 3 і частково зображених на рис. 5.6-5.8.

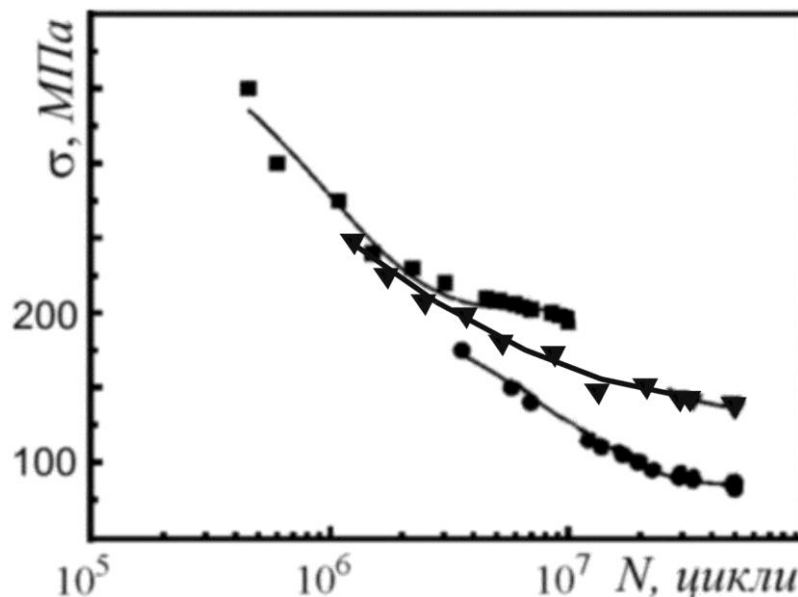


Рис. 5.6. Криві Велера Ст 3 в середовищах: повітря – ■; розчин нітрофоски – ●; змішана гноївка – ▲.

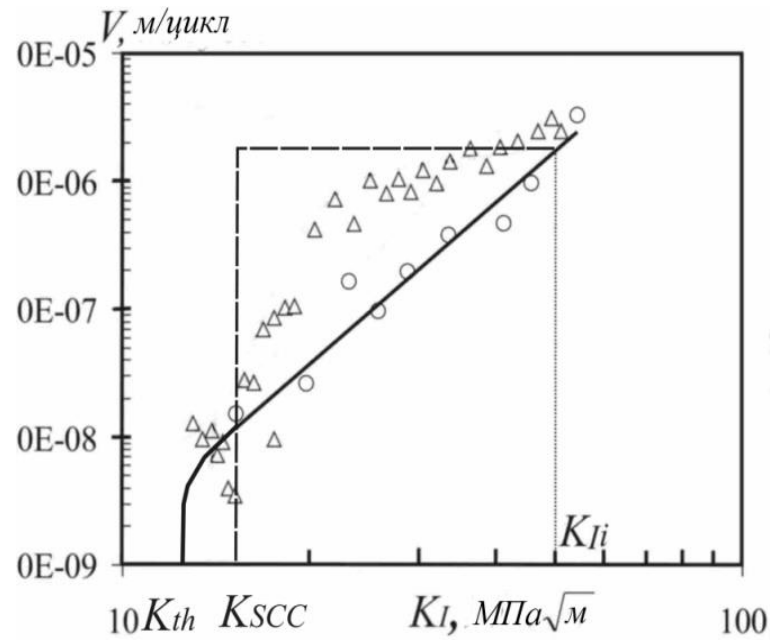


Рис. 5.7. Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин у Ст 3, середовища:
повітря – о; розчин нітрофоски – ^.

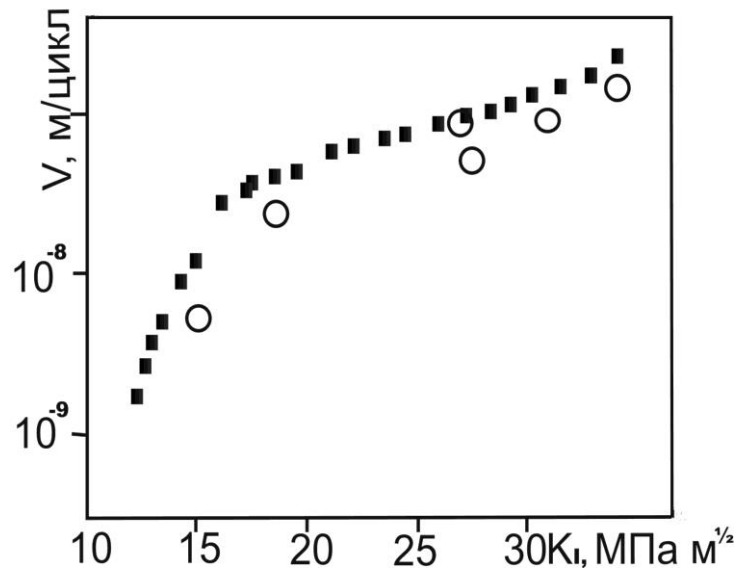


Рис. 5.8. Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин в Ст 3:
повітря – 0; змішана гноївка – ■.

На основі експериментальних даних (5.22)-(5.24), формула (5.21) для кожного випадку навантаження балки Z – подібного профілю на повітрі, в розчині нітрофоски і змішаній гноївці набуде наступного вигляду:

на повітрі

$$N_p^{(II)} = 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/120,18} + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (5.25)$$

в розчині нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/95,63} + 4,31 \cdot 10^5 (558,43\sigma^{-2} - 0,002) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (5.26)$$

$$\varepsilon_i = 1745,09\sigma^{-2}, \quad \varepsilon_* = 5513,66\sigma^{-2}.$$

в змішаній гноївці

$$N_p^{(\Gamma)} = 1,44 \cdot 10^{8-\sigma/121,56} + 6,5 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (5.27)$$

$$f_1(\varepsilon) = 9,66 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = 3,75 \cdot 10^{-5} \sigma^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4,$$

$$f_3(\varepsilon) = 9,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_4(\varepsilon) = 6,40 \cdot 10^{-5} \sigma^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4$$

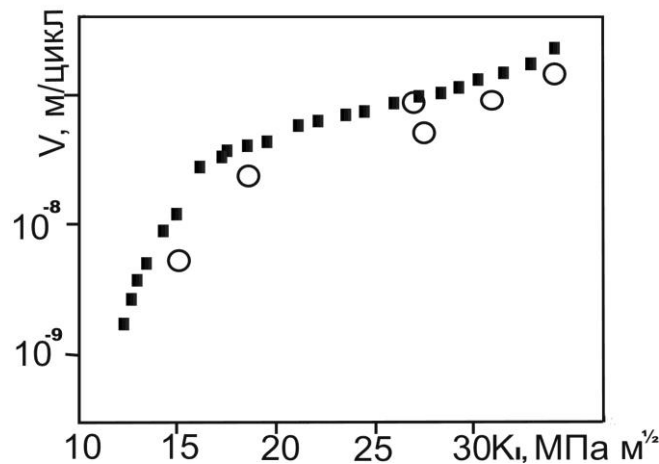


Рис. 5.8. Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин в Ст 3: повітря – 0; змішана гноївка – ■.

При цьому, величина l_i - складова формул (5.21), (5.26) знайдена з рівнянь $K_I(\varepsilon_i) = K_{II}$, $l_i = (H + 2h)\varepsilon_i$ і визначається наближено для даного випадку як $l_i \approx 558,43\sigma^{-2}$. На основі формул (5.25)-(5.27), побудовано графічні залежності довговічності $N = N_p$ балки Z- подібного профілю від

максимального значення амплітуди σ напружень в січенні у середовищах: 1 - повітря, 2 – розчин нітрофоски, 3 (пунктир) – змішана гноївка, рис. 5.9.

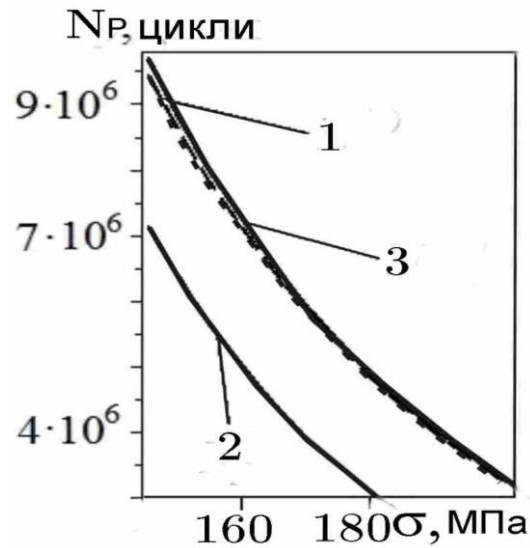


Рис.5.9. Графічна залежність довговічності $N = N_p$ балки Z- подібного профілю від напружень σ в середовищах: 1 - повітря; 2 - розчин нітрофоски; 3 (пунктир)- змішана гноївка.

З порівнянь графіків, зображених на рис.5.9, корозійне середовище розчину нітрофоски значно понижує довговічність балки Z - подібного профілю.

Балка Ω - подібного профілю. Несучий елемент Ω - подібного профілю (рис. 5.10) як складова металоконструкції рами розкидача, утворений з двох зварених у верхній частині балок Z – подібних перетинів. Дані балки поширені у несучих конструкціях 3-го класу: с/г транспортних засобах, причіпних розкидачах добрив, зокрема типів РТД, ПРТ, ін. Досліджуваний тонкостінний тримкий елемент при виконанні технологічного процесу внесення добрив циклічно навантажується моментом M у корозійно - агресивних середовищах. Задача полягає у визначенні ресурсу N_p даного елемента, тобто такої кількості циклів навантажень, в результаті чого у нижніх полицях зародяться симетрично дві корозійно-втомні тріщини (рис. 5.10), які повністю перетнуть полиці.

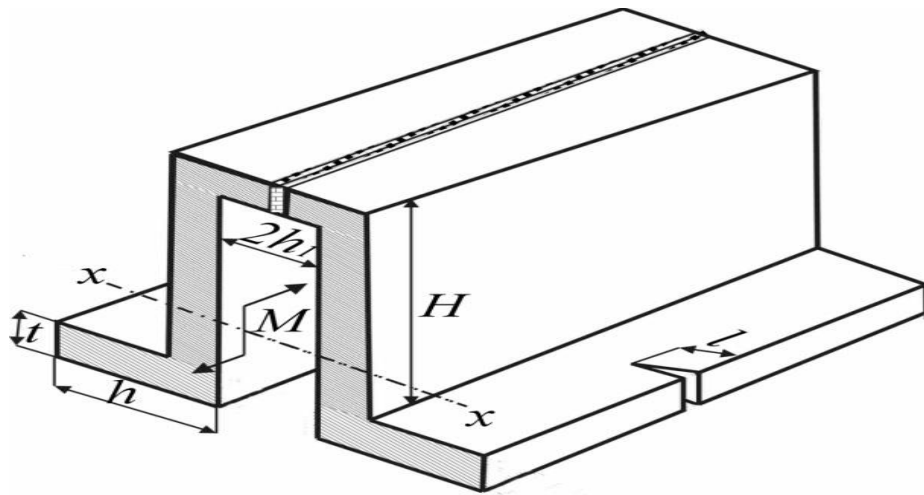


Рис. 5.10 Схема навантаження Ω - подібної балки з тріщиною

Розв'язок задачі відбувається шляхом окремих обчислень складових N_3 і N_d . Величина N_3 досліджується на основі (5.3), а N_d - розв'язуючи аналітичну модель (5.4), (5.5). В даному випадку, для реалізації математичної моделі (5.4), (5.5) необхідно дослідити аналітичний запис коефіцієнта інтенсивності напружень як функції осевого моменту опору W_x . Момент опору поперечного перерізу при згині W_x [175]

$$W_x = 2(6H)^{-1}[hH^3 - (h-t)(H-2t)^3]. \quad (5.28)$$

Разом з тим, коефіцієнт інтенсивності напружень буде визначатися через напруження σ на основі (5.19), причому в даній формулі величину σ знаходимо з допомогою співвідношень (5.6) і (5.28). Очевидно, ресурс N_p для даного балкового елемента буде також визначатися, як і в попередньому випадку, на основі співвідношення (5.21) з врахуванням даних (5.22)-(5.24), що в свою чергу призведе до співвідношень (5.25)-(5.27). Результати обчислень співвідношень (5.25)-(5.27) графічно зображено на рис. 5.9.

З рис. 5.9, при розглядуваних фактичних навантаженнях (величина σ) несучих балкових елементів, їхня довговічність N_p є добра. Проте їхня

залишкова довговічність N_D при наявності тріщини початкової довжини l_0 може бути відносно малою величиною у залежності від значення l_0 , що суттєво скорочує термін експлуатації рамної металоконструкції с/г машини. У зв'язку з цим, визначення залишкового ресурсу балкових елементів з тріщинами має важливий самостійний характер. З цих причин, для розглядуваного несучого елемента Ω - подібного профілю з двома симетричними тріщинами (рис. 5.10) необхідно знайти залишковий ресурс N_D . Обчислюється ресурс центральної балки розкидача РТД з січенням $200 \times 60 \times 5$ виготовленої з Ст 3 під дією циклічного згину за схемою, рис. 5.10, з амплітудою M , яка викликає в крайніх волокнах максимальне напруження амплітудою $\sigma = 188$ МПа. При цьому розглядаються три середовища навантаження: повітря, розчин нітрофоски, змішана гноївка. Розв'язок даної задачі здійснюється шляхом реалізації математичної моделі (5.4), (5.5) з врахуванням співвідношень (5.22)-(5.24).

В результаті цього, для визначення залишкового ресурсу N_D отримано наступні формули з урахуванням агресивних середовищ впливу:

повітря

$$N_D^{(П)} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (5.29)$$

розчин нітрофоски

$$N_D^{(Н)} = 1,37 \cdot 10^5 (0,049 - \varepsilon_0) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,049}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad 0,056 > \varepsilon_0 > 0,00625, ,$$

$$N_D^{(H)} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon \quad 0,23 > \varepsilon_0 > 0,049, \quad (5.30)$$

гноївка змішана

$$N_D^{(\Gamma)} = 6,5 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,141} \frac{1 - f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (5.31)$$

$$f_1(\varepsilon) = 3,41\varepsilon[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = 4,68 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4,$$

$$f_3(\varepsilon) = 3,48\varepsilon[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_4(\varepsilon) = 7,99 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4$$

На основі аналітичних залежностей (5.29)-(5.21), побудовано графіки залишкового ресурсу балки Ω - подібного профілю як функції початкової довжини тріщини ε_0 , рис. 5.11

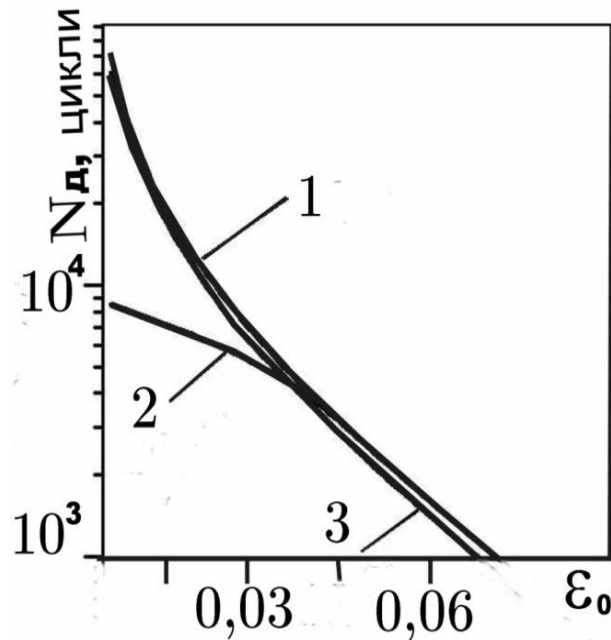


Рис. 5.11. Графічні залежності залишкової довговічності N_D несучої балки

Ω - подібного профілю від початкової довжини тріщини у середовищах:

1 - повітря; 2 - розчин нітрофоски; 3 - змішана гноївка.

Отже, з рис. 5.11, розчин нітрофоски може понизити залишкову довговічність балки Ω - подібного профілю майже на порядок порівняно з дослідженнями в середовищі повітря.

Оцінка ресурсу несучого елемента швелерного перетину. В металоконструкціях несучих систем розкидачів застосовуються холодно гнуті і

гарячекатані швелери (розкидачі РТД, ПРТ, МЖТ, ін.). Максимальні напруження розтягу в поперечному перерізі даних елементів при деформаціях згину обчислюються на основі (5.6). Отже, такий елемент розглядається як балка, поперечний переріз якої – швелер, що згинається циклічно моментом M (рис. 5.12). Геометричні параметри січення балки зображено на рис. 5.12. Задача полягає у визначенні довговічності розглядуваної балки $N = N_p$.

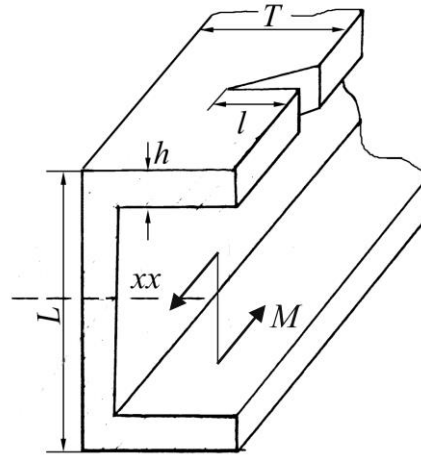


Рис. 5.12. Схематизація навантаженості швелерної балки з дефектністю

На основі праць Рибак Т.І., Підгурського М.І., досліджується, що в результаті циклічного згину в даній балці спочатку зароджується тріщина довжиною l_0 (період зародження тріщини N_3) яка розвивається до критичної (довжиною $l = l_*$ при періоді докритичного росту N_d). Отже, аналогічно до попередніх випадків, реалізація розглядуваної задачі відбувається на основі співвідношень (5.1), (5.3) - (5.5). В результаті, для визначення довговічності балки N_p отримано формулу

$$N_p = N_0 10^{-\sigma/\sigma_0} + V_c^{-1} (l_i - l_0) + \int_{l_i}^{l_*} \frac{(K_{fc}^2 - K_{I_{\max}}^2) dl}{\beta_1 (1-R)^4 (K_{I_{\max}}^4 - K_{th_{\max}}^4)}. \quad (5.32)$$

Для обчислення $N = N_p$ за залежністю (5.32) на першому етапі необхідно знайти K_I . З причини складної конфігурації поперечного перетину

розв'язок задач вказаного типу з пов'язаний з значними труднощами. Тому КІН наближено буде визначатись аналогічно попередніх припущень, розглядаючи перетин тримкого елемента як прямокутної металічної полоси яка має ту ж товщину h і той же момент опору поперечного перетину W_x при згині, що і швелер з тріщиною [175]. При цьому, момент W_x стандартного швелера при згині знаходиться на основі результатів [175] і визначається за формулою

$$W_x = \frac{(L + 5)^3}{81} \quad (5.33)$$

Тоді КІН буде визначатися згідно (5.12)

$$K_I = \sigma \sqrt{2T + L} \sqrt{\pi \varepsilon_2} [1,12 + F_1(\varepsilon_2)], \quad \varepsilon_2 = l / (2T + L), \quad (5.34)$$

Напруження σ обчислюються на основі (5.6) і (5.33). Функція $F_1(\varepsilon_2)$ знаходиться з співвідношення (5.19). Досліджується ресурс лонжерону: швелера перетином $180 \times 80 \times 5$ з Ст 3 розкидачів типів ПРТ, РТД при навантаженнях на повітрі, в розчині нітрофоски і в змішаній гноївці. Механічні та втомні характеристики (5.32) для Ст 3 визначаються згідно одержаних в розділі 3 експериментальних даних за виразами (5.22)-(5.24). Обчислюючи величину N_P за формулою (5.32) з врахуванням співвідношень (5.6), (5.19), (5.22)-(5.24), (5.33) і (5.34), побудовано графічні залежності $N_P \sim \sigma$ для вище згаданих трьох середовищ. Вони корелюють з представленими на рис. 5.9 при $2h + H \approx 2T + L$ з похибкою $\pm 6\%$. Це пояснюється тим, що конфігурація перерізу балок є складовою формул для визначення σ , а самі балки при аналітичних дослідженнях, згідно з рекомендаціями [175] розглядувались як полоси з тріщинами однієї товщини і моменту опору поперечного перетину при згині W_x , що і досліджувалися балки.

5.4. Визначення ресурсу замкнених профілів несучих структур в робочих середовищах при циклічних згинальних навантаженнях

Згідно рекомендацій нормативних документів [256] відомо, несучі металоконструкції машин для хімічного захисту в рослинництві, причіпних розкидачів добрив виготовляються з застосуванням труб прямокутних і круглих. В результаті дії експлуатаційних факторів (змінні в часі навантаження, корозійно - агресивні середовища) в таких елементах з'являються поверхневі корозійні пітінги, виразки та їх системи (рис. 5.13) які є концентраторами напружень: поблизу зароджуються корозійно-втомні дефекти.

Період зародження дефектів визначається з врахуванням (5.3) наступним чином

$$N_3 = N_0 10^{-\beta_0 \sigma \sigma_0^{-1}}, \quad (5.35)$$

де β_0 - коефіцієнт концентрації напружень біля корозійного дефекту; σ_0, N_0 - характеристики матеріалу у робочих середовищах (з діаграм Велера).

Складніше для описаного випадку розв'язується задача визначення періоду докритичного росту тріщин.

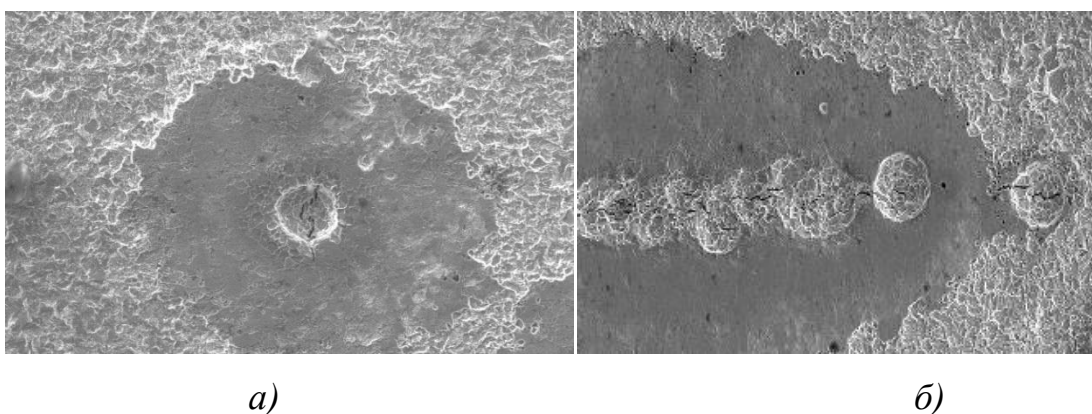


Рис. 5.13. Утворення на поверхнях корозійного пітінгу: а - з поверхневого включення; б- ланцюг пітінгів з мікротріщинами в корозійній каверні [8]

Квадратна труба з тріщинами. Розглянемо один з видів балки закритого профілю - прямокутну трубу, яка працює на згин. На основі [8], виконується ряд припущень: вважається, що на поверхні такої труби утворився корозійний пітінг, біля якого зародилася півкругова корозійно-втомна тріщина діаметром $2l_0$ значно більша від діаметра напівкульового пітінгу (рис. 5.14). При цьому вважаємо [8], що найбільший діаметр поверхневого напівкульового пітінгу не перевищує 1мм. Тоді, як і попередньо, вважаємо, що діаметр $2l$ півкругової тріщини наближено дорівнюватиме 2мм.

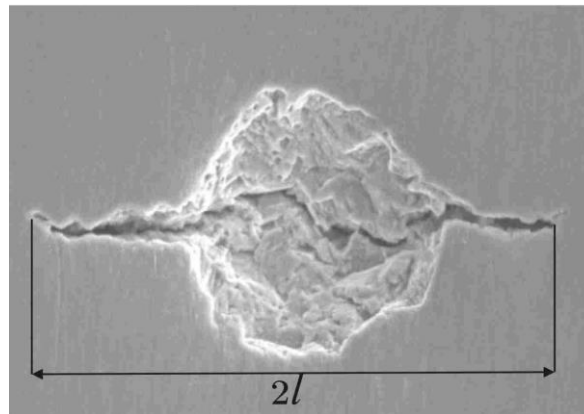


Рис. 5.14. Утворення корозійної тріщини з пітінгу [18]

Згідно експлуатаційних даних, найбільш поширеними дефектами в тримких металоконструкціях рам, утримувачів робочих органів розкидачів мінеральних і органічних добрив, ін. є втомні поперечні тріщини наступних типів: півеліптична поверхнева тріщина в стінці (рис. 5.15); наскрізна тріщина (рис.5.18); складна тріщина, що займає повністю одну з стінок і частину двох інших (рис. 5.19). Тоді період вичерпання ресурсу балкового елемента прямокутного профілю рамної конструкції можна записати наступним чином: спочатку за період N_z (рис. 5.14, 5.15) зароджується поверхнева тріщина, далі вона за період $N_D^{(1)}$ (рис. 5. 18) росте наскрізь стінки труби, потім така тріщина за період $N_D^{(2)}$ набуває складної конфігурації (рис. 5.19), після чого тріщина складної конфігурації за період $N_D^{(3)}$ досягає критичного розміру, спричиняючи повне руйнування розглядуваного несучого балкового елемента.

Таким чином, ресурс балкового елемента прямокутного профілю визначається за залежністю

$$N_P = N_3 + N_D^{(1)} + N_D^{(2)} + N_D^{(3)} \quad (5.36)$$

Величина N_3 визначається за формулою (5.3), інші компоненти залежності (5.36) досліджуються складніше окремо, методику їхнього визначення розроблено нижче.

Півеліптична тріщина. Розглянемо поверхневу тріщину у формі півеліпса з півосями a , b , розміщену в нижній стінці балки (рис. 5.15). Так як профіль балки є тонкостінним, товщина стінки t мала в порівнянні з розмірами перетину, виникаючі при її згині напруження в горизонтальній

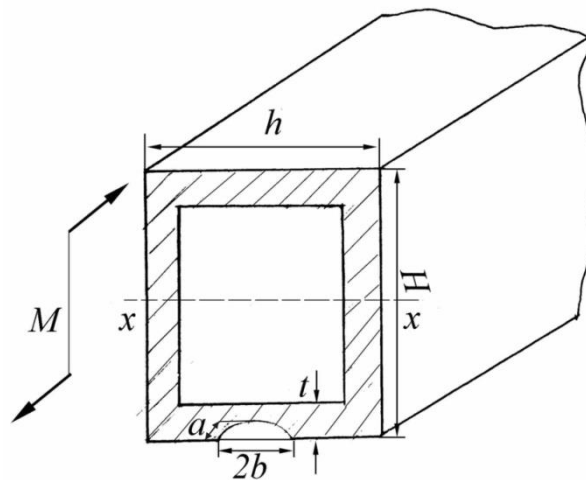


Рис. 5.15. Схема навантаження прямокутної труби з поверхневою півеліптичною тріщиною

стінці близькі до постійних і мають значення:

$$\sigma = \frac{HM}{2I}, \quad (5.37)$$

де M – згинальний момент; $I = (H^3 h - c_1^3 d_1)/12$ – момент інерції перетину відносно нейтральної осі xx ; $c_1 = H - 2t$; $d_1 = h - 2t$; H , h – відповідно, висота і ширина сечення.

Визначимо для даного випадку кількість циклів навантаження $N = N_D^{(1)}$, по досягненню якого тріщина проникне через стінки балки і стане наскрізною, тобто період докритичного росту тріщини. На основі формули (5.4) і результатів робіт [42, 163] розглядувана задача приводиться до розв'язування нелінійного диференціального рівняння в часткових похідних

$$V = V_c, K_{scc} < K_{I_{\max}} \leq K_{li};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial N} = \frac{\beta_1 (1-R)^4 \sqrt{1 + \rho^{-2} (\partial \rho / \partial \theta)^2} (K_{I_{\max}}^4 - K_{th}^4)}{K_{fc}^2 - K_{I_{\max}}^2}, K_{li} < K_{I_{\max}} < K_{fc}, \quad (5.38)$$

при початкових і кінцевих умовах $N = 0, \rho(0, \pi/2) = a_0; N = N_D^{(1)}, a(N_D^{(1)}) = t$.

Вважається, що критичний розмір тріщини a_* більший t , тобто $a_* \gg t$.

Розв'язок математичної задачі (5.38) пов'язаний із значними математичними труднощами. З цієї причини, дана задача розв'язується наближено, використовуючи відомий [42] інтегральний підхід, згідно якого зміна площі втомної тріщини при однорідному циклічному розтягу буде незначно залежати від конфігурації її контуру і тому її можна замінити півколовою конфігурацією при еквівалентній площі і постійному коефіцієнті інтенсивності напружень, тобто математична задача (5.38) заміниться наступною

$$V = V_c, K_{scc} < K_{I_{\max}} \leq K_{li};$$

$$d\rho/dN = \beta_1 (1-R)^4 [K_{I_{\max}}^4 - K_{th}^4] / (K_{fc}^2 - K_{I_{\max}}^2), K_{li} < K_{I_{\max}} < K_{fc} \quad (5.39)$$

при початкових і кінцевих умовах

$$N = 0, \rho(0) = \rho_0 = \sqrt{a_0 b_0}; N = N_D^{(3)}, \rho(N_D^{(3)}) = t. \quad (5.40)$$

де a_0, b_0 - початкові значення величин півосей еліптичної тріщини.

Шукана величина $K_{I_{\max}}$ визначається нижче наступним чином.

Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень. Знаходження величини K_I для тріщини довільної форми з довільним розривним навантаженням на її поверхні є складною проблемою, яка не може бути ефективно розв'язана прямими числовими методами. Отже, доцільно розділити дану проблему на два етапи. Перший етап полягає в знаходженні КІН для тіла розглядуваної геометрії з тріщиною заданої конфігурації при відносно простому виді навантаження.

Для двохмірних задач широко розроблені методи, які базуються на теорії аналітичних функцій (конформне відображення, інтеграл типу Коші, сингулярні інтегральні рівняння, перетворення Фур'є, ін.) [154, 168, 264, 265].

Для трьохмірних задач аналітичні методи (інтегральні перетворення, інтегральні рівняння і інші) обмежені, так як дозволяють проводити розрахунок винятково для достатньо вузького класу задач (необмежене тіло, осесиметричні задачі, та інші) [41, 281, 302]. Тому для трьохмірних задач ефективно розвиваються методи скінчених елементів (МСЕ) [29, 151, 278], методи граничних елементів (МГЕ) [21, 127], а також змішані методи [127]. Оскільки значення КІН використовується при розрахунках міцності і довговічності, важливо мати аналітичні вирази для КІН. Для поверхневої півеліптичної тріщини в пластині при розтягу і згині такі формули побудовано [68, 242].

Другим етапом по знаходженню КІН є розробка методів розрахунку K_I при складному навантаженні на тріщині, що базуються на відомому значенні K_I при простому навантаженні. Класичним в даному відношенні є метод вагових функцій [5]. Крім того використовуються інтерполяційні методи [162, 310], а також різні інженерні наближення [310].

В дисертації розроблено ефективний метод наближеного обчислення КІН при довільному навантаженні на поверхні тріщини. Необхідно відмітити, що цей метод можна ефективно застосовувати до двомірного навантаження на поверхні тріщини, коли використання методу вагових функцій приводить до значних ускладнень. З іншої сторони існуючі інтерполяційні наближення для поверхневої півеліптичної тріщини [310] носять обмежений характер. Точність

запропонованого методу підтверджується узгодженням з відомими результатами, коли довільне навантаження приймає прості часткові випадки.

Коефіцієнт інтенсивності напружень для поверхневої півеліптичної тріщини при розтягу і згині. Першим наближенням такої задачі є КІН для еліптичної тріщини в нескінченному тілі, яке знаходиться під дією однорідного розтягуючого напруження. На основі асимптотичного представлення напружень в околі фронту еліпсоїдальної порожнини, отримано аналітичний вираз для КІН [16]

$$K_{I(ен)} = \sigma (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\pi a} / E(k) \quad (k^2 = 1 - a^2/b^2) \quad (5.41)$$

де a, b - відповідно, мала і велика півосі еліпса, θ - кутовий параметр; який заданий рівнянням (див. рис. 5.16)

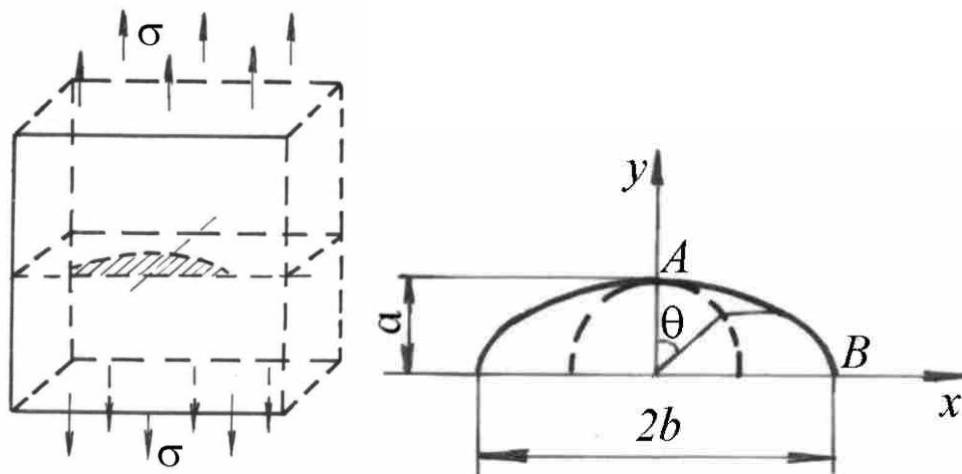


Рис. 5.16. Півеліптична тріщина в півпросторі

$$\begin{cases} x = b \sin \theta; \\ y = a \cos \theta; \end{cases} \quad (5.42)$$

$E(k)$ – еліптичний інтеграл другого роду

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (5.43)$$

Замість точної залежності (5.43) дозволяється використовувати наближені вирази [16, 310]:

$$E(k) = (1 - 0,36 a/b)^{-1}, \quad a/b \leq 1, \quad (5.44)$$

$$E^2(k) = 1 - 1,464(a/b)^{1,65}, \quad a/b \leq 1, \quad (5.45)$$

які забезпечують точність, відповідно, до 1% і 0,13%.

Для поверхневої півеліптичної тріщини в пластині товщиною t , яка розтягується однорідним напруженням (рис.5.16), можна представити у вигляді

$$K_I = K_{I(ел)} \cdot M_{1,2} \left(\frac{a}{h}, \frac{a}{b}, \theta \right) \quad (5.46)$$

де $K_I(ел)$ – визначається за формулою (5.29); $M_{1,2}$ – коефіцієнт впливу вільних поверхонь.

За результатами розрахунку методом скінчених елементів побудовано наближені формули для КІН [21] (з узгодженням 5%)

$$K_I = \sigma_p \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} M \left(\frac{a}{b}, \frac{a}{h}, \theta \right), \quad (5.47)$$

$$\text{Де } M \left(\frac{a}{b}, \frac{a}{h}, \theta \right) = M_{1,2} \cdot f_w \cdot f_\theta, \quad (5.48)$$

$$\begin{cases} M_{1,2} = \left(M_1 + M_2 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right) g, \\ M_1 = 1,13 - 0,09 a/b, \\ M_2 = -0,54 + 0,89 / (0,2 + a/b), \\ M_3 = 0,5 - 1 / (0,65 + a/b) + 14(1 - a/b)^{24}. \end{cases} \quad (5.49)$$

$$g = 1 + \left(0,1 + 0,34 \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right) (1 - \cos \theta)^2, \quad (5.50)$$

$$f_\theta = \left(\cos^2 \theta + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \sin^2 \theta \right)^{1/4}, \quad (5.51)$$

$$f_w = \left(\sec \left(\frac{\pi b}{2W} \sqrt{a/h} \right) \right)^{1/2}. \quad (5.52)$$

де $2W$ – ширина пластини.

В роботі [242] для даного випадку запропоновано більш компактний вираз (узгодження 6%)

$$\begin{aligned} M_{1,2} \left(\frac{a}{h}, \frac{a}{b} \right) &= E(k) \left(\frac{a}{b} \right)^{-\frac{1}{2}} - \left[E(k) \left(\frac{a}{b} \right)^{-\frac{1}{2}} - M_1 \left(\frac{a}{b}, 0 \right) \right] \times \\ &\times \exp \left[-1,48 \left(\frac{a}{h} \right)^2 / \left(1 + 6 \left(\frac{a}{b} \right)^3 \right) \right], \\ M_1 \left(\frac{a}{b}, 0 \right) &= 1 + 0,12 \left(1 + (a/b)^2 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (5.53)$$

$$g = 1 + \left(0,1 + 0,53 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \right) (1 - \cos \theta)^2.$$

$$f_w = 1 + \left(\frac{a}{h} \right)^2 \left(\frac{b}{W} \right)^2 = 1 + 0,25 \left(\frac{4S}{\pi S_1} \right)^2,$$

де S – площа тріщини, S_1 – бруто-площа в січенні тріщини.

Коефіцієнт інтенсивності напружень для півеліптичної тріщини в пластині при розтязі і згині згідно [26] можна оцінити за наступним виразом

$$K_I = \left(1 + H \frac{\sigma_3}{\sigma_p} \right) K_{I(\text{розт.})} \quad (5.54)$$

де σ_p – напруження розтягу; σ_3 – максимальне напруження згину $3M/(Wh^3)$; W – ширина пластини, $K_{I(\text{розт.})}$ – КІН для пластини, яка розтягується, визначається виразом (5.47); функція H визначається наступною формулою

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \cos^p \theta \quad (5.55)$$

$$p = 0,2 + a/b + 0,6a/h \quad (5.56)$$

$$\begin{cases} H_1 = 1 - 0,34 \frac{a}{h} - 0,11 \frac{a}{b} \left(\frac{a}{h} \right), \\ H_2 = 1 + G_{21} \left(\frac{a}{h} \right) + G_{22} \left(\frac{a}{h} \right)^2. \end{cases} \quad (5.57)$$

$$\begin{cases} G_{21} = -1,12 - 0,12 \frac{a}{b}, \\ G_{22} = 0,55 - 1,05 \left(\frac{a}{b} \right)^{0,75} + 0,47 \left(\frac{a}{b} \right)^{1,5}. \end{cases} \quad (5.58)$$

Метод розрахунку КІН для складного навантаження: при інтегральних параметрах навантаження на тріщині.

Нехай поверхневу тріщину, за формою близькою до півеліптичної, яка міститься в пластинчатому елементі, навантажена на поверхні змінним напруженням $\sigma_{zz}(x, y)$ (рис. 5.17).

Введемо наступні інтегральні характеристики геометрії тріщини і навантаження: S – площа тріщини; l – довжина тріщини на поверхні пластини:

$P = \int_S \sigma_z(x, y) dS$ – головний вектор напружень на тріщині $\sigma_z(x, y)$;

$M_x = \int_S \sigma_z(x, y) y dS$ – головний момент напружень $\sigma_z(x, y)$ відносно осі Ox ;

$M_y = \int_S \sigma_z(x, y) x dS$ – головний момент напружень $\sigma_z(x, y)$ відносно осі Oy .

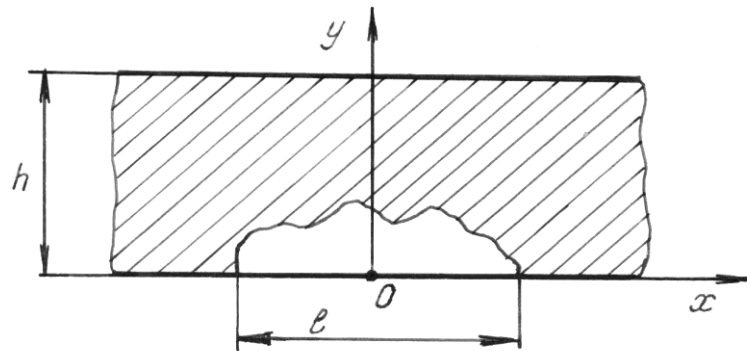


Рис. 5.17 Приклад тріщини складної конфігурації в стінці труби

Вважаємо, навантаження симетричне відносно осі Oy . Тоді $M_y = 0$.

Існуючі наближені інженерні оцінки [20, 156] полягають у розгляді моделі для поверхневої півеліптичної тріщини і прийняттям до уваги напруження на поверхні пластини та у найглибшій точці, або значення напружень в певних умовних точках. Такі наближення допустимі при незначному градієнті напружень, або при розподілі напружень, близькому до лінійного. В більш складному випадку доцільно звернутися до інтегральних параметрів навантаження на тріщині: P, M_x, M_y .

Як узагальнення існуючих інженерних оцінок сформулюємо наступний принцип: для визначення КІН тріщини складної форми з довільним навантаженням $\sigma_y(x, y)$ (обов'язково симетричним відносно осі Oy) розглядається модельна задача розтягу і згину пластини з поверхневою тріщиною з півосями

$$\left\{ a = \frac{4S}{\pi d}, b = l/2, \right. \quad (5.59)$$

на берегах якої діють такі напруження

$$\sigma(y) = \sigma_p + \sigma_3(1 - 2y/h), \quad (5.60)$$

що зберігаються інтегральні параметри P і M_x , тобто виконуються умови

$$\begin{cases} \int_S \sigma_p + \sigma_3(1 - 2y/h) dS = P, \\ \int_S \sigma_p + \sigma_3(1 - 2y/h) y dS = M_x. \end{cases} \quad (5.61)$$

Очевидно, з умов (5.61), параметри модельного навантаження σ_p та σ_3 визначаються однозначно

$$\begin{cases} j_0 \sigma_p + \left(j_0 - \frac{2}{h} j_1 \right) \sigma_3 = P, \\ j_1 \sigma_p + \left(j_1 - \frac{2}{h} j_2 \right) \sigma_3 = M_x. \end{cases} \quad (5.62)$$

$$\text{де } j_i = \int_S y^i dS, \quad i = 0, 1, 2.$$

Розв'язком даної системи будуть вирази

$$\begin{cases} \sigma_p = \frac{2j_2 - j_1 h}{2(j_2 j_0 - j_1^2)} P + \frac{j_0 h - 2j_1}{2(j_2 j_0 - j_1^2)} M_x, \\ \sigma_3 = \frac{j_1 h}{2(j_0 j_2 - j_1^2)} P - \frac{j_0 h}{2(j_0 j_2 - j_1^2)} M_x. \end{cases} \quad (5.63)$$

Якщо розглянути поверхню тріщини як напівеліпс, то параметр j_0, j_1, j_2 – зручно вираховується через значення півосей цієї тріщини [258]:

$$j_0 = \pi a b / 2, \quad j_1 = \frac{2}{3} a^2 b, \quad j_2 = \frac{\pi a^3 b}{8}. \quad (5.64)$$

$$I_1 = \frac{2P}{\pi a b p_1}, \quad I_2 = \frac{3M_x}{2a^2 b p_1} \quad (5.65)$$

Тоді систему (5.63) можна записати через безрозмірні параметри

$$\begin{cases} \sigma_p/p_1 = I_1 - \alpha_1(I_1 - I_2) \\ \sigma_3/p_1 = \beta_1(I_1 - I_2) \end{cases} \quad (5.66)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= j_0 j_1 h / (2(j_0 j_2 - j_1^2)), & \alpha_1 &= \frac{\alpha_3 h a^{-1} - 1}{(\alpha_3^2 - 1)}, & \beta_1 &= \frac{\alpha_3 h}{a(\alpha_3^2 - 1)}, \\ \alpha_1 &= -\frac{j_1(2j_1 - j_0)h}{2(j_2 j_0 - j_1^2)} = -\frac{1}{(j_2 j_0 / j_1^2 - 1)} + \beta_1, & \alpha_3 &= 3\pi/8, \\ & \begin{cases} \beta_1 = \pi / (6\gamma(a/h)) = \frac{8\pi}{3\pi^2 - 128} \left(\frac{a}{h}\right)^{-1} \\ \gamma = \pi^2 / 16 - 4/9 \\ \alpha_1 = \beta - \frac{4}{9\gamma} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.67)$$

На основі співвідношень для КІН при розтягу і згині (5.44), також модельних значень σ_p та σ_3 (5.66) отримуються вирази для КІН при довільному навантаженні $\sigma_z(x, y)$:

$$K_I = p_1 (I_1 - \alpha_1(I_1 - I_2) + \beta_1(I_1 - I_2)H) \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} M \quad (5.68)$$

де

$$\begin{cases} I_1 = \frac{2}{\pi a b p_1} \int_S \sigma_z(x, y) dS \\ I_2 = \frac{3}{2a^2 b p_1} \int_S \sigma_z(x, y) y dS, & p_1 = \sigma_z(0, 0) \end{cases} \quad (5.69)$$

Вираз (5.68) доцільно розглянути для окремих практичних застосувань.

Приклад 1. Розглядається однорідний розтяг пластини зусиллям p з відповідним напруженням від нього σ . В даному випадку навантаження на тріщині буде постійним, тобто

$$\sigma(x, y) = \sigma_p = p_1 \quad (5.70)$$

Тоді, згідно формул (5.69)

$$I_1 = \frac{2}{\pi ab p_1} \int_S \sigma_p dS = 1, \quad I_2 = \frac{3}{2a^2 b p_1} \int_S p_1 y dS = 1$$

Отримується тривіальний результат

$$K_I = \sigma_p M \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)}. \quad (5.71)$$

Приклад 2. Чистий згин пластини з півеліптичною тріщиною.
Розглянемо навантаження на тріщині у вигляді:

$$\sigma(y) = \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \sigma_3, \quad p_1 = \sigma_3, \quad (5.72)$$

Тоді згідно формул (5.69) та (5.64)

$$I_1 = 1 - \frac{4}{\pi ab p_1 h} \int_S p_1 y dS = 1 - \frac{8a}{3\pi h},$$

$$I_2 = 1 - \frac{3}{a^2 b h} j_2 = 1 - \frac{3\pi a}{8 h}, \quad \beta(I_1 - I_2) = 1$$

Отримується аналогічний до обчислень за (5.54) результат

$$K_I = \sigma_3 H M \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (5.73)$$

Приклад 3. Якщо розглянути навантаження на тріщині у вигляді:

$$\sigma = \sigma_p + \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \sigma_3 = p_1 \left(K_p + K_3 \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \right), \quad (5.74)$$

$$p_1 = \sigma|_{y=0} = \sigma_p + \sigma_3; \quad K_p = \sigma_p / p_1; \quad K_3 = \sigma_3 / p_1.$$

Тоді згідно суперпозиції виразів (5.71) і (5.73):

$$K_I = p_1 (K_p + K_3 H) \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} M \quad (5.75)$$

Отже, при лінійному розподілі напружень на тріщині (5.74) залежність (5.68) приводиться до простого виразу (5.54).

Таким чином, проведені дослідження дають змогу визначати коефіцієнти інтенсивності напружень біля довільних контурів поверхневих тріщин в пластинах при їх розтягу і згині. Отримані формули складні для проведення інженерних розрахунків при визначенні періоду докритичного росту таких тріщин в балкових елементах прямокутного профілю. Для спрощення розв'язування даної задачі вирази (5.53), (5.47) розкладаються в ряд за малим параметром $\varepsilon_3 = \rho t^{-1}$ для $\theta = 0$, де досягається максимальне значення КІН, що необхідно для застосування інтегрального підходу [42] при визначенні періоду докритичного росту поверхневої тріщини при циклічному розтягуванні пластини. В результаті цього одержується

$$K_{I_{\max}} = \sigma f_5(\varepsilon_3), \quad f_5(\varepsilon_3) = \sqrt{\pi t \varepsilon_3} \cdot [1 + 0,6 \exp(-0,21 \varepsilon_3^2)] \cdot (1,1 + 0,53 \varepsilon_3^2) \quad (5.76)$$

Підставляючи (5.76) в (5.39) і інтегруючи його в зазначених межах (5.40), для визначення $N = N_D^{(1)}$ отримаємо вираз

$$N_D^{(1)} = V_c^{-1} (\rho_i - \rho_0) + \frac{t}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_5^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_5^4(\varepsilon_3) - K_{th}^4} d\varepsilon_3, \quad \varepsilon_{30} = \frac{\sqrt{a_0 b_0}}{t}. \quad (5.77)$$

Наскрізна тріщина. Розглянемо випадок поширення тріщини в стінці квадратної труби, рис. 5.18. При реалізації даної задачі в першу чергу необхідно знайти коефіцієнт інтенсивності напружень K_I . Розв'язок подібної задачі викликає значні труднощі з причини складної конфігурації перетину труби з тріщиною. Порівняно просте та зручне для прикладного застосування співвідношення для розрахунку КІН можна побудувати на основі наступних міркувань. Припустимо, що довжина тріщини b порівняно із іншими розмірами перерізу $\varepsilon_4 = b/(H + h) \rightarrow 0$. Тоді напружений стан в околі вершини тріщини еквівалентний розтягуванню напруженнями σ нескінченної пластини із центральною тріщиною. Враховуючи це, представимо КІН для тріщини у вигляді $K_I = \sigma_{ном} \sqrt{\pi l} f_6(\varepsilon_4)$, де $\varepsilon_4 = b/(H + h)$; $\sigma_{ном}$ – номінальне напруження у вершині тріщини; $f_6(\varepsilon_4)$ – певна безрозмірна функція, причому $f_6(\varepsilon_4) \rightarrow 1$ при $\varepsilon_4 \rightarrow 0$. В такому випадку функцію $f_6(\varepsilon_4)$ для відносно малих значень ε_4 наближено, аналогічно попередньому, можна визначити як у випадку смуги шириною $2(h + H)$ з центральною тріщиною довжини $2b$, яка розтягується напруженнями σ .

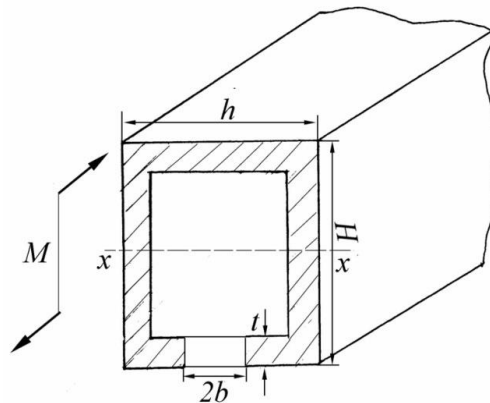


Рис. 5.18. Схема навантаження прямокутної труби з прямолінійною наскрізною в стінці тріщиною

Для такого випадку $K_{I, \max}$ знаходиться з допомогою методу граничної інтерполяції, який викладений в [145]. В результаті знайдемо

$$K_I = \sigma f_6(\varepsilon_4), \quad f_6(\varepsilon_4) = 1,67 \sqrt{\pi(h + H)} \sqrt{\varepsilon_4} (1 - 0,1\varepsilon_4 + \varepsilon_4), \quad \varepsilon_4 = \frac{b}{h + H}, \quad (5.78)$$

Підставляючи (5.78) в рівняння (5.4) і інтегруючи його в межах (5.5), для визначення періоду росту тріщини $N = N_D^{(2)}$ отримується наступний вираз

$$N_D^{(2)} = V_c^{-1}(b_i - b_0) + \frac{h + H}{\beta_1(1 - R)^4} \int_{\varepsilon_{40}}^1 \frac{K_{fc}^2 - \sigma^2 f_6^2(\varepsilon_4)}{\sigma^4 f_6^4(\varepsilon_4) - K_{sc}^4} d\varepsilon_4, \quad \varepsilon_{40} = \frac{b_0}{h + H}. \quad (5.79)$$

Складна тріщина у перетині. Кінцевий етап вичерпання ресурсу прямокутної труби наступить, коли тріщина, займаючи нижню стінку рами і частину бокових (рис.5.19), виросте до критичного розміру. Даний етап розвитку тріщини також буде описуватися кінетичними рівняннями (5.4) при початкових і кінцевих умовах (5.5) з необхідністю визначення $K_{I\max}$. Очевидно, що НДС в околі тріщини близький до стану, що виникає при згині смуги (бокова стінка) еквівалентним моментом M_1 . Визначення КІН $K_{I\max}$ біля контуру тріщини необхідно шукати наближено на основі відомого [145] методу граничної інтерполяції. Для даного випадку

$$K_I = \sigma_5 \sqrt{H} f_7(\varepsilon_5), \quad f_7(\varepsilon_5) = \sqrt{\pi \varepsilon_5} [1,12 + 0,52 \sqrt{\varepsilon_5} (1 + 6,42 \varepsilon_5^2 - 6,53 \varepsilon_5^3 + 5,86 \varepsilon_5^4)], \quad (5.80)$$

де σ_5 – номінальні напруження в ослабленому перетині рами з тріщиною.

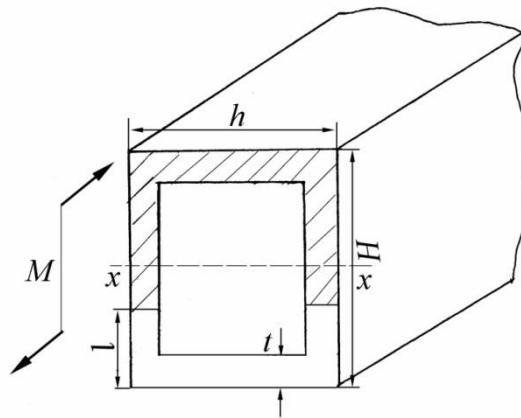


Рис. 5.19. Схема навантаження прямокутної труби з тріщиною розміром більшим поперечного перерізу однієї стінки

Використовуючи формули опору матеріалів [14], для нетто-перерізу рами

$$I_0 = \left\{ (c-h-l_1)^3 + 3(c-h-l_1-2y_0)^2(c-h-l_1) + 0,5dh^2 + 0,75(2c-2l_1-h-2y_0)^2d \right\} h/6;$$

$$y_0 = c1 - (h/2c) - \varepsilon_5 + (1-h/c - \varepsilon_5)^2 (c/d) [1 + (1-h/c - \varepsilon_5)c/d], \sigma_{н5} = \frac{M}{I_0} y_0, \quad (5.81)$$

$$\varepsilon_5 = \frac{l}{H}.$$

Отже, співвідношення (5.80) і (5.81) визначають величину $K_{I_{\max}}$ для тріщини заданої конфігурації в рамі. Отримане таким чином значення $K_{I_{\max}}$ підставляємо в рівняння (5.4) і інтегруємо його в межах (5.5). На основі цього, для визначення періоду $N = N_{\mathcal{D}}^{(3)}$ докритичного росту втомної тріщини в балці прямокутного профілю з складною тріщиною від згину моментом M отримаємо формулу

$$N_{\mathcal{D}}^{(3)} = V_c^{-1}(l_i - l_0) + \frac{H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{50}}^{\varepsilon_{5*}} \frac{K_{fC}^2 - \sigma_5^2 f_5^2(\varepsilon_5)}{\sigma_5^4 f_5^4(\varepsilon_5) - K_{scc}^4} d\varepsilon_5, \quad \varepsilon_{50} = \frac{l_0}{H}, \quad \varepsilon_{5*} = \frac{l_*}{H}. \quad (5.82)$$

де l_0, l_* - відповідно, початкова і кінцева довжина довжини тріщини l .

Таким чином, на основі співвідношень (5.35), (5.36), (5.77), (5.79), (5.82), вважаючи, що $l_i < t$, для визначення ресурсу труби N_P отримано формулу

$$N_P = N_0 10^{-\beta_0 \sigma \sigma_0^{-1}} + V_c^{-1}(\rho_i - \rho_0) + \frac{t}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_5^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_5^4(\varepsilon_3) - K_{scc}^4} d\varepsilon_3, +$$

$$+ \frac{h+H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{40}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_4^2(\varepsilon_4)}{\sigma^4 f_4^4(\varepsilon_4) - K_{scc}^4} d\varepsilon_4 + \frac{H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{50}}^{\varepsilon_{5*}} \frac{K_{fC}^2 - \sigma_5^2 f_7^2(\varepsilon_5)}{\sigma_5^4 f_7^4(\varepsilon_5) - K_{scc}^4} d\varepsilon_5 \quad (5.83)$$

Розглянемо приклад розрахунку довговічності $N = N_p$ квадратної труби січення $180 \times 180 \times 5$, матеріал Ст 3, яка циклічно згинається моментом амплітудою M за схемою, представленою на рис. 5.15. Розглядається три випадки навантаження: на повітрі, при дії розчину нітрофоски, в середовищі змішаної гноївки. В даному випадку розрахунок проводиться за виразом (5.83). Механічні та втомні характеристики Ст 3 у (5.83), визначаються згідно даних розділу 3, що приведені в співвідношеннях (5.22)-(5.24), а коефіцієнт концентрації напружень біля поверхневого корозійного концентратора (див. рис 5.13) приймається, наближено, $\beta_0 \approx 2$. На основі експлуатаційних даних розкидачів добрив і с/г транспортних засобів (розділи 1 і 2) припускається, що максимальне напруження σ в стінці труби змінюється в межах $100 \text{ МПа} < \sigma < 200 \text{ МПа}$, що в свою чергу приводить до умови $l_i > l_0$ на третій ділянці поширення тріщини (складна тріщина). На цій основі і даних (5.22)-(5.24), формула (5.83) набуде шуканого вигляду для кожного випадку навантаження у робочих середовищах:

повітря

$$N_p^{(II)} = 6,53 \cdot 10^5 \int_{0,4}^1 \frac{1 - 1,51 \cdot 10^{-6} \sigma^2 f_{1,1}^2(\varepsilon)}{9,16 \cdot 10^{-9} \sigma^4 f_{1,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 4,70 \cdot 10^7 \int_{0,014}^{0,0281} \frac{1 - 10,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{2,1}^2(\varepsilon)}{4,74 \cdot 10^{-5} \sigma^4 f_{2,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 2,35 \cdot 10^7 \int_{0,03}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/60,09}, \quad (5.84)$$

$$\varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}};$$

розчин нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/47,81} + 7,76 \cdot 10^4 (\varepsilon_i + 0,93) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (5.85)$$

$$\varepsilon_i = 2,21 - 2,06 \sqrt{1,15 + 127,86 \sigma^{-1} + 127,86 \sigma^{-1}}, \quad \varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}};$$

змішана гноївка

$$N_p^{(II)} = 6,12 \cdot 10^5 \int_{0,4}^1 \frac{1 - 1,51 \cdot 10^{-6} \sigma^2 f_{1,1}^2(\varepsilon)}{9,16 \cdot 10^{-9} \sigma^4 f_{1,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 4,41 \cdot 10^7 \int_{0,014}^{0,028} \frac{1 - 10,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{2,1}^2(\varepsilon)}{4,74 \cdot 10^{-5} \sigma^4 f_{2,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 2,20 \cdot 10^7 \int_{0,03}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/60,09}, \quad (5.86)$$

$$\varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}},$$

$$f_{1,1}(\varepsilon_3) = \sqrt{\varepsilon_3} [1 + 0,6 \exp(-0,21 \varepsilon_3^2)] (1,1 + 0,53 \varepsilon_3^2), \quad f_{2,1}(\varepsilon_4) = 1,67 \sqrt{\varepsilon_4} (1 - 0,1 \varepsilon_4 + \varepsilon_4),$$

$$f_{3,1}(\varepsilon_5) = \sqrt{\varepsilon_5} [1,12 + 0,52 \sqrt{\varepsilon_5} (1 + 6,42 \varepsilon_5^2 - 6,53 \varepsilon_5^3 + 5,86 \varepsilon_5^4)].$$

В результаті обчислень за виразами (5.84)-(5.86) побудовано графічні залежності $N_p \sim \sigma$ ресурсу квадратної труби від рівня нормальних напружень (рис. 5.20) при циклічних згинальних деформаціях на повітрі в розчині нітрофоски і змішаному безпідстилковому гної.

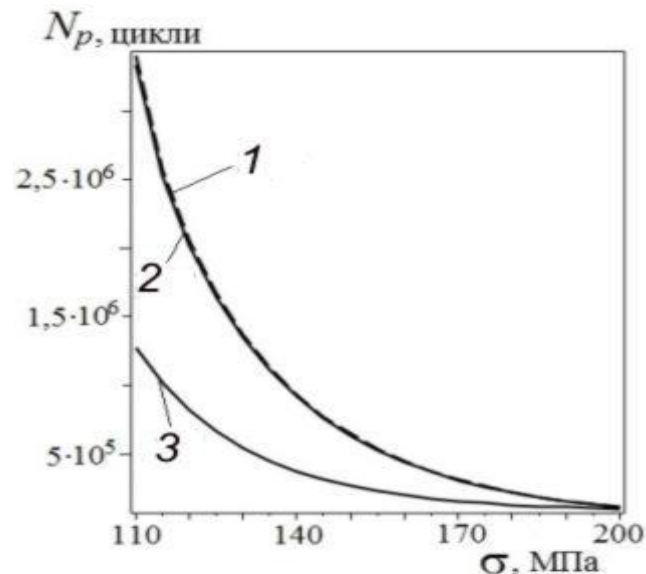


Рис. 5.20. Графічні залежності ресурсу N_p квадратної труби в середовищах :

1 (пунктир) - повітря; 2 - змішана гноївка ; 3 - розчин нітрофоски.

З графічних залежностей, розчин мінерального добрива знижує ресурс квадратної труби при циклічному згині більше 2 раз у порівнянні з дослідженнями на повітрі.

Дослідження елементів несучих системи з перетином круга труба. В легких одновісних навісних і самохідних розкидачах добрив (рис. 5.21) основним конструктивними елементами є трубчасті елементи, які, в основному, навантажуються згинальними деформаціями. Розрахунок ресурсу даних елементів проводиться за формулою (5.1), де період зародження поверхневої тріщини N_z визначається за виразом (5.3).



Рис. 5.21. Розкидач мінеральних добрив

Другий член у формулі – N_d є періодом докритичного росту поверхневої тріщини, яка зародилася, тривалість якого визначається складніше, у залежності від кінетики росту тріщини. Розглянемо вказану проблематику.

Досліджується тонкостінна труба радіусом r товщиною t з поверхневою півеліптичною тріщиною з напівосями a, b . В тріщину потрапляє корозійно - агресивне середовище при циклічному згині труби моментом амплітудою M (рис. 5.22).

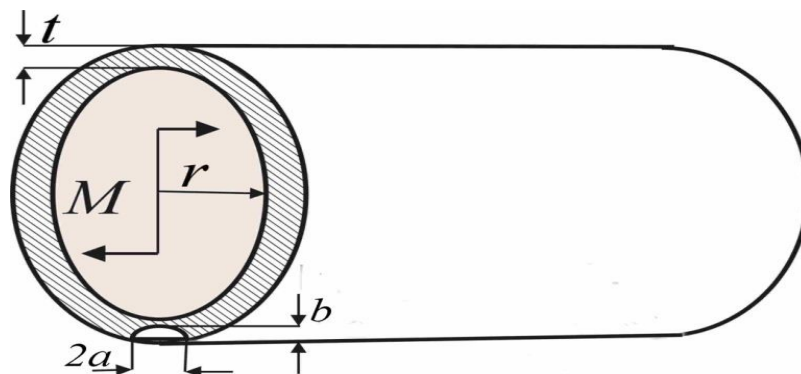


Рис. 5.22. Схема навантаження тонкостінної труби з поверхневою тріщиною

Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту тріщини в трубі $N = N_D$, в результаті чого довжина тріщини досягне розміру $l = l_*$ наступить граничний стан, елемент зруйнується, або виникне необхідність проведення ремонту. Граничний стан може настати в результаті проходження тріщиною двох етапів. Період першого $N_D^{(6)}$ настає тоді, коли поверхнева тріщина (рис. 5.22) стане наскрізною. Другий, заключний, етап наступить після $N_D^{(7)}$ циклів навантаження, коли довжина наскрізної тріщини (рис. 5.23) досягне розміру $l = l_*$ і труба зруйнується, тобто період $N = N_D$ докритичного росту тріщини в трубі буде визначатися за виразом

$$N_D = N_D^{(6)} + N_D^{(7)}. \quad (5.87)$$

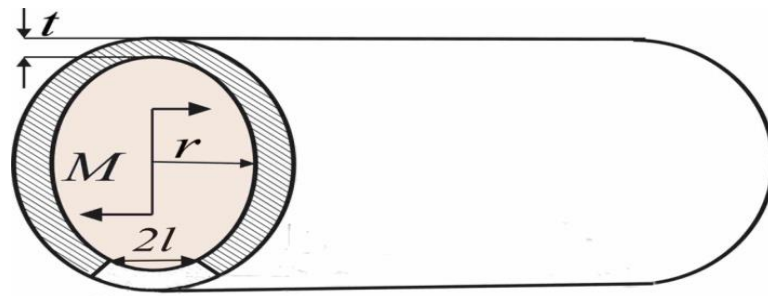


Рис. 5.23. Схема навантаження труби з наскрізною тріщиною

Величина $N_D^{(6)}$ знаходиться аналогічно випадку прямокутної труби (рис. 5.15). Одержуються залежності типові з (5.76) і (5.77), тобто

$$K_{I_{\max}} = \sigma f_3(\varepsilon_3), \quad f_3(\varepsilon_3) = \sqrt{\pi t \varepsilon_3} [1 + 0,6 \exp(-0,21 \varepsilon_3^2)] (1,1 + 0,53 \varepsilon_3^2). \quad (5.88)$$

$$N_D^{(6)} = V_c^{-1}(\rho_i - \rho_0) + \frac{t}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_3^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_3^4(\varepsilon_3) - K_{scc}^4} d\varepsilon_3, \quad \varepsilon_{30} = \frac{\sqrt{a_0 b_0}}{t}. \quad (5.89)$$

Різниця між (5.76), (5.77) і (5.88), (5.89) полягає в тому, що величина σ визначається виразом (5.6), а момент опору поперечного перетину при згині W_x за [62, 175]

$$W_x = 0,1D^3(1 - 16r^4D^{-4}), D = 2(r + t). \quad (5.90)$$

Друга складова $N_D^{(7)}$ виразу (5.71) знаходиться виходячи з наступних міркувань. Вважається, що довжина тріщини $2l \in \epsilon$ малою відносно величини радіусу труби ($r \gg l$), величина $N_D^{(7)}$ шукається наближено, як для пластини з початковою тріщиною довжини $2l_0$, яка циклічно розтягується рівномірно розподіленими зусиллями амплітуди σ (задача (4.73)). Тоді, на основі результатів розділу 4, для визначення періоду докритичного росту тріщини в трубці $N_D^{(7)}$ отримано залежність

$$N_D^{(7)} = V_c^{-1}(l_i - l_0) + \frac{\pi r}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\epsilon_{70}}^{\epsilon_{7*}} \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_7^2(\epsilon_7)}{\sigma^4 f_7^4(\epsilon_7) - K_{scc}^4} d\epsilon_7, \epsilon_{70} = \frac{l_0}{\pi r}, \epsilon_{7*} = \frac{l_*}{\pi r}. \quad (5.91)$$

В (5.91) коефіцієнт інтенсивності напружень K_I , ϵ_{7*} і, відповідно, функція $f_4(\epsilon_4)$ знайдені наближено, аналогічно (5.79), як для випадку смуги шириною $2r$ з тріщиною довжиною $2l$, яка рівномірно розтягується σ , тобто

$$K_I = \sigma f_7(\epsilon_7), f_7(\epsilon_7) = \sqrt{\pi r} \frac{1,2533 \sqrt{\epsilon_7}}{\sqrt{(1 - \epsilon_7)(1 + 1,4675 \epsilon_7)}}, \epsilon_7 = \frac{l}{\pi r}, K_I(\epsilon_{7*}) = K_{fC}. \quad (5.92)$$

Отже, на основі співвідношень (5.89) і (5.91), величина періоду докритичного росту тріщини N_D при циклічному згині труби буде визначатися кінцевим виразом

$$N_D = V_c^{-1}(\rho_i - \rho_0 + l_i - l_0) + \frac{t}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\epsilon_{30}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_3^2(\epsilon_3)}{\sigma^4 f_3^4(\epsilon_3) - K_{scc}^4} d\epsilon_3 + \frac{\pi r}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\epsilon_{70}}^{\epsilon_{7*}} \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_7^2(\epsilon_7)}{\sigma^4 f_7^4(\epsilon_7) - K_{scc}^4} d\epsilon_7 \quad (5.93)$$

На основі проведених аналітичних досліджень, повний ресурс N_p труби при циклічному згині моментом амплітудою M в корозійно - агресивному середовищі визначається співвідношенням

$$N_p = \beta_0 N_0 10^{-\sigma \sigma_0^{-1}} + V_c^{-1} (\rho_i - \rho_0 + l_i - l_0) + \frac{t}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fc}^2 - \sigma^2 f_3^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_3^4(\varepsilon_3) - K_{scc}^4} d\varepsilon_3 +$$

$$+ \frac{\pi r}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{70}}^{\varepsilon_{7*}} \frac{K_{fc}^2 - \sigma^2 f_7^2(\varepsilon_7)}{\sigma^4 f_7^4(\varepsilon_7) - K_{scc}^4} d\varepsilon_7, \sigma = M / 0,8(r+t)^3 [1 - r^4(r+t)^{-4}] \quad (5.94)$$

Таким чином, при заданих амплітуді циклічного згину M і експериментально визначених корозійних і механічних характеристиках матеріалу труби $N_0, \sigma_0, V_c, \beta_1, K_{Ki}, K_{fc}, R, K_{scc}$, при відомій геометрії поперечного перетину t, r , ресурс розглядуваного елемента несучої системи розкидача добрив визначається залежностями (5.94).

Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень для поверхневої півеліптичної тріщини в зоні концентрації напружень. Загальновідомо, переважно несучі металоконструкції розкидачів добрив є зварними, хоча окремі елементи з'єднуються болтовими єднаннями. Розглянемо, рис. 5.21, рами розкидачів добрив, які складаються із трубчатих елементів, з'єднаних зварюванням. В зоні зварного з'єднання в результаті дії корозійного середовища і циклічних навантажень може утворитися поверхнева тріщина. Для вказаного випадку формули визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (5.88) і (5.92) будуть неточними, так як для вузлового зварного з'єднання в зоні термічного впливу спостерігається значна концентрація напружень. Оскільки тріщина зароджується і поширюється саме у вказаній області, для визначення КІН і опису кінетики тріщини необхідно знати розподіл напружень в даній зоні (рис. 5.24). Як показують експериментальні дані, форма поверхневої півеліптичної тріщини (співвідношення осей), що розвивається у досліджуваній зоні значно залежить від концентрації напружень. Неврахування

фактору концентрації напружень в зоні 33 може викликати значні похибки при виконанні оцінки довговічності вузла зварного з'єднання.

Залежністю для визначення напружень в площині тріщини, яка бере початок з поверхневого концентратора з радіусом кривизни його вершини ρ , який характеризується коефіцієнтом концентрації пружних напружень α , запишеться виразом

$$\sigma(y) = \alpha f_1\left(\frac{y}{\rho}\right) \sigma_{nom}(y), \quad (5.95)$$

де

$$f_1\left(\frac{y}{\rho}\right) = 1 - 2,33 \frac{y}{\rho} + 2,59 \left(\frac{y}{\rho}\right)^{3/2} - 0,907 \left(\frac{y}{\rho}\right)^2 + 0,037 \left(\frac{y}{\rho}\right)^3, \quad \left\{ y \leq \rho y_0, \quad \alpha f\left(\frac{y_0}{\rho}\right) = 1 \right\}. \quad (5.96)$$

В роботі [40] для визначення даної функції одержано формулу

$$f_1\left(\frac{y}{\rho}\right) = \left(1 + \frac{16y}{\pi\rho}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (5.97)$$

Крім того, також можна застосувати вираз

$$\alpha f_1\left(\frac{y}{\rho}\right) = (\alpha - 1) \exp\left(-a^* \frac{y}{\rho}\right) + 1, \quad a^* = q\alpha/(\alpha - 1), \quad (5.98)$$

де q вибирається з умови узгодження виразу (5.98) з (5.96) чи (5.97).

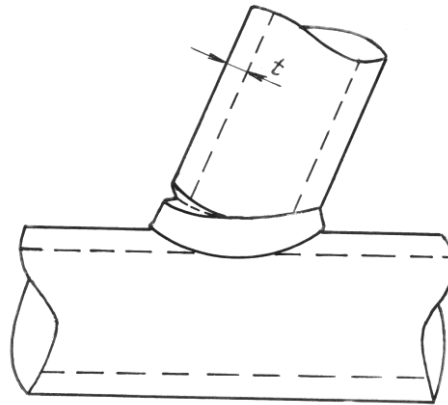


Рис. 5.24. Ескіз поверхневої тріщини у трубному зварному вузлі

Для трубчатих з'єднань характерним є плавний характер зміни напружень [40] за величиною вздовж шва, що описується залежністю

$$\begin{aligned}\sigma(x) &= \sigma(0) \cdot f_2(x), \\ f_2(x) &= 1 - C_1 \left(\frac{x}{L}\right)^2\end{aligned}\quad (5.99)$$

де C_1 , L – параметри, які задаються на основі даних про навантаження та геометрію трубчастого з'єднання.

В результаті поле (розподіл) нормальних відносно січення (рис.5.16) напружень, запишеться у вигляді

$$\sigma(x, y) = \alpha f_1\left(\frac{y}{\rho}\right) \sigma_{nom}(y) f_2(x), \quad (5.100)$$

де

$$\sigma_{nom}(y) = \sigma_{nom}(0) \left(K_p + K_s \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right), \quad K_p + K_s = 1. \quad (5.101)$$

Згідно вибраного поля напружень (5.100) для параметрів I_1 та I_2 отримано вирази

$$I_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^1 \left\{ f_1 \left(\frac{at}{\rho} \right) \left[K_p + K_3 \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right] F_2(t) \right\} dt, \quad F_2(t) = \int_0^{z(t)} f_2(b\xi) d\xi, \quad (5.102)$$

$$I_2 = 3 \int_0^1 \left\{ t f_1 \left(\frac{at}{\rho} \right) \left[K_p + K_3 \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right] F_2(t) \right\} dt, \quad z(t) = \sqrt{1-t^2} \quad .$$

Підсумовуючи результат, для коефіцієнта інтенсивності напружень у випадку півеліптичної тріщини з розподілом напружень на тріщині (5.100) отримуємо аналітичний вираз

$$K_I = p_1 (I_1 - \alpha_1 (I_1 - I_2) + \beta_1 (I_1 - I_2) H) \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} M, \quad (5.103)$$

$$M = M_{1,2} \cdot f_w \cdot f_\theta,$$

$$M_{1,2} = E(k) \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{2}} - \left[E(k) \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{2}} - M_1 \left(\frac{a}{b}, 0 \right) \right] \exp \left[-1,48 \left(\frac{a}{h} \right)^2 / \left(1 + 6 \left(\frac{a}{b} \right)^3 \right) \right],$$

$$M_1 \left(\frac{a}{b}, 0 \right) = 1 + 0,12 \left(1 + (a/b)^2 \right)^{-1},$$

$$g = 1 + \left(0,1 + 0,53 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \right) (1 - \cos \theta)^2,$$

$$f_w = 1 + \left(\frac{a}{h} \right)^2 \left(\frac{b}{W} \right)^2,$$

$$\alpha_1 = \beta - \frac{4}{9\gamma}; \quad \beta_1 = \pi / \left(6\gamma \frac{a}{h} \right); \quad \gamma = \frac{\pi}{16} - \frac{8}{9}, \quad (5.103)$$

$$I_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^1 \left\{ f_1 \left(\frac{at}{\rho} \right) \left[K_p + K_3 \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right] F_2(t) \right\} dt,$$

$$I_2 = 3 \int_0^1 \left\{ t f_1 \left(\frac{at}{\rho} \right) \left[K_p + K_3 \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right] F_2(t) \right\} dt, \quad F_2(t) = \int_0^{\sqrt{1-t^2}} f_2(b\xi) d\xi,$$

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \cos^{n_0} \theta,$$

$$f_1 \left(\frac{y}{\rho} \right) f_2(x) = \frac{\sigma(x, y)}{\alpha \sigma_{nom}(y)}, \quad n_0 = 0,2 + a/b + 0,6(a/h),$$

$$H_1 = 1 - 0,34 \frac{a}{h} - 0,11 \frac{a}{b} \left(\frac{a}{h} \right), \quad G_{21} = -1,12 - 0,12 \frac{a}{b},$$

$$H_2 = 1 + G_{21} \left(\frac{a}{h} \right) + G_{22} \left(\frac{a}{h} \right)^2, \quad G_{22} = 0,55 - 1,05 \left(\frac{a}{b} \right)^{0,75} + 0,47 \left(\frac{a}{b} \right)^{1,5}.$$

Розрахунок за виразами (5.103) доцільно проводити чисельно за допомогою комп'ютерного моделювання.

Дослідження впливу величини кривизни труби на КІН довільно орієнтованої наскрізної тріщини. При розв'язанні задачі для труби з наскрізною тріщиною (рис. 5.23) використовувалося припущення, що довжина тріщини $2l$ була незначною ($l \ll r$), тобто кривизна труби не впливала на величину КІН, дане припущення дало змогу отримати відносно зручну формулу (5.91) для визначення періоду $N_{Д}^{(7)}$ докритичного росту тріщини в трубі. Проте для тріщин значних розмірів, що в більшості випадків в інженерній практиці не допускається, дана формула буде неточною. З наукової точки зору, що важливо при дослідженнях окремих випадків з інженерної практики, виникає проблема запису аналогічного до (5.91) виразу, який можливо було б застосовувати для великих $2l$. Для даного випадку, визначення КІН є проблематичним. У зв'язку з цим досліджено поставлену задачу. Розглядається випадок кругової циліндричної труби з середнім радіусом r і прямолінійною у своїй площині наскрізною тріщиною $2l$. При прикладених до берегів тріщини нормальних розтягуючих постійних зусиллях P_1 та постійних вздовж тріщини згинальних моментах M , КІН K_1 визначається з співвідношення [168, 145, 265]

$$\begin{aligned}
K_I = & \sqrt{\pi l} \left\{ \sigma_p \left[1 + \frac{\pi \lambda_1^2}{64} (3 + 2 \cos \gamma_1) \right] - \sigma_3 \frac{\lambda_1^2 \sqrt{3(1-\nu^2)}}{288(1-\nu)(3+\nu)} \left[3(15-\nu) \times \right. \right. \\
& \times \sin^4 \gamma_1 - (1-7\nu) \cos^4 \gamma_1 - 6(8 \sin^2 \gamma_1 - 1 - \nu - 4\nu \cos^2 \gamma_1) \left(1 + \ln \frac{\lambda_1 \gamma_0}{8} \right) \left. \left. \right] \right\} + \\
& + \sqrt{\pi l} \frac{2z}{t} \left\{ \sigma_3 \left[1 - \frac{\pi \lambda_1^2 (1+4 \cos^2 \gamma_1)(1+\nu)^2 - 4(1+2\nu)}{64(1-\nu)(3+\nu)} \right] + \sigma_p \frac{\lambda_1^2}{32 \sqrt{3(1-\nu^2)}} \left[3(1+\nu) \cos 4\gamma_1 - \right. \right. \\
& \left. \left. - 4(1-\nu) \cos^4 \gamma_1 + 6(1+3\nu+2\nu \cos 2\gamma_1) \left(1 + \ln \frac{\lambda_1 \gamma_0}{8} \right) \right] \right\}, \quad \ln \gamma_0 = 0,5772. \quad (5.104)
\end{aligned}$$

де $\lambda_1^2 = l^2 \sqrt{12(1-\nu^2)}/(rt)$, ν – коефіцієнт Пуассона для матеріалу; γ_1 – кут між напрямком тріщини і твірною оболонки; σ_p – нормальні напруження від дії зусиль p_1 , $\sigma_p = p_1/t$, рівномірно розподілені по поверхні тріщини; σ_3 – рівномірно розподілене вздовж тріщини максимальне згинальне напруження від дії моменту M , $\sigma_3 = 6M/t^2$, z – координата за товщиною оболонки з початком на серединній площині оболонки $|z| \leq t/2$.

Вираз (5.104) для зручності застосування записано у такій формі, що співвідношення в першій і другій фігурних дужках, відповідно, показують, які потрібно прикласти і максимальні зусилля розтягу і згину (напруження) до поверхонь наскрізної тріщини довжиною $2l$ в пластині (тобто при $\lambda_1 \rightarrow 0$) щоб значення K_I в пластині було рівне значенню $K_{I(max)}$ в трубі з наскрізною тріщиною довжиною $2l$ направленою під кутом γ_1 твірної труби, коли до її поверхні прикладено відповідно нормальні напруження розтягу σ_p , і максимальні згинальні напруження σ_3 . Таким чином, формула (5.88) показує, що коли величина КІН K_I для пластини ($\lambda_1 \rightarrow 0$) з наскрізною тріщиною при її розтягуванні і згинанні відома, то є можливість аналітично визначити шукану величину КІН K_I для оболонки з відповідною тріщиною при відомих геометричних параметрах труби, кута напрямку тріщини, а також розтягуючих σ_p і згинальних σ_3 напруженнях, які діють на поверхні розглядуваної тріщини.

З (5.104) зручно знаходиться $K_{I(max)}$ для поперечної ($\gamma_1 = \pi/2$) і поздовжньої ($\gamma_1 = 0$) тріщини довжиною $2l$ в трубi.

Вплив кривизни труби на КІН довільно орієнтованої поверхневої тріщини. Величина $N_D^{(6)}$ періоду розвитку поверхневої корозійно - втомної тріщини по всій товщині труби визначається залежністю (5.89) з умовою, що довжина тріщини по поверхні $2a$ є незначною ($2a \ll r$) і $N_D^{(6)}$ визначається як у випадку розтягу пластини з аналогічною тріщиною. Виникає необхідність визначення $N_D^{(6)}$ і K_I при великих значеннях $2a$. Для отримання таких залежностей виконуються наступні дії. Виходячи з (5.104), K_I для поверхневої півеліптичної тріщини в трубi записується

$$K_I = K_{I(розм)}(\sigma_p^{(0)}(\lambda)) + K_{I(зг)}(\sigma_s^{(0)}(\lambda)), \quad (5.105)$$

де $K_{I(розм)}$ і $K_{I(зг)}$ – відповідно, КІН для пластини з поверхневою напівеліптичною тріщиною при чистому одиничному розтягу і одиничному згині; $\sigma_p^{(0)}(\lambda)$ і $\sigma_s^{(0)}(\lambda)$ – узагальнені напруження розтягу і згину, які згідно (5.104) описуються наступними залежностями

$$\begin{aligned} \sigma_p^{(0)}(\lambda) &= \sigma_p \left(1 + \frac{\pi \lambda^2}{64} (3 + 2 \cos 2\gamma_1) \right) \pm \sigma_s \frac{\lambda^2 \sqrt{3(1-\nu^2)}}{288(1-\nu)(3+\nu)} \left[3(15-\nu) \sin^4 \gamma_1 - \right. \\ &\quad \left. - (1-7\nu) \cos^4 \gamma_1 - 6(8 \sin^2 \gamma_1 - 1 - \nu - 4\nu \cos^2 \gamma_1) \left(1 + \ln \frac{\lambda \gamma_0}{8} \right) \right]; \\ \sigma_s^{(0)}(\lambda) &= \sigma_s \left(1 - \frac{\pi \lambda^2 (1 + 4 \cos^2 \gamma_1)(1+\nu)^2 - 4(1+2\nu)}{64(1-\nu)(3+\nu)} \right) \pm \sigma_p \frac{\lambda^2}{32\sqrt{3(1-\nu^2)}} \times \\ &\quad \times \left[3(1+\nu) \cos 4\gamma_1 - 4(1-\nu) \cos^4 \gamma_1 + 6(1+3\nu+2\nu \cos 2\gamma_1) \left(1 + \ln \frac{\lambda \gamma_0}{8} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5.106)$$

де $\lambda = \varepsilon \sqrt{12(1-\nu^2)}$, $\varepsilon = 2b^2 / (R_2^2 - R_1^2)$, b – напівдовжина тріщини (рис.5.25); R_1 і R_2 – відповідно внутрішній і зовнішній радіуси труби.

У випадку поперечної тріщини в трубі (рис. 5.25), тобто при $\gamma_1 = \pi/2$ вирази (5.106) набувають вигляду

$$\begin{aligned} \sigma_p^{(0)}(\lambda) &= \sigma_p \left(1 + \frac{\pi \lambda^2}{64} \right) + \sigma_3 \frac{\lambda^2 \sqrt{1-\nu^2}}{32(1-\nu)(3+\nu)\sqrt{3}} \left(1 + \nu - 2(7-\nu) \ln \frac{\lambda \gamma_0}{8} \right); \\ \sigma_3^{(0)}(\lambda) &= \sigma_3 \left(1 + \frac{3+6\nu-\nu^2}{(1-\nu)(3+\nu)} \frac{\pi \lambda^2}{64} \right) + \sigma_p \frac{\sqrt{3}(1+\nu)\lambda^2}{32\sqrt{1-\nu^2}} \times \\ &\times \left(1 + 2 \ln \frac{\lambda \gamma_0}{8} \right). \end{aligned} \quad (5.107)$$

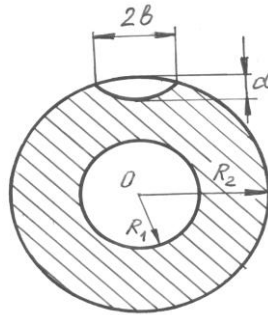


Рис. 5.25. Півеліптична тріщина в трубі

Отже, при відомих напруженнях розтягу σ_p і згину σ_3 , що діють на поверхні півеліптичної тріщини в трубі і обчислюються згідно (5.72), КІН для заданої розрахункової схеми визначається за виразами (5.105) і (5.106), тобто

$$K_I = \sigma_p^{(0)}(\lambda) \left(1 + H \frac{\sigma_3^{(0)}(\lambda)}{\sigma_p^{(0)}(\lambda)} \right) M \sqrt{\pi a} / E(k) \quad (5.108)$$

Таким чином, розроблені залежності (5.72), (5.103), (5.104), і (5.108) можуть бути використані для досліджень тріщин значних розмірів при необхідності визначення K_I з врахуванням кривизни труби.

5.5. Висновки

1. Розроблено базові положення методики визначення ресурсу несучих елементів металоконструкцій розкидачів добрив з урахуванням експлуатаційно - агресивних факторів. Застосування даної методики в повному обсязі продемонстровано на прикладі циклічного згину коритного тонкостінного профілю в середовищах добрив. Доведено, що дія розчину нітрофоски зменшує довговічність майже на 80% у порівнянні з повітряним середовищем.

2. Проведено адаптацію створеної методики для визначення залишкового ресурсу при циклічному згині балкових елементів відкритих профілів на повітрі, в розчині нітрофоски і змішаній гноївці. На цій основі визначено ресурс несучих елементів: швелера, Z – подібного і Ω - подібного профілів, а також побудовано залежності довговічності від параметрів навантаженості. Встановлено, найбільш агресивний вплив на ресурс має розчин нітрофоски, який для балки Z – подібного профілю знижує довговічність до 30%.

3. На прикладі циклічного згину балки Ω - подібного профілю з двома боковими тріщинами визначено, розчин нітрофоски, у порівнянні з випробуваннями на повітрі, може зменшити залишковий ресурс на порядок.

4. На основі розробленої методики виконано розрахунки ресурсу основних несучих елементів закритих профілів металоконструкцій причіпних розкидачів добрив при циклічному згині. Побудовано залежності ресурсу прямокутної і круглої труб від зовнішнього навантаження. Досліджено особливості зародження корозійно - втомних тріщин на поверхнях квадратних труб. Результати обчислення ресурсу квадратної труби з Ст 3 при циклічному згині на повітрі, в розчині нітрофоски і змішаній гноївці довели, що нітрофоска при визначених схемах є найбільш корозійно - агресивним середовищем, ресурс квадратної труби зменшується більше 2 раз у порівнянні з дослідженнями на повітрі.

РОЗДІЛ 6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧИХ СТРУКТУР ПРИЧІПНИХ РОЗКИДАЧІВ ДОБРІВ

6.1. Обґрунтування вибору режимів проведення експериментальних досліджень причіпного розкидача ПРТ - 10

Експериментальні дослідження проведено на полях ТОВ «Україна», керівник – Герой України Крижовачук Олег Петрович . Автор приносить слова глибокої вдячності Олегу Петровичу за всебічну підтримку і допомогу, а також надану техніку та можливість проведення експерименту.

Для ефективної оцінки фактичної навантаженості несучих металоконструкцій причіпних машин необхідно побудувати розрахункові моделі дослідження НДС, розробити методику і провести польові експериментальні дослідження причіпного розкидача органічних добрив ПРТ - 10 з визначенням характеристик: частотного і компонентного складу напружень, виникаючих в елементах несучої системи при експлуатаційних режимах. На елементи несучих систем при виконанні технологічних процесів розкидання добрив діють складні комбінації випадково орієнтованих у просторі зусиль, обумовлені випадковим характером джерел збурень – руху машини по нерівностях поля, рухів робочих органів. Результати експериментальних досліджень тримких структур використовуються для вирішення завдань з якісної і кількісної оцінки розподілів напружень в максимально навантажених зонах для прогнозування довговічності несучої системи; визначення частотних діапазонів напружень в небезпечних перетинах рам також обчислення фактичного НДС елементів несучої системи з метою знаходження максимально навантажених зон, що є резервом для зниження металоємності конструкції.

Дослідження НДС несучих систем в польових умовах необхідно

проводити на режимах, типових для виконання технологічних процесів машинами вказаного класу на тих видах доріг, які найбільш характерні для експлуатації розкидачів добрив. Різноманітність видів доріг і відсутність типових рекомендацій з вибору категорій доріг для досліджень НДС тримких рам робить необхідним попередній статистичний аналіз умов експлуатації. У [157, 177, 318] вказується, що щорічні контрольні випробування машин доцільно проводити на зональних машино - випробувальних станціях (МВС), які є типовими для регіонів, в яких працюють причіпні розкидачі, тракторні причеми. Аналіз співвідношень пробігів тракторних поїздів по різних категоріях доріг в зонах МВС дозволив отримати узагальнені характеристики експлуатації машин даного класу [177, 143, 204, 318]. Розподіл пробігів дорогами різних видів з урахуванням специфіки розкидачів можна охарактеризувати наступним співвідношенням: пробіг асфальтовими дорогами 30% - 40%, ґрунтовими дорогами і полем – до 70%. [183, 188, 189, 205, 318]. Експериментальні дослідження навантаженості несучої системи причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ – 10 (в-ва «Бобруйськаагромаш», табл. 6.1) проводились при розкиданні змішаного підстилкового (солома) гною, маса робочого матеріалу 10 т. Повторення дослідів - шестикратне. Агрегаткування - трактор МТЗ-1523 (3 клас). Стабільність режиму досліджень забезпечується періодичним контролем швидкості руху і навантаження.

Таблиця 6.1

Технічні характеристики причіпного розкидача ПРТ-10

Вантажопідйомність	11 т
Місткість	8.5 м ³
Габаритна ширина	2500 мм
Габаритна довжина	7200 мм
Габаритна висота	2880 мм
Маса	3800 кг
Робоча швидкість	12 км/год
Продуктивність	29 т/год
Доза внесення	20-60 т/га
Ширина внесення	5-8 м

Вибір необхідної довжини ділянок реєстрації здійснювався з урахуванням

ряду обмежень. Згідно [143, 177, 318], збільшення протяжності ділянки вибраної дороги в багатьох випадках може призвести до порушення умов стаціонарності впливу, так як, із збільшенням тривалості пересування розкидача, імовірність відхилень стаціонарності характеристик процесів зростає. Теоретичне підвищення достовірності оцінки НДС внаслідок збільшення тривалості режимів перекривається похибками, спричиненими нестаціонарністю впливів. Залежно від наявності машин, відстані доставки органічних добрив до поля і норми внесення, застосовують прямоточну, перевантажувальну і перевалочну технологічні схеми. Випробування проводитимуться з застосуванням прямоочної технологічної схеми, з причини поєднання в ній операцій транспортування і розкидання, що дозволить проаналізувати залежність НДС від режимів експлуатації. З урахуванням технології внесення твердих органічних добрив і рекомендацій [143], обрано довжини ділянок для проведення реєстрації: рух польовою дорогою порожній 0,3 км; рух полем навантажений 0,5 км; розкидання добрива 1,6 км; рух полем порожній 0,8 км. Тензорезистори встановлюються у зонах найбільших прогнозованих напружень, які визначаються при попередньому аналітичному дослідженні статичної навантаженості несучої рамної металоконструкції, також як результат обробки статистичних даних про поломки досліджуваних елементів в умовах експлуатації. Наклеювання датчиків проводиться на ділянках одновісного напруженого стану за лінією напрямку дії напружень. З урахуванням симетричності рами розкидача ПРТ – 10 відносно поздовжньої осі, тензорезистори розміщуються на правій стороні машини.

6.2. Обґрунтування вибору обладнання для оцінки експлуатаційної навантаженості причіпних розкидачів добрив

Проблеми синтезу технічних систем розв'язуються якісно і оперативно, коли теоретичні результати підтверджено, або скоректовано на базі

експериментальних досліджень і натурних випробувань машин, а дані випробувань аналізуються і узагальнюються на основі теоретичних положень [92, 177]. При цьому оперативність обробки і аналізу великих об'ємів інформації, отриманої при випробуваннях техніки, найефективніше сприяє підвищенню функціональних показників та надійності нових та модернізованих машин. Особливістю випробувань сільськогосподарських машин є залежність показників експлуатаційної навантаженості машин від рельєфних і ґрунтово-кліматичних умов, врожайності культур, робочих агресивних середовищ. Випробування для перевірки початкової якості функціонування називаються функціональними, а випробування, при яких оцінюється наробіток об'єкта до стану, коли втрата початкової якості призведе до невідповідності вимогам (у тому числі і при руйнуванні об'єкта) – ресурсними (за класифікацією Погорілого Л.В., Аніловича В.Я.) [50, 52, 177, 178, 180]. Випробування, направлені на визначення якості забезпечення агротехнічних вимог, технологічних операцій, для виконання яких розробляється машина вважаються функціональними. При ресурсних випробуваннях визначається наробіток машини, протягом якого забезпечується її роботоздатність, тобто виконання заданих функцій. Статистична оцінка якості виконання робочого процесу при експлуатації виконується відносно оперативно, а достовірність ресурсних випробувань є нижча, ніж функціональних, тому проблема надійності для сільськогосподарської техніки вирішена значно гірше, ніж проблема їх технологічного функціонування [64, 70, 152, 186]. З метою підвищення надійності с/г техніки на стадії проектування, розрахунки на міцність конструкцій і вузлів повинні бути доповнені перевірними розрахунками на довговічність на стадіях зародження і розвитку тріщин, зносостійкість на основі стендових досліджень вузлів, випробувань машин-аналогів. Експлуатаційні ресурсні випробування експериментальних зразків сільськогосподарської техніки повинні доповнюватись вимірюванням навантажень в різних умовах експлуатації, вивченням фізичної картини втрати роботоздатності елементами машини [99, 152, 179, 177, 230, 231, 238, 260, 261, 266].

Відомо, що сільськогосподарські машини, агрегати, комплекси і засоби механізації працюють в складних рельєфних і кліматичних умовах, агресивних середовищах. При жорсткій підвісці сільськогосподарських машин, на базові несучі елементи і збірні одиниці діють значні динамічні навантаження як від перешкод, так і від вібрацій, джерелом збурення яких є високообертові, недостатньо збалансовані маси, наприклад, робочі органи розкидачів добрив. Створення нової та модернізація існуючої сільськогосподарської техніки без наявності точних і прогнозованих характеристик динамічного навантаження в реальних умовах експлуатації не відповідає сучасному та перспективному рівню машин [113, 126, 135].

На даний час існують алгоритми опису задач і аналітичні напрацювання в динамічній постановці, проте для складної конфігурації елементів та складнонавантажених вузлів, числові методи можуть виявитись неефективними для розрахунку напружено - деформівного стану елементів конструкцій через суттєві і часто невмотивовані спрощення, які не дозволяють обґрунтовано визначати міцність та ресурс машин [312]. Для визначення реального навантаження деталей і конструкцій машин на стадії проектування та випробування дослідних взірців в реальних умовах експлуатації, великого значення набувають експериментальні методи досліджень, які дозволяють отримати точні дані для оцінки ресурсу машин при нерегулярному характері навантажень [318, 177, 218, 307, 266, 267, 268].

Для визначення параметрів руху машин (переміщень, кутових швидкостей та прискорень) і НДС в елементах металоконструкцій експериментальним шляхом, застосовуються спеціальні вимірювальні пристрої та обладнання: датчики кутових швидкостей, акселерометри, тензорезистори, динамометри трикомпонентних динамічних характеристик, динамометричні тяги начіпної системи, сигнали від яких надходять на реєструючий пристрій. Типова схема розміщення обладнання при дослідженнях динамічних характеристик мобільних с/г машин приведена на рис. 6.1 [177, 260, 261, 267, 268].

У зв'язку зі світовими тенденціями розвитку експериментальних досліджень складних механічних структур в реальних умовах експлуатації, на кафедрі технічної механіки, с/г машин і транспортних технологій ТНТУ проф. Рибак Т.І., проф. Підгурським М.І., доц. Костюком В.І. розроблено універсальну вимірювальну систему (УВС) [239, 240, 177], яка поєднує компонувальні схеми А і Б при реєстрації результатів випробувань. УВС працює в автономному режимі через вбудований в кейті мікрокомп'ютер з реєстрацією інформації на вмонтований flash накопичувач (схема Б), або, при зв'язку через LPT-порт, в системі з зовнішнім комп'ютером (схема А) (рис. 6.1., рис. 6.2, рис. 6.3) [177].

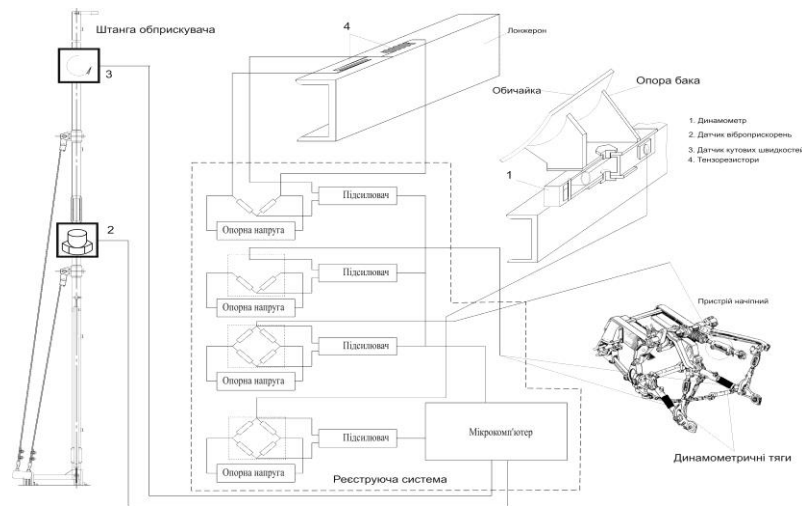


Рис. 6.1. Принципова схема дослідження динамічних характеристик мобільної с/г техніки

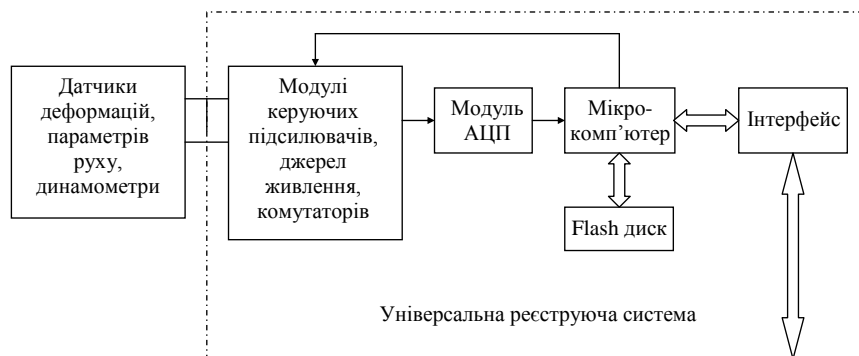


Рис. 6.2. Принципова схема універсальної вимірювальної системи для проведення дослідження динаміки навантаження мобільних с/г машин

Універсальна вимірювальна система (рис. 6.3) [177] складається з комплекту різнотипних датчиків (тензорезисторів, датчиків кутових швидкостей, віброакселерометрів, динамометрів, пристроїв для енергетичної оцінки машин та ін.), які безпосередньо кріпляться у вузлах та конструкціях досліджуваної машини. УВС забезпечує підсилення, фільтрацію, реєстрацію статодинамічних сигналів, пакет прикладних програм розроблено авторами УВС для забезпечення функціонування системи та статистичної обробки отриманих даних.

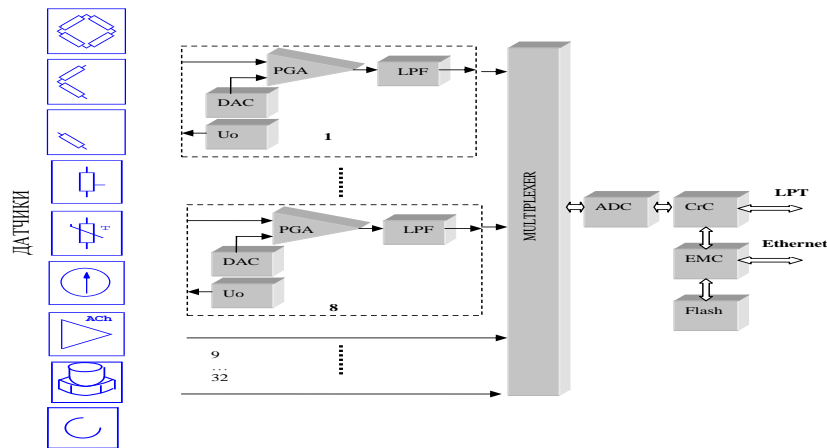


Рис. 6.3. Структурна схема універсальної вимірювальної системи

Універсальність системи полягає її роботі як багатоканального реєстратора з живленням від бортового акумулятора, ін. Універсальність системи також визначається можливістю підключення різноманітних датчиків, що забезпечується вимірювальними модулями з універсальними вимірювальними каналами (1-8). Така схема вимірювань реалізується при автономному режимі роботи системи. При роботі з зовнішнім комп'ютером загальне число вимірювальних каналів – 32, з яких 8 – універсальні, а 24 (9-32) – забезпечують роботу тільки з вихідними сигналами у вигляді напруги з нижнім діапазоном $\pm 1,25\text{В}$.

Для нормалізації сигналів датчиків застосовано вимірювальні модулі.

Функції нормалізації:

- програмно керуюче підсилення;

- забезпечення програмно керуючої смуги пропускання;
- забезпечення необхідних вхідних параметрів (вхідний опір, вхідний струм, погашення синфазних перешкод);
- компенсацію початкового зміщення (розбалансу).

Для забезпечення нормалізації сигналів у склад універсальних каналів входять (рис. 6.3) [239, 240, 177]:

- програмовані підсилювачі PGA;
- 20-бітові цифрово-аналогові перетворювачі зміщення нуля DAC;
- програмовані джерела опорної напруги U_0 для живлення датчиків;
- програмований аналоговий фільтр нижніх частот LPF.

Система працює наступним чином [177]. Нормовані вимірювальні сигнали від датчиків через комутатор MULTIPLEXER поступають на швидкодійний аналого-цифровий перетворювач ADC. Подальша передача інформації здійснюється через крейт - контролер CrC. При роботі з зовнішнім комп'ютером обмін інформацією виконується через паралельний LPT порт. При роботі в автономному режимі (без зовнішнього комп'ютера) реєстрація інформації на Flash-диск виконується за допомогою вбудованого мікрокомп'ютера EMC. У цьому випадку, завдання необхідних режимів роботи і зчитування інформації здійснюється через Ethernet, забезпечуючи можливість роботи в локальній мережі.

Основні технічні характеристики:

- загальна кількість каналів – 32;
- число універсальних вимірювальних каналів – 8;
- частота дискретизації може задаватись в межах від 1Гц до 2кГц (на канал);
- час реєстрації інформації в автономному режимі роботи обернено пропорціональний частоті дискретизації. Так, при частоті дискретизації 2кГц і об'ємі Flash-диска 256МБ час реєстрації складає 52хв.;

• результати вимірювань фіксується в 32-х текстових файлах, що дозволяє виконувати наступну обробку інформації, використовуючи відомі програмні пакети.

Основні технічні характеристики універсальних вимірювальних каналів:

- мінімальний опір резистивних датчиків: 50 Ом;
- живлення датчиків напругою постійного струму: 0,5В; 2,0В; 5,0В;
- коефіцієнт підсилення в режимі роботи з тензорезисторами: 100×1 ; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 128;
- режим вимірювань – статодинаміка;
- діапазон початкового балансування тензомостів, приведений до номінального опору тензорезистора, $\pm 2\%$;
- температурний дрейф нуля, не більше $\pm 1 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$;
- основна похибка каналу, не більше $\pm 0,2\%$;
- діапазон компенсації можливого зміщення нуля: $\pm 5\text{В}$;
- частоти зрізу ФНЧ: 4; 8; 16; 20; 32; 40; 64; 80; 128 Гц.

Загальний вигляд реєструючого блоку універсальної вимірювальної системи і її основні складові зображено на рис. 6.4 [177].

Аналізуючи основні технічні характеристики універсальної вимірювальної (реєструючої) системи відзначимо, що вона має 32 вимірювальні канали (8 з яких є універсальними). При цьому забезпечується робота як в якості автономного багатоканального реєстратора з живленням від бортового акумуляторного джерела електроенергії, так і в якості вимірювальної системи на базі портативного комп'ютера чи стаціонарного комплексу. Отже, універсальна вимірювальна система дозволяє на новому якісному рівні розв'язувати найскладніші задачі експериментальних досліджень: визначення реальної динаміки навантаження мобільних машин і проведення аналізу напружено-деформованого стану конструкцій та агрегатів сільськогосподарської техніки.

Для оцінки вібраційних характеристик мобільних машин у комплект універсальної вимірювальної системи включені п'єзоелектричні віброакселерометри ДН-1-3М, ДН-1-4М.

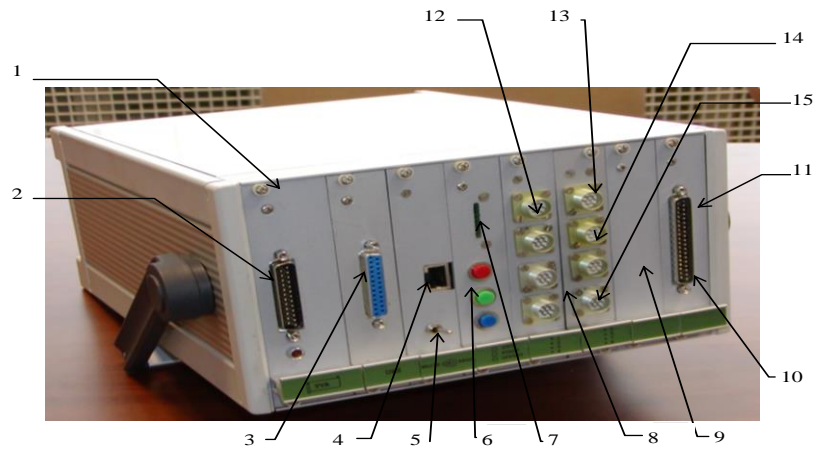


Рис. 6.4. Загальний вигляд реєструючого блоку універсальної вимірювальної системи: 1 - крейт-контроллер LC-014; 2 - вихідний роз'єм паралельного порта крейт-контролера; 3 – роз'єм паралельного порта мікрокомп'ютера; 4 – роз'єм Ethernet; 5 – перемикач режиму роботи «запис/читання»; 6 – кнопки керування («старт», «стоп», «зміщення нуля»); 7 – індикатор режиму запису; 8 – вхідні роз'єми вимірювальних каналів; 9 – модуль аналого-цифрового перетворення LC-301; 10 – модуль комутатора LC-101; 11 – аналогові вхідні сигнали комутатора LC-101; 12 – роз'єми універсальних вимірювальних каналів 1...4; 13 – універсальний вимірювальний канал 5; 14 – канали під'єднання датчиків віброприскорення (канали 6, 7); 15 – канал вимірювання кутової швидкості.

Дане обладнання дає можливість оперативно і ефективно визначити фактичні параметри навантаженості несучих систем причіпних розкидачів добрив.

6.3. Обґрунтування вибору датчиків для оцінки динаміки навантаженості машин в експлуатаційних умовах

Для коректної роботи система доповнюється зовнішніми узгоджувальними підсилювачами, які підключаються послідовно з віброакселерометрами і забезпечують частотний діапазон вимірювальних

сигналів 0,1...4800 Гц (ДН-1-3М); 0,1...12500 Гц (ДН-1-4М) [177]. Для вимірювання кутової швидкості в комплект системи входить датчик, забезпечуючий вимірювання кутової швидкості в діапазоні ± 300 град/с при чутливості 0,5 мВ/град/с і частотному діапазоні до 40 Гц [239, 240, 177]. При експериментальних дослідженнях НДС традиційно застосовуються тензорезистори. Методика тензометричних вимірювань наведена в [92, 169, 288, 289]. Технічні характеристики тензорезисторів ТОВ "Веда", рис.6.5, подано у [289].

Базовим при експериментальних дослідженнях є тарування тензометричних каналів реєструючої системи і тензометричних датчиків опору, причому вибраних з однієї партії і однакового значення величини опору. На рис. 6.6 зображено тарування тензорезисторів, відібраних у залежності від виду випробувань, що складає 5-10% від загальної кількості партії навантажених на універсальному пресі УП-8 за схемою чистого згину.



Рис.6.5. Тензометричний датчик опору одиночний прямокутний П1

Тензорезистор одиночний прямокутний П1 призначений для вимірювання пружних деформацій при статичних та динамічних навантаженнях. Технічна характеристика тензорезистора П1 [289]:

- температурний діапазон роботи: від $-70^{\circ}C$ до $+200^{\circ}C$;
- номінальна база (довжина тензорешітки): 5мм;
- номінальний опір: 200 Ом;
- максимально вимірювальна деформація, млн.: ± 3000 мкм/м;

- чутливість: 1,9-2,3;
- клас точності: Б;

Для тарування тензорезистора застосовано балку поперечного перетину 8мм.×19 мм., матеріал – сталь 25 (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Тарування тензорезисторів на універсальному пресі УП-8

За отриманими даними будується тарувальний графік рис. 6.7 на основі якого за стандартизованою процедурою визначається коефіцієнт тарування вибраних тензорезисторів (додаток А). Для експерименту використовувалися тензодатчики з $k_{\text{тар}}=11,408$ МПа.

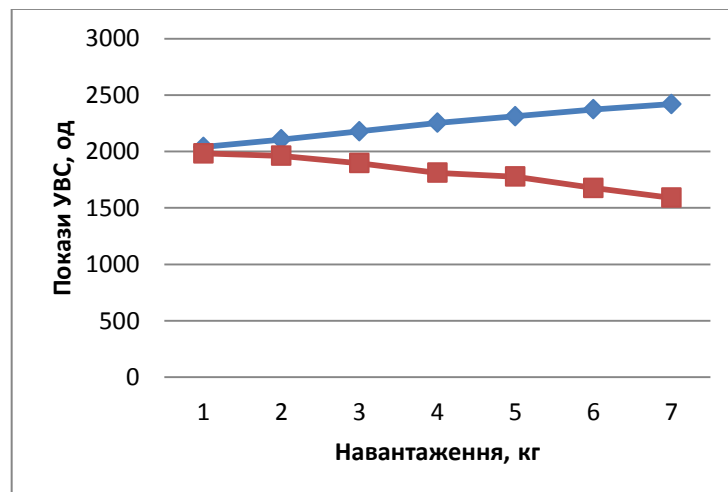


Рис. 6.7. Тарувальний графік

6.4. Аналітичне моделювання напружено – деформованого стану несучої системи причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ - 10

Проблематика відповідності нормативним вимогам надійності с/г машин, які створюються за сучасними агротехнічними вимогами, особливо з урахуванням впливів робочих агресивних експлуатаційних середовищ, на сьогоднішній день у повній мірі не вирішена. Для забезпечення заданого рівня надійності актуальними залишаються раціональні рішення, зокрема з проблем використання матеріалів з необхідними фізико – механічними властивостями, вибору економічно обґрунтованих профілів, застосування з'єднань з компоновкою несучих систем, які забезпечать задану жорсткість металоконструкції і т.д. Обґрунтування вибору оптимального варіанту несучої системи вимагає проведення порівняльної оцінки раціональних варіантів на всіх етапах конструкторських робіт. Несучі металоконструкції причіпних розкидачів добрив є багато разів статично невизначеними, конструктивні елементи однієї рами різноманітні за формою та типами їхніх з'єднань. Отже, моделювання НДС для різних конструктивних схем і компоновок с/г розкидачів добрив при розрахунках на міцність є складною задачею, яка на сьогодні методологічно не має єдиного рішення. З даних причин, для розробки нових конструкцій несучих систем, порівняльні польові випробування не мають альтернативи. Отже, необхідно забезпечити комплексне моделювання експлуатаційної навантаженості просторових рамних конструкцій ПРТ-10, яке є об'ємним і складним аналітично-графічним процесом. Складність полягає в тому, що будь-яка плоска, або просторова несуча металоконструкція складається з численних замкнутих контурів, в кожному з яких при довільному зовнішньому навантаженні виникає шість внутрішніх силових факторів, визначення яких з рівнянь статички неможливе [189, 206, 233, 234].

В цілому, існуючі загальновідомі методи розкриття статичної

невизначеності та розрахунків на міцність складних зварних металоконструкцій, у тому числі несучих структур мобільної с/г техніки [70, 77, 282, 283, 293, 294, 300, 303, 312] з причин громіздких базових розрахункових схем з багатьма припущеннями, також об'ємних математичних записів функцій навантажень після розв'язків, на виході, для складних систем, мають значні похибки та неточності і не описують достовірно процеси, які відбуваються у металоконструкції [190]. Для визначення напружено-деформованого стану рамної конструкції розкидача під дією зовнішніх навантажень, що виникають під час його експлуатації пропонується вдосконалити метод мінімуму потенціальної енергії деформації (ММПЕД) [241]. Розкриваючи за допомогою вказаного методу статичну невизначеність рами, одержано цифрові значення перерізуючих сил, згинальних моментів і крутних моментів. Доведено, що для плоскої замкнутої рамної конструкції з тонкостінних профілів, навантаженої зусиллями перпендикулярними до площини рами, нівелювання енергій стиску і зсуву суттєво не впливає на точність результатів [190, 233, 188]. Несуча металоконструкція причіпного розкидача добрив ПРТ - 10 зварна стержнева тонкостінна просторова статично-невизначена конструктивна система, що складається з поперечних брусів, виготовлених з пустотілих труб прямокутного і квадратного поперечних перетинів, лонжерони рами виготовлені з Z – подібних профілів (рис.6.8). Геометричні характеристики поперечних перетинів рамної конструкції приведено у таблиці 6.2 [62, 141, 142].

Таблиця 6.2

Поперечний перетин	Геометричні характеристики поперечних перетинів		
	Прямокутна труба 180x80x5	Квадратна труба 110x110x6	Z - профіль 200x87x6
Характеристики			
Осьові моменти інерції відносно горизонтальної осі	$I_{x1}=883 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$	$I_{x2}=398,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$I_{x3}=12,27 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$
Полярні моменти інерції	$I_{k1}=612,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$I_{k2}=674,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$I_{k3}=2,606 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$
Секторіальні моменти інерції			$I_{w1}=1,45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$

Розглядувана конструкція є максимально навантаженою при повному завантаженні кузова твердими органічними добривами, $Q_D=100000$ Н. Власна вага металокопструкції, яка навантажує раму конструктивно $Q_M=35000$ Н, навантаження рівномірно розподіляється по несучих елементах (рис. 6.9)

$$q = \frac{Q_D + Q_M}{L} = \frac{100000 + 35000}{25,6} = 5275 \text{ Н / м}, \quad (6.1)$$

де L - периметр контакту кузова з рамною конструкцією, м.

$$L = 4 \cdot 5,3 + 2 \cdot 2,2 = 25,6 \text{ м.}$$

Конструктивно несуча металокопструкція складається з восьми замкнутих контурів, тобто є 24 рази статично невизначена система (рис. 6.8). З врахуванням поздовжньої симетрії і зовнішнього навантаження, розглядується три умовних частини (рис.6.9), в результаті чого в кожному суміжному поперечному перетині елемента рами виникають рівні за величиною та протилежні за напрямками внутрішні силові фактори, а саме M_i - згинальні моменти, K_i - крутні моменти, Q_i - поперечні зусилля. Осьовими силами, згинальними моментами і поперечними силами в горизонтальній площині нехтується [197, 189].

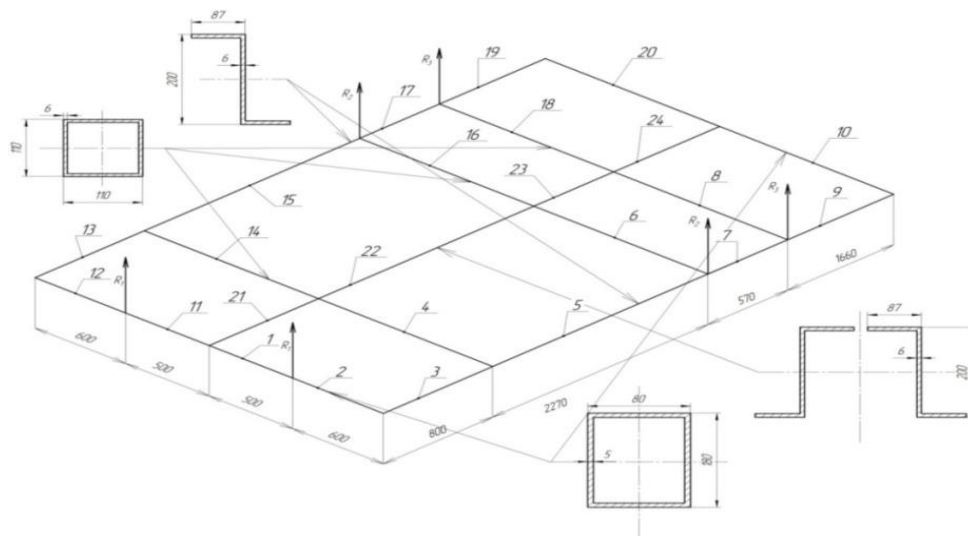


Рис. 6.8. Несуча система причіпного розкидача ПРТ – 10

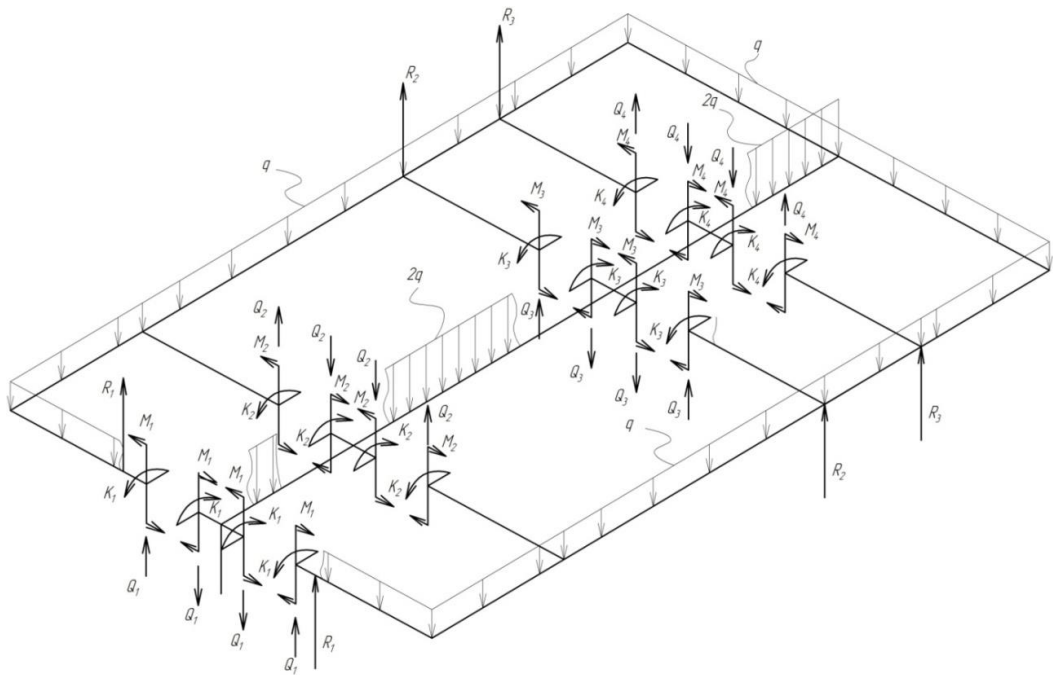


Рис. 6.9. Схематизація навантаженості несучої рами причіпного розкидача добрив ПРТ – 10

При вказаних спрощеннях рамна конструкція стає 12 раз статично невизначеною. Для досліджуваної несучої системи основними графоаналітичними методами розкриття статичної невизначеності є метод сил та метод переміщень, методика яких викладена у дисциплінах «Опір матеріалів». Використання таких методів для рамних конструкцій досліджуваного типу є нераціональним з причини відносної складності та значного об'єму [7, 50, 51]. Методика розкриття статичної невизначеності з використанням матриць впливу і переміщень, розглянута в роботі [70], також є досить громіздкою. В її основу покладено складання ряду матриць з багатьма рядками і стовпцями. У сучасній інженерній практиці, в зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки і розробкою універсальних прикладних програм, використовуються розрахункові моделі побудовані за загальновідомим методом кінцевих елементів (МКЕ). Розрахунки з визначення НДС складних конструктивних структур суттєво прискорюються, що робить метод кінцевих елементів найбільш універсальним, це в значній мірі відповідає вимогам до

розрахунків довільних несучих систем. Однак, поглиблений аналіз отриманих результатів приводить до висновків, що МКЕ забезпечує отримання значень внутрішніх силових факторів, переміщень та інших характеристик у вузлах кінцевих елементів локально, не враховуючи вплив змін перепадів жорсткостей на деформовану несучу систему в цілому.

Переваги МКЕ у порівнянні із традиційними числовими методами полягають у простоті алгоритмізації, можливості повної автоматизації складання рівнянь і отримання результатів для будь-яких складних комбінованих систем [13, 44]. В роботах [312, 231] проведено порівняльні розрахунки НДС рамних конструкцій методом кінцевих елементів з визначеними експериментальним (тензометричним) шляхом. Результати в окремих випадках відрізняються на 30-40 %. Отже, є необхідність уточнення розрахунків за МКЕ точними аналітичними дослідженнями. Для розрахунку таких систем оптимальним за співвідношенням точність - громіздкість буде метод мінімуму потенціальної енергії деформації (ММПЕД) [260], який необхідно модифікувати для рам машин 3 – го класу [226, 256]. Потенціальна енергія деформації плоских просторово-навантажених рам [231, 260]

$$U_0 = U_K + U_{M_x} + U_{M_y} + U_{M_z} + U_{Q_y} + U_{Q_z} + U_N, \quad (6.2)$$

де $U_K = \sum \int \frac{[K]^2}{2GI_k} dx$ - потенціальна енергія деформації кручення елементів;

$$U_{M_y} = \sum \int \frac{[M_y]^2}{2EI_y} dx, \quad U_{M_z} = \sum \int \frac{[M_z]^2}{2EI_z} dx$$

- потенціальна енергія від

згинальної деформації елементів відносно осей y і z ;

$$U_{Q_y} = \sum \int \frac{[Q_y]^2}{2GF} dx, \quad U_{Q_z} = \sum \int \frac{[Q_z]^2}{2GF} dx$$

- потенціальна енергія деформації

елементів рами від зрізу вздовж осей y і z ;

$$U_N = \sum \int \frac{[N]^2}{2GF} dx$$

- потенціальна енергія деформації елементів рами від

деформації розтягу-стиску;

K - функції крутних моментів кожного елемента конструкції;

M_y, M_z - функції згинальних моментів кожного елемента конструкції;

Q_y, Q_z - функції перерізуючих сил кожного елемента конструкції;

N - функції нормальних сил кожного елемента конструкції;

I_y, I_z - осьові моменти інерції поперечного перетину елементів профілю рамної конструкції;

I_K - момент інерції поперечного перетину при крученні профілю рамної конструкції;

E - модуль пружності першого роду, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

G - модуль зсуву, для сталей $G = 8 \cdot 10^4$ МПа;

F - площа поперечного перетину.

Для одного замкнутого контуру просторово навантаженої плоскої рами складається 6 виразів внутрішніх силових факторів. Несуча система може складатися від 1-го до декількох десятків контурів. Записати і обчислити необхідну кількість виразів складно, визначення невідомих величин є занадто громіздким аналітично-розрахунковим процесом. Необхідно модифікувати ММПЕД. В [177, 190, 233, 197, 206, 189] доведено, що потенціальними енергіями деформацій від зрізу та розтягу-стиску можна знехтувати, похибка у визначенні невідомих складає 0,063% - 1.3%. Тобто статична невизначеність одного замкнутого контура зменшується до запису функцій потенціальних енергій деформацій від згину та кручення.

Для розкриття статичної невизначеності несучих тонкостінних систем 3- го класу, зокрема ПРТ - 10 (рис. 6.9), використовуємо модифікований ММПЕД, при записі функцій потенціальних енергій деформацій враховуємо винятково енергії деформацій кручення і згину.

Функції крутних і згинальних моментів для лівої частини рамної

конструкції

1 ділянка, $0 \leq x \leq 0,5\text{м}$:

$$K_1(x) = -K_1; M_1(x) = M_1 + Q_1 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2};$$

2 ділянка, $0 \leq x \leq 0,6\text{м}$:

$$K_2(x) = -K_1; M_2(x) = M_1 + Q_1 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot x;$$

3 ділянка, $0 \leq x \leq 0,8\text{м}$:

$$K_3(x) = -M_1 - Q_1 \cdot 1,1 + \frac{q \cdot 1,1^2}{2} + R_1 \cdot 0,6; M_3(x) = -K_1 + Q_1 \cdot x - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot x;$$

4 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_4(x) = -K_2; M_4(x) = M_2 + Q_2 \cdot x;$$

5 ділянка, $0 \leq x \leq 2,27\text{м}$:

$$K_5(x) = -M_1 - M_2 - Q_1 \cdot 1,1 - Q_2 \cdot 1,1 + \frac{q \cdot 1,1^2}{2} - R_1 \cdot 0,6;$$

$$M_5(x) = -K_1 - K_2 + Q_1 \cdot 0,8 + Q_1 \cdot x + Q_2 \cdot x - q \cdot 1,1 \cdot 0,8 - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot 0,8^2}{2} - q \cdot 0,8 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot 0,8 + R_1 \cdot x;$$

6 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_6(x) = -K_3; M_6(x) = M_3 + Q_3 \cdot x;$$

7 ділянка, $0 \leq x \leq 0,57\text{м}$:

$$K_7(x) = -M_1 - M_2 - M_3 - Q_1 \cdot 1,1 - Q_2 \cdot 1,1 - Q_3 \cdot 1,1 + \frac{q \cdot 1,1^2}{2} - R_1 \cdot 0,6;$$

$$M_7(x) = -K_1 - K_2 - K_3 + Q_1 \cdot 3,07 + Q_1 \cdot x + Q_2 \cdot 2,27 + Q_2 \cdot x + Q_3 \cdot x - q \cdot 1,1 \cdot 3,07 - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot 3,07^2}{2} - q \cdot 3,07 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot 3,07 + R_1 \cdot x;$$

8 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_8(x) = -K_4; M_8(x) = M_4 + Q_4 \cdot x;$$

9 ділянка, $0 \leq x \leq 1,66\text{м}$:

$$K_9(x) = -M_1 - M_2 - M_3 - M_4 - Q_1 \cdot 1,1 - Q_2 \cdot 1,1 - Q_3 \cdot 1,1 - Q_4 \cdot 1,1 + \frac{q \cdot 1,1^2}{2} - R_1 \cdot 0,6;$$

$$M_9(x) = -K_1 - K_2 - K_3 - K_4 + Q_1 \cdot 3,64 + Q_1 \cdot x + Q_2 \cdot 2,84 + Q_2 \cdot x + Q_3 \cdot 0,57 + Q_3 \cdot x + Q_4 \cdot x + R_2 \cdot x +$$

$$+ R_2 \cdot 0,285 - q \cdot 1,1 \cdot 3,64 - q \cdot 3,63 \cdot 1,1 - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot 3,64^2}{2} - q \cdot 3,64 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot 3,64 + R_1 \cdot x + R_3 \cdot x;$$

10 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_{10}(x) = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 - Q_1 \cdot 5,3 - Q_2 \cdot 4,5 - Q_3 \cdot 2,23 - Q_4 \cdot 1,66 +$$

$$+ q \cdot 1,1 \cdot 5,3 + \frac{q \cdot 5,3^2}{2} - R_2 \cdot 1,945 - R_1 \cdot 5,3 - R_3 \cdot x;$$

$$M_{10}(x) = -M_1 - M_2 - M_3 - M_4 - Q_1 \cdot 1,1 + Q_1 \cdot x - Q_2 \cdot 1,1 + Q_2 \cdot x - Q_3 \cdot 1,1 + Q_3 \cdot x - Q_4 \cdot 1,1 +$$

$$+ Q_4 \cdot x + \frac{q \cdot 1,1^2}{2} - q \cdot 1,1 \cdot x - q \cdot 5,3 \cdot x + R_2 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot x - R_1 \cdot 0,6 + R_2 \cdot x + R_3 \cdot x;$$

Функції крутих та згинальних моментів для правої частини рамної конструкції

11 ділянка, $0 \leq x \leq 0,5\text{м}$:

$$K_{11}(x) = K_1; M_{11}(x) = M_1 + Q_1 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2};$$

12 ділянка, $0 \leq x \leq 0,6\text{м}$:

$$K_{12}(x) = K_1; M_{12}(x) = M_1 + Q_1 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot x;$$

13 ділянка, $0 \leq x \leq 0,8\text{м}$:

$$K_{13}(x) = M_1 + Q_1 \cdot 1,1 - \frac{q \cdot 1,1^2}{2} - R_1 \cdot 0,6; M_{13}(x) = -K_1 + Q_1 \cdot x - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot x;$$

14 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_{14}(x) = K_2; M_{14}(x) = M_2 + Q_2 \cdot x;$$

15 ділянка, $0 \leq x \leq 2,27\text{м}$:

$$K_{15}(x) = M_1 + M_2 + Q_1 \cdot 1,1 + Q_2 \cdot 1,1 - \frac{q \cdot 1,1^2}{2} + R_1 \cdot 0,6;$$

$$M_{15}(x) = -K_1 - K_2 + Q_1 \cdot 0,8 + Q_1 \cdot x + Q_2 \cdot x - q \cdot 1,1 \cdot 0,8 - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot 0,8^2}{2} -$$

$$- q \cdot 0,8 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot 0,8 + R_1 \cdot x;$$

16 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_{16}(x) = K_3; \quad M_{16}(x) = M_3 + Q_3 \cdot x;$$

17 ділянка, $0 \leq x \leq 0,57\text{м}$:

$$K_{17}(x) = M_1 + M_2 + M_3 + Q_1 \cdot 1,1 + Q_2 \cdot 1,1 + Q_3 \cdot 1,1 - \frac{q \cdot 1,1^2}{2} + R_1 \cdot 0,6;$$

$$M_{17}(x) = -K_1 - K_2 - K_3 + Q_1 \cdot 3,07 + Q_1 \cdot x + Q_2 \cdot 2,27 + Q_2 \cdot x + Q_3 \cdot x - q \cdot 1,1 \cdot 3,07 - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot 3,07^2}{2} - q \cdot 3,07 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot 3,07 + R_1 \cdot x;$$

18 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_{18}(x) = K_4; \quad M_{18}(x) = M_4 + Q_4 \cdot x;$$

19 ділянка, $0 \leq x \leq 1,66\text{м}$:

$$K_{19}(x) = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + Q_1 \cdot 1,1 + Q_2 \cdot 1,1 + Q_3 \cdot 1,1 + Q_4 \cdot 1,1 - \frac{q \cdot 1,1^2}{2} + R_1 \cdot 0,6;$$

$$M_{19}(x) = -K_1 - K_2 - K_3 - K_4 + Q_1 \cdot 3,64 + Q_1 \cdot x + Q_2 \cdot 2,84 + Q_2 \cdot x + Q_3 \cdot 0,57 + Q_3 \cdot x + Q_4 \cdot x + R_2 \cdot x + R_2 \cdot 0,285 - q \cdot 1,1 \cdot 3,64 - q \cdot 3,63 \cdot 1,1 - q \cdot 1,1 \cdot x - \frac{q \cdot 3,64^2}{2} - q \cdot 3,64 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot 3,64 + R_1 \cdot x + R_3 \cdot x;$$

20 ділянка, $0 \leq x \leq 1,1\text{м}$:

$$K_{20}(x) = -K_1 - K_2 - K_3 - K_4 + Q_1 \cdot 5,3 + Q_2 \cdot 4,5 + Q_3 \cdot 2,23 + Q_4 \cdot 1,66 - q \cdot 1,1 \cdot 5,3 - \frac{q \cdot 5,3^2}{2} + R_2 \cdot 1,945 + R_1 \cdot 5,3 + R_3 \cdot x;$$

$$M_{20}(x) = -M_1 - M_2 - M_3 - M_4 - Q_1 \cdot 1,1 + Q_1 \cdot x - Q_2 \cdot 1,1 + Q_2 \cdot x - Q_3 \cdot 1,1 + Q_3 \cdot x - Q_4 \cdot 1,1 + Q_4 \cdot x + \frac{q \cdot 1,1^2}{2} - q \cdot 1,1 \cdot x - q \cdot 5,3 \cdot x + R_2 \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} + R_1 \cdot x - R_1 \cdot 0,6 + R_2 \cdot x + R_3 \cdot x;$$

Функції крутних та згинальних моментів для центральної частини рамної конструкції

21 ділянка, $0 \leq x \leq 0,8\text{м}$:

$$M_{21}(x) = 2 \cdot K_1 - 2 \cdot Q_1 \cdot x - \frac{2 \cdot q \cdot x^2}{2};$$

22 ділянка, $0 \leq x \leq 2,27\text{м}$:

$$M_{22}(x) = 2 \cdot K_1 + 2 \cdot K_2 - 2 \cdot Q_1 \cdot 0,8 - 2 \cdot Q_1 \cdot x - 2 \cdot Q_2 \cdot x - 2 \cdot q \cdot 0,8 \cdot x - \frac{2 \cdot q \cdot 0,8^2}{2} - \frac{2 \cdot q \cdot x^2}{2};$$

23 ділянка, $0 \leq x \leq 0,57\text{м}$:

$$M_{23}(x) = 2 \cdot K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 - 2 \cdot Q_1 \cdot 3,07 - 2 \cdot Q_1 \cdot x - 2 \cdot Q_2 \cdot 2,27 - 2 \cdot Q_2 \cdot x - 2 \cdot Q_3 \cdot x - 2 \cdot q \cdot 3,07 \cdot x - \frac{2 \cdot q \cdot 3,07^2}{2} - \frac{2 \cdot q \cdot x^2}{2};$$

24 ділянка, $0 \leq x \leq 1,66\text{м}$:

$$M_{24}(x) = 2 \cdot K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 + 2 \cdot K_4 - 2 \cdot Q_1 \cdot 3,64 - 2 \cdot Q_1 \cdot x - 2 \cdot Q_2 \cdot 2,84 - 2 \cdot Q_2 \cdot x - 2 \cdot Q_3 \cdot 0,57 - 2 \cdot Q_3 \cdot x - 2 \cdot Q_4 \cdot x - 2 \cdot q \cdot 3,64 \cdot x - \frac{2 \cdot q \cdot 3,64^2}{2} - \frac{2 \cdot q \cdot x^2}{2};$$

Сумарна потенціальна енергія від деформації згину

$$U(M) = U(M_1) + U(M_2) + U(M_3) + U(M_4) + U(M_5) + U(M_6) + U(M_7) + U(M_8) + U(M_9) + U(M_{10}) + U(M_{11}) + U(M_{12}) + U(M_{13}) + U(M_{14}) + U(M_{15}) + U(M_{16}) + U(M_{17}) + U(M_{18}) + U(M_{19}) + U(M_{20}) + U(M_{21}) + U(M_{22}) + U(M_{23}) + U(M_{24});$$

Сумарна потенціальна енергія від деформації кручення

$$U(K) = U(K_1) + U(K_2) + U(K_3) + U(K_4) + U(K_5) + U(K_6) + U(K_7) + U(K_8) + U(K_9) + U(K_{10}) + U(K_{11}) + U(K_{12}) + U(K_{13}) + U(K_{14}) + U(K_{15}) + U(K_{16}) + U(K_{17}) + U(K_{18}) + U(K_{19}) + U(K_{20});$$

Загальна потенціальна енергія від деформації кручення та згину

$$UU = U(K) + U(M);$$

Використовуючи ММПЕД з системи рівнянь

$$\frac{\partial UU}{\partial M_1} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial M_2} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial M_3} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial M_4} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial K_1} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial K_2} = 0;$$

$$\frac{\partial UU}{\partial K_3} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial K_4} = 0;$$

(6.3)

$$\frac{\partial UU}{\partial Q_1} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial Q_2} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial Q_3} = 0; \quad \frac{\partial UU}{\partial Q_4} = 0,$$

В Matlab визначаємо внутрішні силові фактори (додаток Б). Для порівняння результатів обчислень проводимо розрахунок у ППП Ліра-9.2.

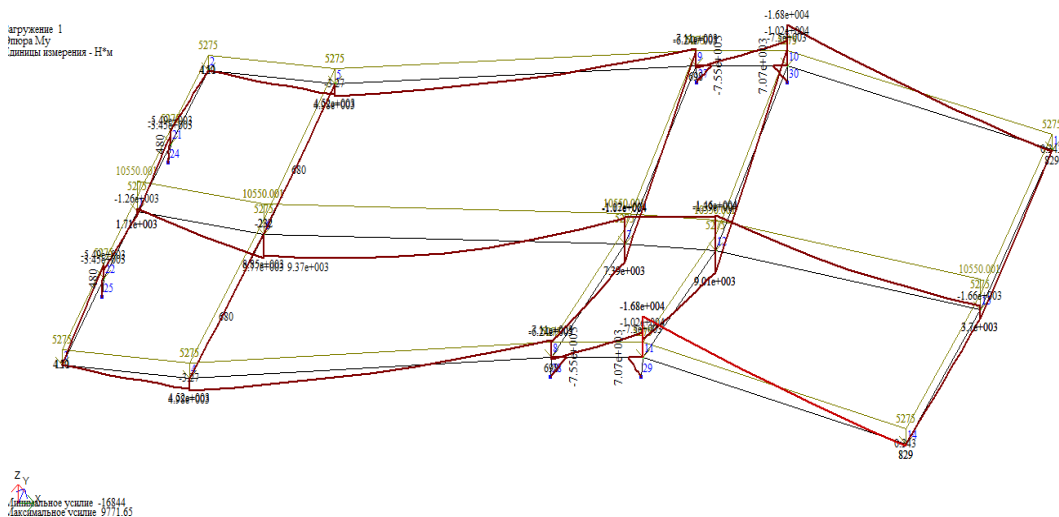


Рис. 6.10. Епюра згинальних моментів несучої рами причіпного розкидача ПРТ – 10 одержана за розрахунками в ППП Ліра

Розбіжність складає менше 10 %. Результати представлено у табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Результати обчислень внутрішніх зусиль в несучій системі ПРТ – 10

Силовий фактор	M_1 , Нм	M_2 , Нм	M_3 , Нм	M_4 , Нм	K_1 , Нм	K_2 , Нм	K_3 , Нм	K_4 , Нм	Q_1 , Н	Q_2 , Н	Q_3 , Н	Q_4 , Н
Аналітична модель	254	624	12334	13543	820	1076	863	108	9665	2334	8315	9422
Ліра 9,2	241	598	12200	13010	790	1087	871	101	9600	2310	8298	9388

Лонжерони з'єднані жорстко з поперечинами рами, що призводить до виникнення деформації стисненого кручення. В даному випадку загальний крутний момент [30, 51]

$$K = M_K + M_\omega, \quad (6.4)$$

де M_K - момент чистого кручення;

M_ω - згинально-крутний момент.

Внутрішні силові фактори при стисненому крученні в будь-якому поперечному перетині стержня який характеризується кутовою деформацією $\theta(x)$ зв'язані диференціальними рівняннями [30, 51]

$$M_K = GI_K \theta', \quad B_\omega = -EI_\omega \theta'', \quad M_\omega = B_\omega' = -EI_\omega \theta''', \quad (6.5)$$

де B_ω - бімомент; I_ω - секторіальний момент інерції поперечного перетину; G - модуль зсуву; E - модуль пружності; I_K - момент інерції перетину при крученні.

При стисненому крученні, рівень напружень у матеріалі несучої рами, в залежності від напрямку дії навантажень і їх місця прикладання, може суттєво збільшуватись чи зменшуватись. Виникає необхідність уточненого аналітичного дослідження напружено-деформованого стану лонжерону в місцях кріплення коліс. Ділянки I і II (рис.6.11, рис. 6.12) жорстко з'єднані з

поперечними елементами тримкої системи. Для подальших аналітичних досліджень внутрішніх силових факторів в несучій металоконструкції причіпного розкидача необхідно визначити кількісний і якісний склад НДС з урахуванням всіх видів деформацій тримкої структури.

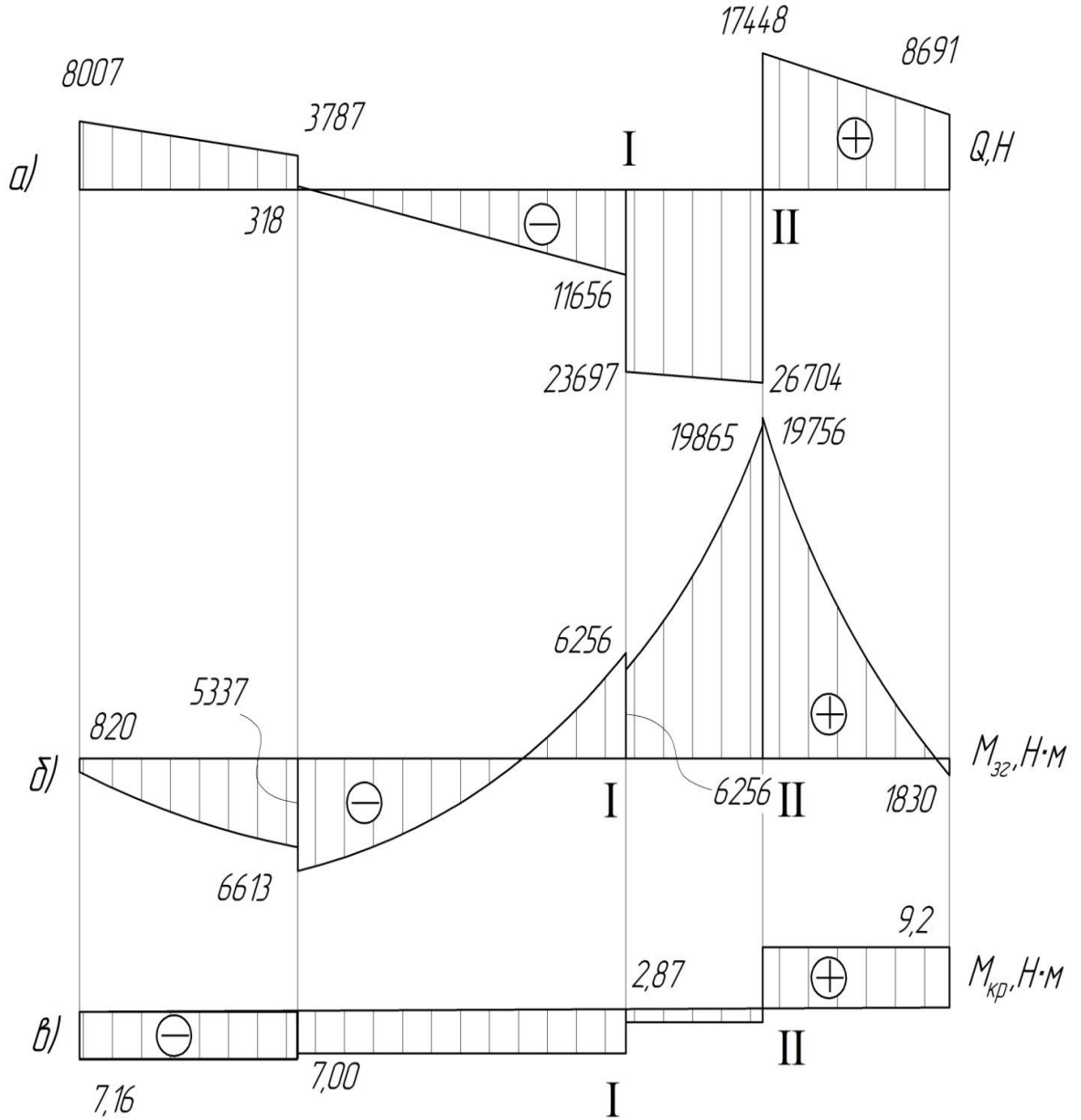


Рис. 6.11. Внутрішні зусилля в лонжероні несучої рами причіпного розкидача ПРТ – 10

Універсальне рівняння кутів закручування ділянки I - II [15, 16, 35] (рис.6.12б)

$$\theta(x) = \theta_0 + \theta'_0 \frac{sh(k \cdot x)}{k} + \frac{B_0(1 - ch(k \cdot x))}{G \cdot I_k} + \frac{K_0(k \cdot x - sh(k \cdot x))}{k \cdot G \cdot I_k} - \frac{m}{k^2 \cdot G \cdot I_k} \cdot \left(\frac{k^2 \cdot x^2}{2} + 1 - ch(k \cdot x) \right) \quad (6.6)$$

де

$$K_0 = 2,87 \text{ H} \cdot \text{м}; \quad I_k = 2,606 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4; \quad I_\omega = 1,45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^6;$$

$$k = \sqrt{\frac{GI_k}{EI_\omega}} = 0,848 \text{ м}^{-1}; \quad l = 0,57 \text{ м};$$

$$m = \frac{q \cdot b}{2} = \frac{5275 \cdot 0,087}{2} = 229,5 \frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{м}}.$$

Граничні умови $\theta(x=0) = 0$, $\theta(x=l) = 0$, $\theta'(x=0) = 0$, визначаються початкові параметри

$$\theta_0 = 0; \quad \theta'_0 = 0;$$

$$B_0 = \frac{1}{1 - ch(k \cdot l)} \cdot \left(-\frac{K_0 \cdot (k \cdot l - sh(k \cdot l))}{k} + \frac{m}{k^2} \cdot \left(\frac{k^2 \cdot l^2}{2} + 1 - ch(k \cdot l) \right) \right) = \frac{1}{1 - ch(0,848 \cdot 0,57)} \times \quad (6.7)$$

$$\times \left(\frac{8,66 \cdot (0,848 \cdot 0,57 - sh(0,848 \cdot 0,57))}{0,848} + \frac{229,5}{0,848^2} \cdot \left(\frac{0,848^2 \cdot 0,57^2}{2} + 1 - ch(0,848 \cdot 0,57) \right) \right) = 5,6 \text{ H} \cdot \text{м}^2,$$

тоді

$$\theta(x) = \frac{B_0(1 - ch(k \cdot x))}{G \cdot I_k} + \frac{K_0(k \cdot x - sh(k \cdot x))}{k \cdot G \cdot I_k} - \frac{m}{k^2 \cdot G \cdot I_k} \cdot \left(\frac{k^2 \cdot x^2}{2} + 1 - ch(k \cdot x) \right). \quad (6.8)$$

Отримане рівняння тричі диференціюється

$$\begin{aligned}\theta'(x) &= \frac{B_0 \cdot k}{G \cdot I_k} \cdot sh(k \cdot x) + \frac{m \cdot sh(k \cdot x)}{k \cdot G \cdot I_k} - \frac{K_0 \cdot ch(k \cdot x)}{G \cdot I_k} + \frac{K_0}{G \cdot I_k} - \frac{m \cdot x}{G \cdot I_k}; \\ \theta''(x) &= \frac{B_0 \cdot k}{G \cdot I_k} \cdot ch(k \cdot x) + \frac{m \cdot ch(k \cdot x)}{G \cdot I_k} + \frac{K_0 \cdot k \cdot sh(k \cdot x)}{G \cdot I_k} - \frac{m}{G \cdot I_k}; \\ \theta'''(x) &= -\frac{B_0 \cdot k^3}{G \cdot I_k} \cdot sh(k \cdot x) - \frac{m \cdot k \cdot ch(k \cdot x)}{G \cdot I_k} + \frac{K_0 \cdot k^2 \cdot ch(k \cdot x)}{G \cdot I_k}.\end{aligned}\tag{6.9}$$

Використовуючи (2), одержується

$$\begin{aligned}M_k &= G \cdot I_k \cdot \theta'(x) = B_0 \cdot k \cdot sh(k \cdot x) + \frac{m \cdot sh(k \cdot x)}{k} - K_0 \cdot ch(k \cdot x) + K_0 - m \cdot x; \\ B_\omega &= -E \cdot I_\omega \cdot \theta''(x) = -B_0 \cdot ch(k \cdot x) - \frac{m}{k^2} \cdot ch(k \cdot x) - \frac{K_0}{k} \cdot sh(k \cdot x) + \frac{m}{k^2}; \\ M_\omega &= -E \cdot I_\omega \cdot \theta'''(x) = B_0 \cdot k \cdot sh(k \cdot x) + \frac{m \cdot ch(k \cdot x)}{k} - K_0 \cdot ch(k \cdot x).\end{aligned}\tag{6.10}$$

Результати обчислень приведено в табл. 6.4

Таблиця 6.4

Результати обчислень внутрішніх силових факторів

$x, \text{м}$	0	1/4=0,1425м	1/2=0,285м	3/4=0,4275м	1=0,57м
$M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	0	-0,63	-1,71	-3,73	-7,2
$B_\omega, \text{Н} \cdot \text{м}^2$	-5,6	-8,38	-15,96	-28,42	-45,98
$M_\omega, \text{Н} \cdot \text{м}$	-2,87	30,47	64,25	98,97	135,14

Епюри розподілу внутрішніх силових факторів зображено на рис.6.11, рис. 6.12.

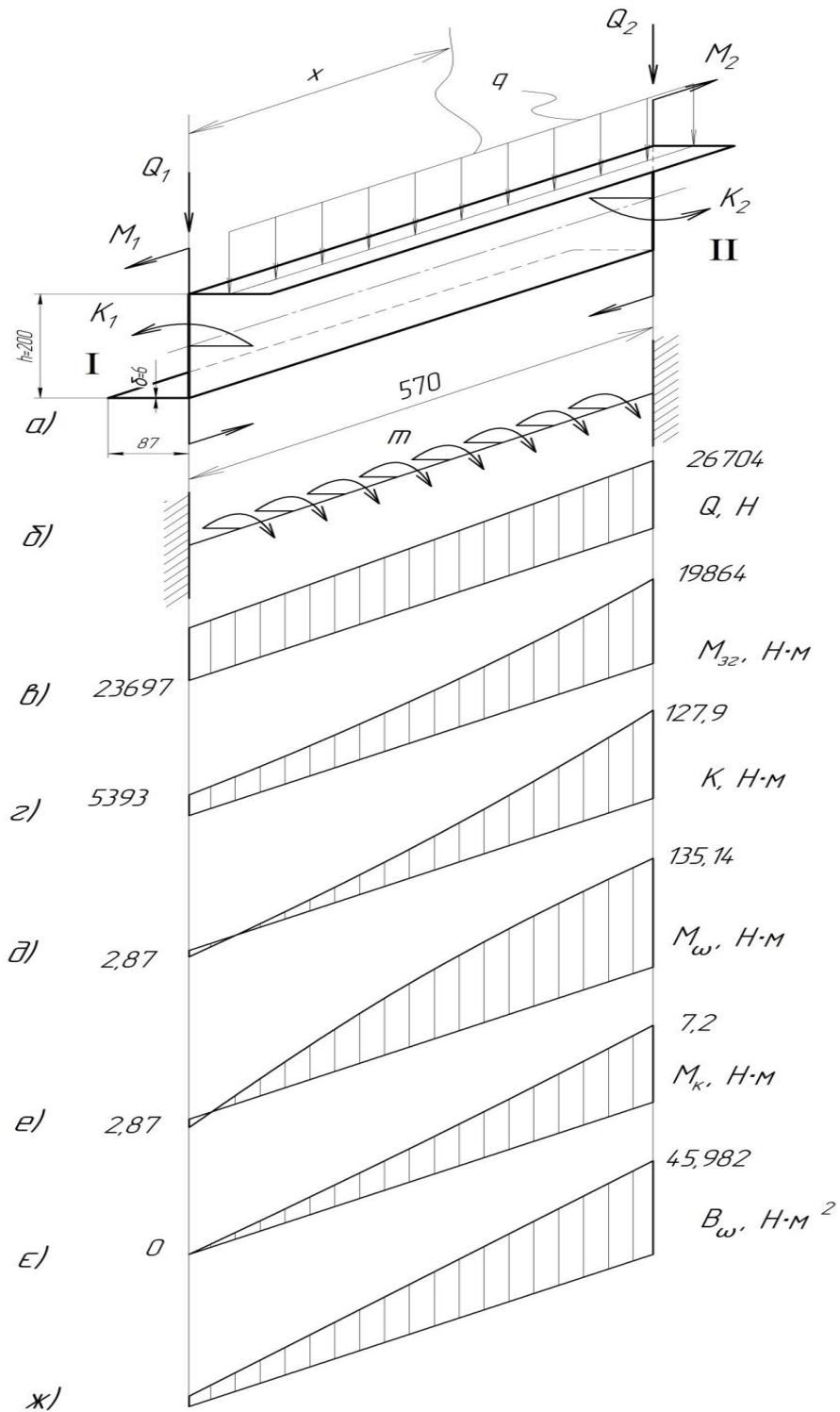


Рис. 6.12. Розрахункова схема опорної ділянки лонжерона ПРТ - 10

Аналіз кількісних і якісних характеристик НДС в перетині II Z - подібного профілю (рис.6.13, рис.6.14). Аналіз виконується за залежностями з [56, 62, 66, 67, 70]. Обчислення нормальних напружень від дії згинального моменту в тонкостінному профілі

$M_{32} = 19865 \text{ Н} \cdot \text{м}$, (рис. 6.13 б)

$$\sigma_{\max}(M_{32}) = \frac{M_{32}}{I_x} \cdot \frac{h}{2} = \frac{19865}{12,27 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0,2}{2} = 161,9 \text{ МПа}, \quad (6.11)$$

$$\sigma_{\text{полки}}(M_{32}) = \frac{M_{32}}{I_x} \cdot \left(\frac{h}{2} - \delta \right) = \frac{19865}{12,27 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{0,2}{2} - 0,06 \right) = 152,2 \text{ МПа}. \quad (6.12)$$

Нормальні секторіальні напруження від дії бімоменту $B_{\omega} = 45,98 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$,
(рис. 6.13 в)

$$\sigma(B_{\omega}) = \frac{B_{\omega}}{I_{\omega}} \cdot \omega = \frac{45,98}{1,45 \cdot 10^{-8}} \cdot \omega \cdot 10^{-6} = 3171 \cdot \omega \text{ МПа}, \quad (6.13)$$

Де I_{ω} - секторіальний момент інерції площі поперечного перетину,
 $I_{\omega} = 1,45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^6$,

ω_{\max} - максимальна секторіальна (площа) координата точки поперечного
перетину, $\omega_{\max} = \frac{h}{2} \cdot b = \frac{20}{2} \cdot 8,7 = 87 \text{ см}^2 = 87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$,

$$\sigma_{\max}(B_{\omega}) = \frac{B_{\omega}}{I_{\omega}} \cdot \omega_{\max} = \frac{45,98}{1,45 \cdot 10^{-8}} \cdot 87 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6} = 27,59 \text{ МПа}.$$

На рис.6.13 г зображено сумарну епюру нормальних напружень.

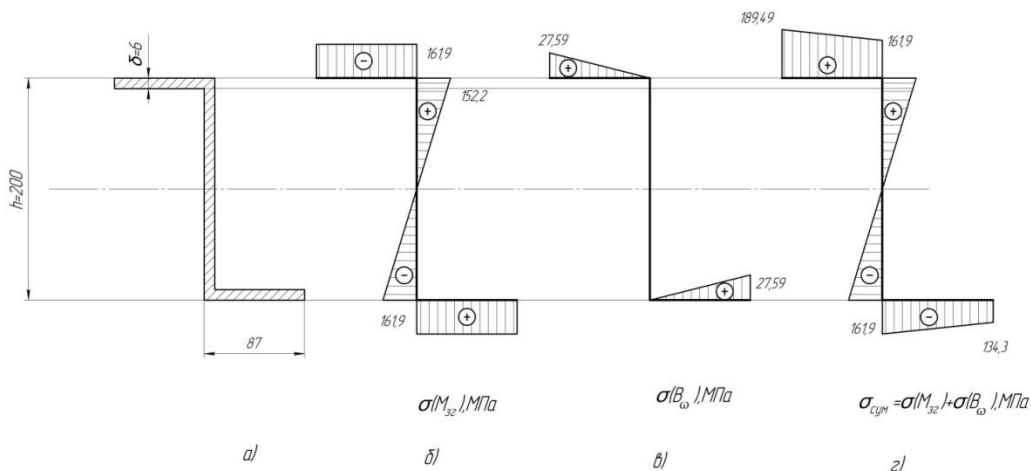


Рис 6.16. Розподіл напружень від згинального моменту за перетином
лонжерону

Дотичні напруження від вертикальної перерізуючої сили Q , $Q = 26704 \text{ Н}$,
(рис 6.14б)

$$\tau(Q) = \frac{Q \cdot S_x^{\text{поліці}}}{\delta \cdot I_x} = \frac{26704 \cdot 50,63 \cdot 10^{-6}}{0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 12,27 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 18,4 \text{ МПа}, \quad (6.14)$$

$$\tau_{\max}(Q) = \frac{Q \cdot S_x^{\max}}{\delta \cdot I_x} = \frac{26704 \cdot 77,14 \cdot 10^{-6}}{0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 12,27 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 28 \text{ МПа}, \quad (6.15)$$

Де, відповідно до геометричних характеристик профілів несучої системи розкидача добрив

$$S_x^{\text{поліці}} = 8,7 \cdot 0,6 \cdot 9,7 \cdot 10^{-6} = 50,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$S_x^{\max} = (50,63 + 4,7 \cdot 0,6 \cdot 9,7) \cdot 10^{-6} = 77,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Величина напружень від дії згинально-крутильного моменту M_ω ,
 $M_\omega = 135,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$, в точці максимуму значень - переходу полицки стінки
(рис. 6.14в)

$$\tau(M_\omega) = \frac{M_\omega \cdot S_\omega^{\text{поліці}}}{\delta \cdot I_\omega} = \frac{135,14 \cdot 227,1 \cdot 10^{-8}}{0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1,45 \cdot 10^{-8}} \cdot 10^{-6} = 3,528 \text{ МПа}, \quad (6.16)$$

$S_\omega^{\text{поліці}}$ - секторіально статичний момент відсіченої частини перетину,

$$S_\omega^{\text{поліці}} = \frac{h \cdot b^2}{4} \cdot \delta = \frac{0,2 \cdot 0,087^2}{4} \cdot 0,006 = 227,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Напруження від деформації чистого кручення M_K , $M_K = 7,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$
(рис. 6.14 г)

$$\tau(M_K) = \frac{M_K}{I_K} \cdot \delta = \frac{7,2}{2,606 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6} = 1,66 \text{ МПа.} \quad (6.17)$$

I_K - момент інерції поперечного перетину кручення.

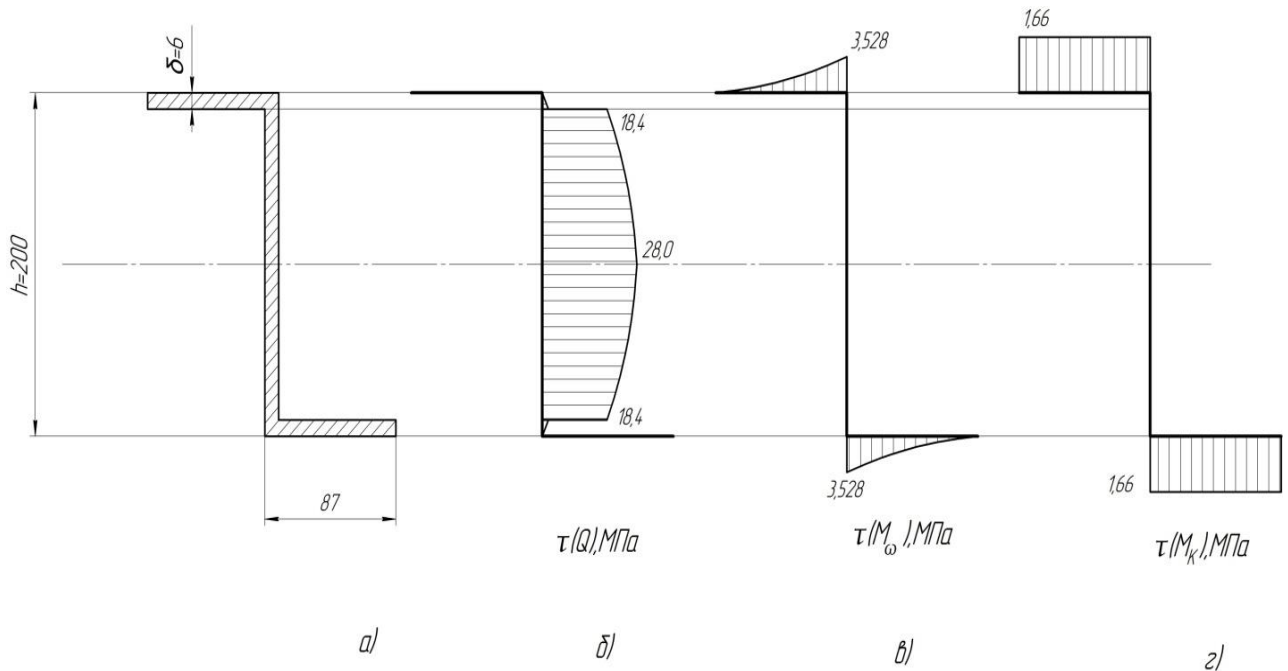


Рис 6.14. Розподіл напружень від перерізуючого зусилля у перетині лонжерону розкидача

Для достовірного моделювання розглядається зашивка лонжеронів у місці кріплення коліс на ділянках приварювання до елементів косинок з листової сталі Ст 3 товщиною 5 мм.

Уточнений, відповідно до конструктивних особливостей розглядуваної несучої системи розкидача органічних добрив ПРТ – 10, аналіз напруженого стану вузла рами зображеного на рис.6.15.

Необхідно визначити максимальні нормальні напруження від дії згинального моменту в перетинах 1-1, 2-2, 3-3 (рис. 6.15).

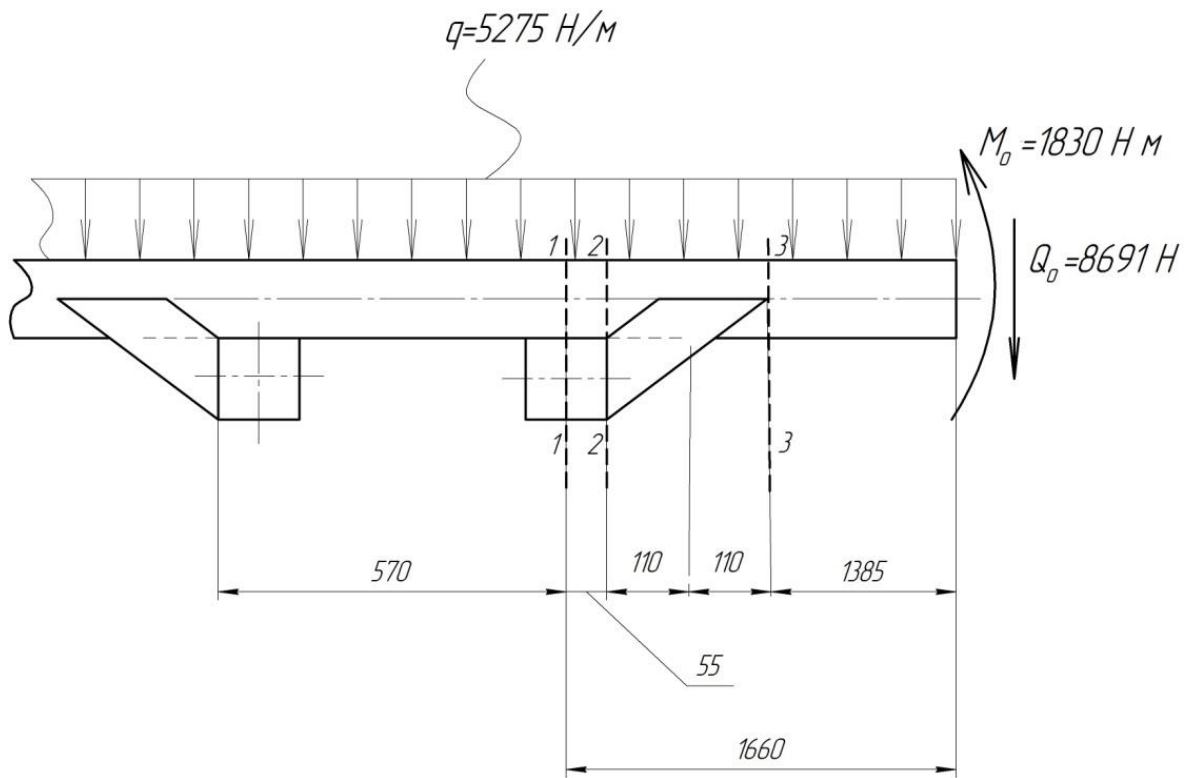


Рис 6.15. Розрахункова схема елемента лонжерона рами ПРТ - 10

Геометричні розміри ділянки в перетині 1-1 зображено на рис. 6.16.

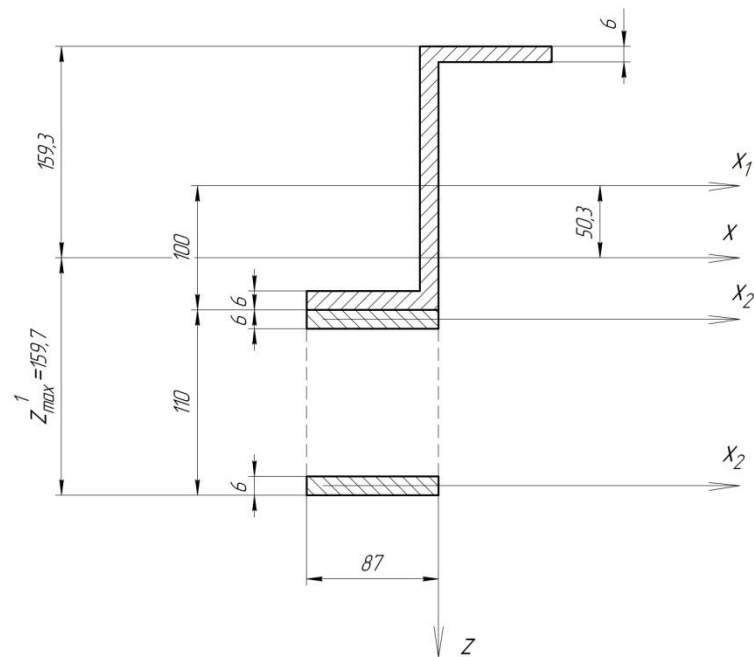


Рис.6.16. Поперечний перетин досліджуваного елемента

Визначаються геометричні характеристики поперечного перетину
рис.6.16. Координата центра ваги [3]

$$z_{C_1} = \frac{\sum S_{x_i}}{\sum F} = \frac{F_1 \cdot y_1 + F_2 \cdot y_2 + F_2 \cdot y_{22}}{F_1 + 2F_2} = \quad (6.18)$$

$$\frac{0 + 5,22(10 + 0,3) + 5,22 \cdot (10 + 10,7)}{21,72 + 2 \cdot 5,22} = 5,03 \text{ см} = 50,3 \text{ мм},$$

де F_1 - площа поперечного перетину Z- подібного профілю, $F_1 = 20 \cdot 0,6 + 2(8,1 \cdot 0,6) = 21,72 \text{ см}^2$;

F_2 - площа поперечного перетину полоси, $F_2 = 8,7 \cdot 0,6 = 5,22 \text{ см}^2$.

Осьовий момент інерції складного поперечного перетину

$$I_x^1 = I_{x_1} + F_1 \cdot 5,03^2 + I_{x_2} + F_2 \cdot (10,3 - 5,03)^2 + I_{x_2} +$$

$$+ F_2 \cdot (21,0 - 0,3 - 5,03)^2 = \quad (6.19)$$

$$= 1227 + 21,78 \cdot 5,03^2 + 0,1566 + 5,22 \cdot (10,3 - 5,03)^2 +$$

$$+ 0,1566 + 5,22 \cdot (21,0 - 0,3 - 5,03)^2 = 3204 \text{ см}^4,$$

де I_{x_1} - осьовий момент інерції Z профілю, $I_{x_1} = 1227 \text{ см}^4$;

I_{x_2} - осьовий момент інерції полоси, $I_{x_2} = \frac{8,7 \cdot 0,6^3}{12} = 0,1566 \text{ см}^4$.

Максимальні нормальні напруження від згинального моменту в перетині
1-1, рис 6.15

$$\sigma_{\max}^1 = \frac{M_1}{I_x^1} \cdot z_{\max}^1 = \frac{1985 \cdot 10^{-6}}{32,04 \cdot 10^{-6}} \cdot 159,7 \cdot 10^{-3} = 99,0 \text{ МПа} \quad (6.20)$$

де $z_{\max}^1 = 159,7 \text{ мм}$, координата точки поперечного перетину максимально віддаленої від осі x , рис.6.

Дослідження перетину 2-2 (рис 6.17).

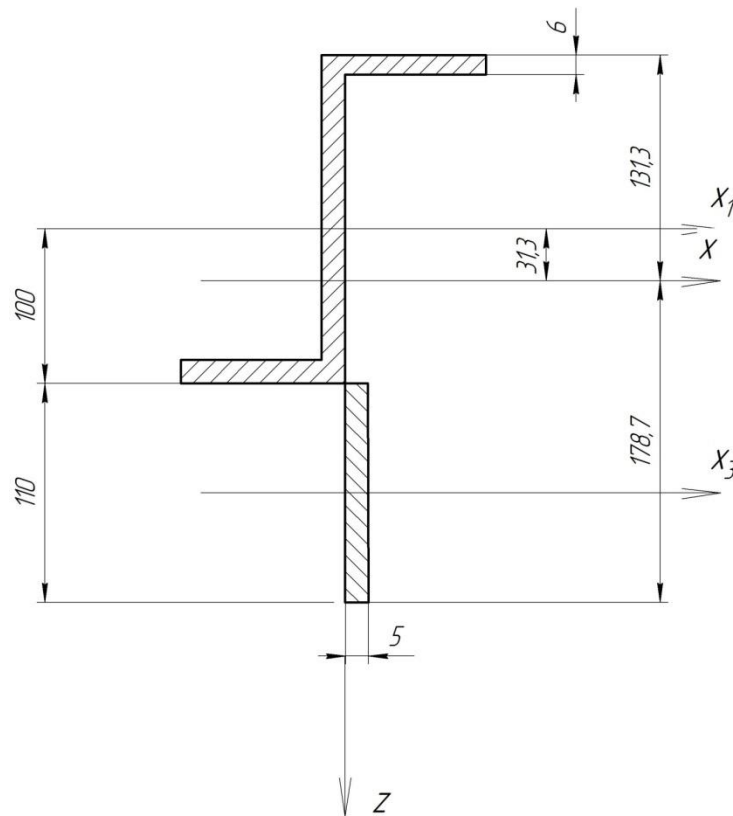


Рис.6.17. Геометричні характеристики рами в перетині 2-2

Геометричні характеристики поперечного перетину (рис.6.17).

Координата центра ваги [3]

$$z_{C_1} = \frac{\sum S_{x_1}}{\sum F} = \frac{F_1 \cdot y_1 + F_3 \cdot y_3}{F_1 + F_3} = \frac{0 + 5,5(10 + 5,5)}{21,72 + 5,5} = 3,13 \text{ см} = 31,3 \text{ мм}, \quad (6.21)$$

де F_3 - площа поперечного перетину полоси, $F_3 = 11 \cdot 0,5 = 5,5 \text{ см}^2$.

Осьовий момент інерції складного поперечного перетину

$$\begin{aligned} I_x^{(2)} &= I_{x_1} + F_1 \cdot 3,13^2 + I_{x_3} + F_3 \cdot (15,5 - 3,13)^2 = \\ &= 1227 + 21,78 \cdot 3,13^2 + 55,5 + 5,5 \cdot (15,5 - 3,13)^2 = 2337 \text{ см}^4, \end{aligned} \quad (6.22)$$

де I_{x_3} - осьовий момент інерції полоси, $I_{x_3} = \frac{0,5 \cdot 11^3}{12} = 55,5 \text{ см}^4$.

Максимальні нормальні напруження від дії згинального моменту [3]

$$\sigma_{\max}^{(2)} = \frac{M_2}{kI_x^{(2)}} \cdot z_{\max}^{(2)} = \frac{18913 \cdot 10^{-6}}{1,4 \cdot 23,37 \cdot 10^{-6}} \cdot 178,7 \cdot 10^{-3} = 103 \text{ МПа} \quad (6.23)$$

де $z_{\max}^{(2)} = 178,7 \text{ мм}$, координата точки поперечного перетину максимально віддаленої від осі x , рис.7.

k - коефіцієнт, який враховує товщину подвійного зварного шва, приймаємо $k=1,4$.

$M_2 = 1830 - 8691 \cdot (1,385 + 2 \cdot 0,11) - 5275(1,385 + 2 \cdot 0,11)^2 / 2 = -18913 \text{ Нм}$ - згинальний момент в перетині 2-2.

Максимальні нормальні напруження від дії згинального моменту в перетині 3-3 з урахуванням аналогічних до попереднього перетину власних геометричних характеристик [62]

$$\sigma_{\max}^{(3)} = \frac{M_3}{I_x^{(3)}} \cdot z_{\max}^{(3)} = \frac{15266 \cdot 10^{-6}}{12,27 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 124,0 \text{ МПа} \quad (6.24)$$

де $I_x^{(3)} = I_{x_1} = 1227 \text{ см}^4$ - осьовий момент інерції Z - подібного профілю профілю, $z_{\max}^{(3)} = 100 \text{ мм}$, координата точки поперечного перетину максимально віддаленої від осі x , $M_3 = 1830 - 8691 \cdot 1,385 - 5275 \cdot 1,385^2 / 2 = -15266 \text{ Нм}$ – величина згинального моменту в перетині 3-б.

6.5. Експериментальні польові випробування несучих конструкцій причіпних розкидачів добрив

Експериментально-розрахункове прогнозування надійності несучих конструкцій мобільних машин, зокрема причіпних розкидачів добрив вимагає проведення ряду цільових експериментів при проектуванні. При цьому

вирішуються основні задачі: створення моделі НДС конструкції, адекватної життєвому циклу машини та прогнозування надійності і довговічності конструкції [230, 260, 177]. Ефективність розв'язку вказаних задач в значній мірі визначається об'ємом і достовірністю одержаних експериментальних даних. Модель зовнішніх впливів на несучу конструкцію причіпних розкидачів формується з врахуванням домінуючих факторів: незрівноваженості обертових мас робочих органів, технологічних циклів машини, рельєфу покриття, діапазону швидкостей. Зовнішні впливи на машину залежать від умов руху, стану ґрунту і рельєфу дороги. Інерційні сили залежать від конкретних умов виконання машиною технологічного процесу [308, 318] і, при необхідності, можуть визначатись на ранніх стадіях експерименту. Відповідно до розрахунків, проведених за (6.11) – (6.24), пропонується схематизація розміщення датчиків на несучій рамі причіпного розкидача твердих органічних добрив, рис. 6.18.

Дослідження НДС причіпних розкидачів органічних добрив ПРТ - 10 проводились з завантаженим розкидачем: у транспортному режимі при транспортуванні добрива польовою дорогою і безпосередньо полем, а також при русі ненавантаженого розкидача після виконання технологічного процесу розкидання підстилкового гною (рис. 6. - рис. 6.4) на експлуатаційних режимах.

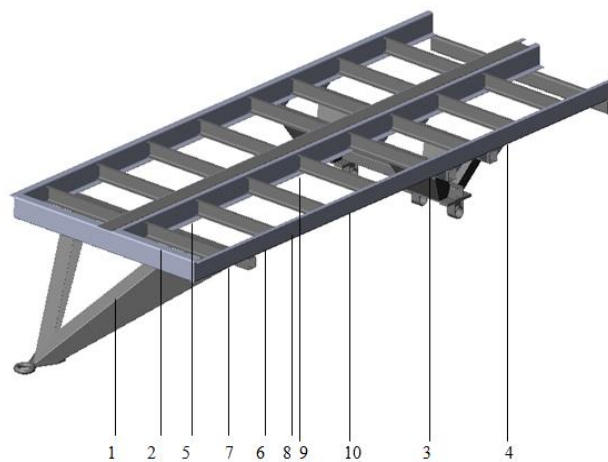


Рис. 6.18. Ділянки розміщення тензорезисторів на несучій системі розкидача ПРТ – 10



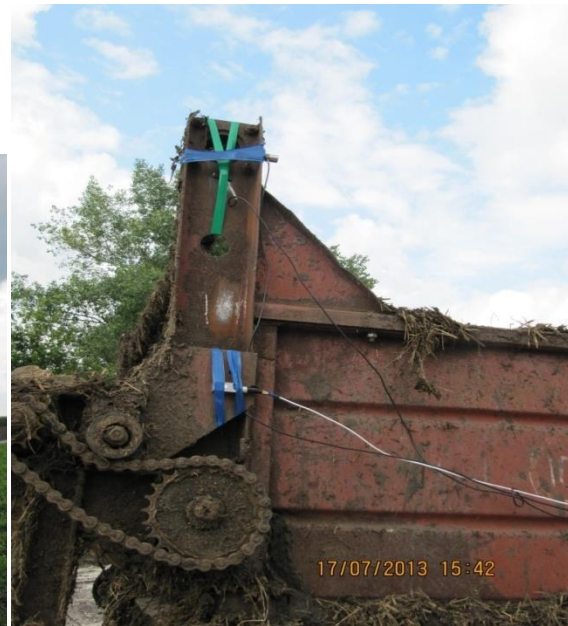
Рис. 6.19. Транспортний режим випробувань машини



Рис. 6.20. Експлуатаційні дослідження НДС несучої рами причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ - 10



а)



б)



в)



г)

Рис. 6.21. Польові випробування причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ – 10:

- а – загальний вигляд розкидача;
- б – розташування датчиків віброприскорень;
- в – тензорезистор на лонжероні розкидача;
- г – універсальна реєструюча система в кабіні трактора.

Для проведення вимірів НДС в елементах несучих конструкцій застосовувались тензорезистори, методика наклеювання яких дана в [289] (рис. 6.21).



Рис. 6.22. Розташування тензорезисторів на поперечині рами



Рис. 6.26. Дослідження НДС дишла несучої системи



Рис. 6.24. Датчики в зоні опори коліс розкидача ПРТ – 10

Результатами експериментальних досліджень НДС встановлено, розрахункові і експериментальні величини напружень при статичному навантаженні відрізняються до 10% , рис. 6.10, рис. 6.25, табл. 6.5.

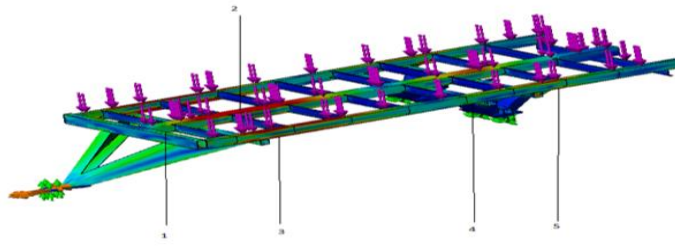


Рис. 6.25. Розміщення тензорезисторів у максимально навантажених ділянках несучої системи ПРТ – 10

Таблиця 6.5

Розрахункові напруження у максимально навантажених перетинах несучої системи розкидача твердих органічних добрив ПРТ –10

№ з/п	№ перетину	Розрахункові значення напружень у перетинах (статика), МПа	Експериментальні значення напружень у перетинах (статика), МПа
1.	1.	80	73
2.	2.	120	131
3.	3.	96	104
4.	4.	100	109
5.	5.	130	124

У сільськогосподарських машинах, у тому числі причіпних розкидачах добрив, тривають складні мультичастотні випадкові процеси, які суттєво впливають на міцність і довговічність несучих конструкцій. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** табл. 6.6 представлено результати експериментальних випробувань несучої системи розкидача ПРТ - 10, які вважаються характерними для причіпних розкидачів добрив та сільськогосподарських причепів. Результати досліджень показують, що спектр силового впливу на елементи несучої системи під час виконання технологічного процесу включає навантаження різної частоти і амплітуди (додаток В), рис. 6.26. У спектрах випадкових процесів динамічної навантаженості виділяються гармоніки з частотами в діапазонах 1,4-1,8 Гц, 4-5 Гц, 8-9 Гц, гармоніка основного тону має частоту 1-3,5 Гц.

Амплітуди змінних напружень в перетинах несучої системи розкидача ПРТ – 10 при польових випробуваннях

Таблиця 6.6

№ з/п	Амплітуди напружень, МПа	Тип покриття, режим роботи	Рух польовою дорогою, порожній		Рух полем, навантажений		Розкидання		Рух полем, порожній			
			Вага в кузові, кг		10000		10000		0			
			Швидкість, км/год		15		10		7		10	
			Відстань, км		0,3		0,5		1,6		0,8	
			0,4		Стандартне відхилення МПа	0,4	Стандартне відхилення МПа	1,6	Стандартне відхилення МПа	2,0	Стандартне відхилення МПа	
		Коефіцієнт варіації		Коефіцієнт варіації		Коефіцієнт варіації		Коефіцієнт варіації				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	σ_{\min}	Поле	8,6	1,9	31,9	2,3	33	4,8	8,8	1,8		
	σ_{\max}		26,4		59,4		71,5		28,6			
	σ_{cp}		17,6	0,12	49,1	0,06	57,2	0,09	19,8	0,12		

Продовження таблиці 6.6

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	σ_{\min}	Поле	4,4	7,4	72,6	4,4	38,5	7,5	1,0	7,9
	σ_{\max}		35,2		111,1		73,7		41,5	
	σ_{cp}		18,5	0,44	94,6	0,05	58,3	0,08	17,7	0,44
3	σ_{\min}		15,4	4,2	50,6	2,2	71,5	6,5	20,9	5,2
	σ_{\max}		61,6		69,3		117,7		67,1	
	σ_{cp}		37,1	0,12	60,5	0,04	96,8	0,07	40,7	0,14
4	σ_{\min}		14,3	4,5	57,2	2,8	107,8	4,7	19,8	4,9
	σ_{\max}		52,8		75,9		138,6		59,4	
	σ_{cp}		31,9	0,16	67,1	0,04	124,3	0,04	35,2	0,18
5	σ_{\min}		28,6	4,1	36,3	3,1	63,8	4,8	35,2	4,2
	σ_{\max}		75,9		195,8		188		79,2	
	σ_{cp}		41,8	0,13	74,8	0,08	79,2	0,13	45,1	0,12

Продовження таблиці 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	σ_{\min}	Поле	19,8	4,3	46,2	3,9	36,3	5,2	25,3	4,4
	σ_{\max}		67,1		166,1		188		72,6	
	σ_{cp}		39,6		105,6		74,8		45,1	
7	σ_{\min}		23,1	4,6	48,4	4,2	40,7	3,9	27,5	4,8
	σ_{\max}		68,2		173,8		188,1		72,6	
	σ_{cp}		40,7		111,1		72,6		46,2	
8	σ_{\min}		24,2	1,8	59,4	3,1	46,2	3,9	30,8	2,1
	σ_{\max}		67,1		90,2		105,6		73,7	
	σ_{cp}		37,4		74,8		75,9		44	
9	σ_{\min}		27,5	4,2	37,4	3,2	36,3	4,9	31,9	4,4
	σ_{\max}		71,5		127,6		178		77	
	σ_{cp}		35,2		82,5		71,4		40,7	
10	σ_{\min}	26,4	4,1	50,6	4,6	37,4	4,6	28,6	4,3	
	σ_{\max}	63,8		95,7		107,8		66		
	σ_{cp}	7,4		72,6		62,7		39,6		0,15

obrobka E3.nb

1

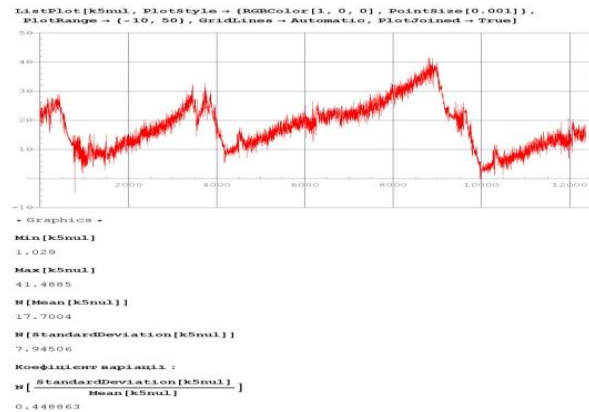


Рис. 6.26. Запис напруження поперечини ПРТ – 10

До недоліків несучої системи причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ – 10 належить незадовільний напружений стан у вказаних перерізах рами при її повному навантаженні, також базова конструкція рами має недостатньо високі показники технологічності виготовлення через присутність великої кількості зварних швів і додаткових елементів. Наслідком цього є її надлишкова маса.

Згідно проведених за аналітичними залежностями (розд. 6.3) обчислень запропоновано забезпечити раціональний перерозподіл напружень в елементах конструкції рами для зменшення рівня напруженості в небезпечних перерізах, що призведе до підвищення ресурсу роботи всієї металоконструкції, а також підвищить технологічність виготовлення рами з одночасним зменшенням маси шляхом виконання несучої системи розкидача твердих органічних добрив у вигляді двох бокових поздовжніх лонжеронів та центральної балки, що з'єднані між собою поперечками та мають приєднані причіп і балку кріплення коліс, виконавши два бокові поздовжні лонжерони холодногнутими швелерами, а центральну балку - гнутим замкнутих профілем (табл. 6.7, рис. 6.25). Аналітичні підходи, викладені у розділі дозволили запропонувати ряд вдосконалень, технічну новизну яких підтверджено [171, 172].

Таким чином, запропонована конструкція рами розкидача твердих органічних добрив типу ПРТ - 10 забезпечує раціональний перерозподіл

напружень в елементах конструкції рами, зменшує величини напружень в небезпечних перерізах при достатніх значеннях жорсткості елементів та загалом покращує технологічність виготовлення рами з зменшенням її маси.

Таблиця 6.7

Порівняльна таблиця рівнів напруженості в найбільш навантажених перетинах несучої системи розкидача ПРТ – 10

№ з/п	№ перетину	Елемент рами	Характеристика поперечного перетину	Напруження, базова несуча система, МПа	Характеристика поперечного перетину	Напруження, модернізована несуча система, МПа
1	1	Передня поперечина	Квадратна труба 180× 80×5	80	Квадратна труба 180× 80×5	84
2	2	Центральна балка	Ω – подібний прфіль (два Z – подібні 200× 87×6)	120	Квадратна труба 200× 160×5.5	85
3	3	Лонжерон	Z – подібний 200× 87×6	96	Холодногнутий швелер 200× 100×5	100
4	4	Лонжерон	Z – подібний 200× 87×6	100	Холодногнутий швелер 200× 100×5	90
5	5	Лонжерон	Z – подібний 200× 87×6	130	Холодногнутий швелер 200× 100×5	100

6.6. Висновки

На основі модифікованого методу мінімуму потенціальної енергії деформації для плоских просторово навантажених несучих систем причіпних розкидачів добрив побудовано розрахункову модель, на основі чого визначено НДС з підтвердженням результатами польових випробувань причіпного розкидача ПРТ – 10. Визначено параметри експлуатаційних напружень. Встановлено, що у спектрах випадкових процесів виділяються гармоніки з частотами в діапазонах 1,4-1,8Гц, 4-5Гц, 8-9Гц, гармоніка основного тону має частоту 1-3,5Гц.

РОЗДІЛ 7

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ НЕСУЧИХ СИСТЕМ РОЗКИДАЧІВ ДОБРИВ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВІВ АГРЕСИВНО - ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ

7.1. Розрахунково - експериментальна оцінка ресурсу несучої структури розкидача добрив РТД - 9 з врахуванням корозійно - експлуатаційних чинників

Під час виконання причіпними розкидачами добрив технологічних процесів, також на транспортних режимах, металоконструкції сільськогосподарських машин піддаються негативному впливу атмосфери, отрутохімікатів, органічних і мінеральних добрив. Очевидно, на машини для хімічного захисту рослин та для внесення твердих та рідких добрив впливає рідинна й атмосферна корозія. Ґрунтообробна техніка і сівалки при складних експлуатаційних навантаженнях [72, 148, 203, 266, 270, 276] піддається абразивному і корозійному зношуванню. Машинно-тракторний парк зазнає впливів корозійно - втомних пошкоджень і руйнувань металоконструкцій, механічного зношування у період роботи техніки, а також корозійних пошкоджень під дією природних чинників (дощу, сонця, вітру і т. д.). Найбільш пошкоджуються відкриті елементи сільськогосподарських машин (розділ 1), які піддаються корозії, швидкість якої відчутно збільшується при контактах з ґрунтами, отрутохімікатами, добривами, особливо порушеннях лакофарбових покриттів. Через корозійні руйнування діагностується до 33% відмов сільськогосподарських машин [204, 276]. Міцність вуглецевих сталей знижується на 40-55%, зношування деталей у з'єднаннях збільшується у 2-4 рази. Як наслідок, щорічно аграрне виробництво країни має величезні збитки від недотримання правил зберігання [203, 266, 270, 276]. Для прогнозування довговічності і надійності сільськогосподарських машин важливе значення має

розробка методів оцінки їх залишкового ресурсу з врахуванням дії характерних для машин даних класів експлуатаційних навантажень і корозійно - агресивних середовищ.

В розділі пропонується методика розрахунку довговічності та залишкової довговічності типових елементів металоконструкцій рам причіпних розкидачів мінеральних, а також органічних добрив.

Першим етапом проведення оцінки є дослідження корозійної та корозійно-втомної поведінки машинобудівних сталей у середовищах добрив. Одними із найнебезпечніших чинників, які призводять до відмов сільськогосподарської техніки, є корозія та корозійно-механічне руйнування вузлів машин, розділ 1 (рис. 7.1). Існуючі дослідження, аналітичні і експериментальні рішення проблематики впливу процесів корозії та корозійно-втомного руйнування на зниження роботоздатності сільськогосподарських машин [72, 270, 276] не дозволяють точно і раціонально оцінити рівень корозії, корозійну втому несучих навантажених елементів в добривах, трактування механізмів пошкоджень та руйнувань є суперечливими, у тому числі з причин відсутності достовірних даних щодо корозійної та корозійно-втомної поведінки конструкційних сталей в мінеральних та органічних добривах.



а)

б)

Рис. 7.1. Заварені корозійно – втомні пошкодження (тріщини) елементів розкидачів добрив: а- мінеральних; б- органічних.

Необхідно дослідити і виявити причини, також визначити початок і встановити перебіг процесів корозії та корозійно-втомного руйнування матеріалу конструкцій розкидачів в агресивних середовищах різних добрив. Корозійні випробування проводяться на зразках з сталі 15, виготовлених у вигляді дисків з заданих металів у стані постачання. Підготовка зразків і випробування проводяться у відповідності до відомих методик [295]. Корозійними середовищами є дистильована вода, безпідстилкові гній великої рогатої худоби та гній змішаний ВРХ і свинячий у рівних пропорціях і насичені розчини найбільш корозійно - агресивних мінеральних добрив: сульфату амонію, нітрофоски. При дослідженнях рекомендується послуговуватись рекомендованими [295] залежностями. При дослідженнях якісних сталей, перші корозійні пошкодження – поодинокі пітінги на зразках, поміщених у сипучий кристалічний сульфат амонію, з'явилися через 24 год, і на протязі наступних 4 діб злились у виразки. В кристалічній нітрофосці перші окремі пітінги з'явилися на 7 добу (рис. 7.2). Через 24 доби швидкість корозії сталі 15 в сульфаті амонію стабілізувалась на рівні 0,006 мм/рік, а в нітрофосці – на рівні 0,0012 мм/рік., через 36 діб подальших змін не виявлено.



Рис. 7.2. Загальний вигляд зразків з сталей 15, 20, 25 після експозиції (36 діб) в кристалічних нітрофосці а) та сульфаті амонію (б).

В першу добу найвищі швидкості корозії спостерігаються в насиченому розчині нітрофоски, але, починаючи з 12-ї доби вони стають нижчими, ніж у насиченому розчині сульфату амонію (рис. 7.3). Дані швидкості до 36 разів вищі, ніж відповідні швидкості в кристалічних мінеральних добривах сульфату амонію і нітрофоски, що є результатом каталітичного впливу води [159]. Нижчі значення швидкостей корозії в розчині нітрофоски порівняно зі сульфатом амонію та водою при тривалішій експозиції, від 12 діб, пов'язані з пасивуючою дією аніонів NO_3^- і утворенням іонами

HPO_4^{2-} фосфатного шару на поверхні сталі. Корозійні випробування сталі 20 у гноївках ВРХ та змішаній за різного часу експозиції показують (рис. 7.3, рис. 7.4): швидкість корозії впродовж першої доби в 3...4 рази нижча, ніж у дистильованій воді та у 8...10 разів нижча, ніж у середовищі мінеральних добрив амонію фосфату та нітрофоски. Збільшення часу експозиції веде до суттєвого зменшення швидкості корозії. Через 24 доби швидкості в двох вказаних середовищах зрівнюються, через 36 діб не виявлено подальших змін. Порівняно із дистильованою водою протягом першої доби гноївки виявляють інгібувальний ефект на рівні 75 %. Через 24 доби ступінь захисту - 90 %.

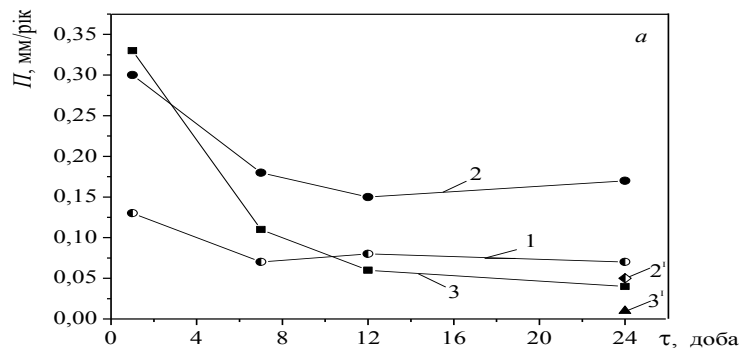


Рис. 7.3. Залежність глибинного показника корозії, сталь 20, від часу експозиції: 1 – вода дистильована; 2 – насичений розчин сульфату амонію; 2' – сульфат амонію кристалічний; 3 – насичений розчин нітрофоски; 3' – нітрофоска кристалічна.

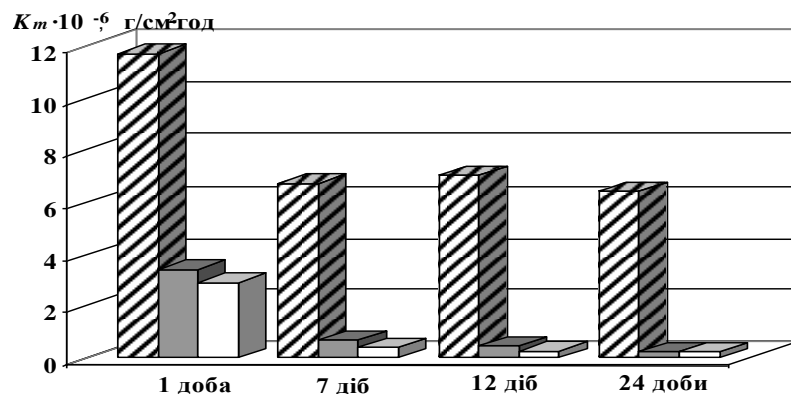


Рис. 7.4. Швидкість корозії сталі 20 при експозиції в середовищі:

▨ – модель дощівки; ■ – гноївка; □ – гноївка змішана.

При дослідженнях корозійно - втомних характеристик, опір сталі 20 руйнуванню у всьому діапазоні навантажень в середовищах мінеральних добрив порівняно з повітрям та дистильованою водою суттєво знижується. Умовна границя корозійної втоми при базі $N = 50$ млн. циклів (рис. 7.5) в розчині нітрофоски знизилася в 2,5 раз у порівнянні з дослідженнями на повітрі і 2,2 рази у порівнянні з дистильованою водою. Найменш негативний вплив на опір корозійній втомі сталі виявила змішана гноївка: умовна границя втоми підвищилася на 8% порівняно із дистильованою водою.

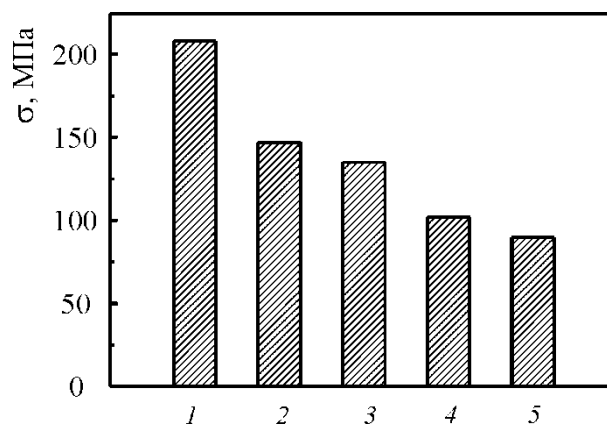


Рис.7.5. Залежність границі витривалості сталі 20 від середовища:
 1 – повітря ($N_{\sigma} = 10^7$ циклів); 2 – гноївка ($N_{\sigma} = 5 \cdot 10^7$ циклів); 3 – модель дощівки ($N_{\sigma} = 5 \cdot 10^7$ циклів); 4 – сульфат амонію ($N_{\sigma} = 5 \cdot 10^7$ циклів);
 5 – нітрофоска ($N_{\sigma} = 5 \cdot 10^7$ циклів).

Наступним етапом оцінки довговічності є аналітичне моделювання деформівно - напруженого стану несучих систем розкидачів добрив Модель НДС причіпного розкидача твердих органічних добрив РТД-9 складається з урахуванням, що внаслідок виконання технологічного процесу в складних умовах на значних для с/г операцій швидкостях, з значними зовнішніми навантаженнями, при роботі в агресивних середовищах, рамні конструкції розкидачів органічних добрив проектується за вимогами до III класу зварних рам у сільськогосподарському машинобудуванні. Створення раціональних несучих систем даного класу досягається шляхом максимально коректного моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням зовнішніх навантажень, як функцій умов роботи [188, 171, 200, 93, 267, 268].

Моделювання напружено-деформованого стану виконується на основі модифікованого методу мінімуму потенціальної деформації з врахуванням енергій згину та кручення [188, 266-268]. Домінуючими факторами при цьому є зусилля від завантаженої маси добрив P_i та розкидаючого бітерного пристрою P'_i . В місцях контакту з'єднання осей ходових коліс машини з лонжеронами рами діють реакції R_0, R'_0, R_1, R'_1 та R_2, R'_2 .

Загальний вираз функції потенціальної енергії деформації рами згідно розрахункової схеми (рис. 7.6) записується як сума потенціальної енергії деформації при згинанні (M) і крученні (K) її складових [188, 231]

$$U = U_I + U_{II} = U_{IM} + U_{IK} + U_{IIM} + U_{IIK} . \quad (7.1)$$

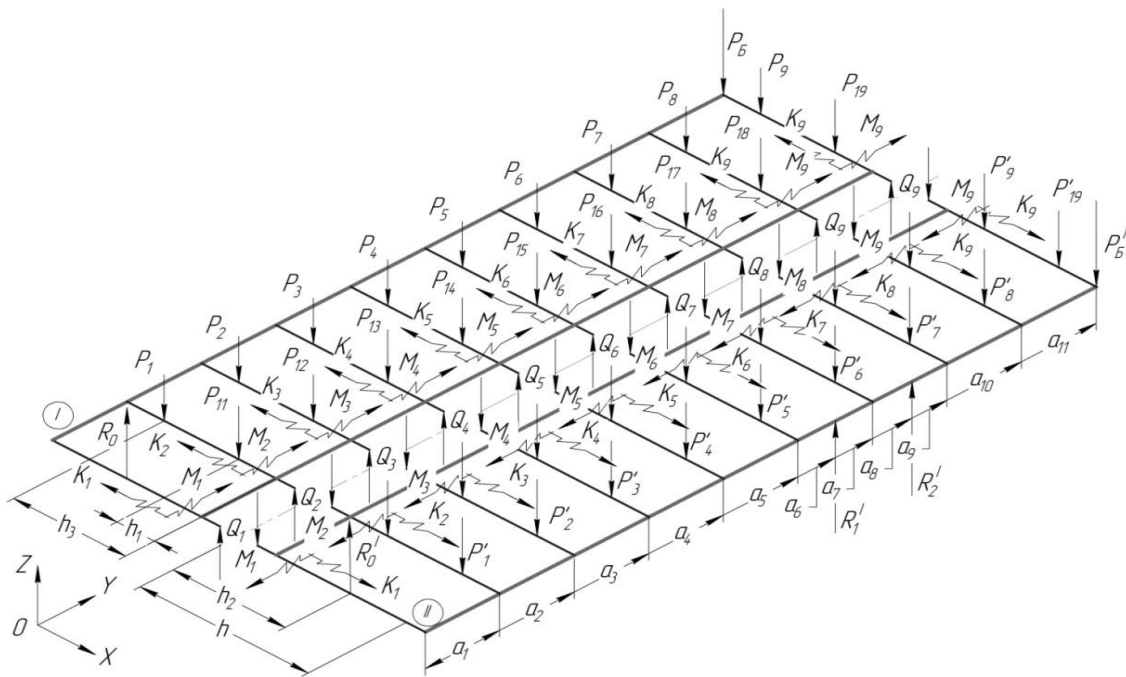


Рис. 7.6. Розрахункова модель несучої системи розкидача органічних добрив РТД-9

$$U_{IM} = \frac{1}{EI_1} \left[\int_0^l (K_1 - Q_1 s - R_0 s + (K_2 - Q_2 s + (P_1 + P_{11}))H(s - a_1) + (K_3 - Q_3 s + (P_2 + P_{12}))H(s - a_2) + (K_4 - Q_4 s + (P_3 + P_{13}))H(s - a_3) + (K_5 - Q_5 s + (P_4 + P_{14}))H(s - a_4) + (K_6 - Q_6 s + (P_5 + P_{15}))H(s - a_5) - R_1 s H(s - a_6) + \right.$$

$$\begin{aligned}
&+(K_7 - Q_7s + (P_6 + P_{16}))H(s - a_7) - R_2sH(s - a_8) + (K_8 - Q_8s + (P_7 + P_{17}))H(s - a_9) + \\
&+(K_9 - Q_9s + (P_8 + P_{18}))H(s - a_{10})^2 ds] + \frac{1}{2EI_2} \left[\int_0^h (M_1 - Q_1s - R_0sH(s - h_2))^2 ds + \right. \\
&+ \int_0^h (M_2 - Q_2s + P_{11}H(s - h_1) + P_1H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_3 - Q_3s + P_{12}H(s - h_1) + P_2H(s - h_3))^2 ds + \\
&+ \int_0^h (M_4 - Q_4s + P_{13}H(s - h_1) + P_3H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_5 - Q_5s + P_{14}H(s - h_1) + P_4H(s - h_3))^2 ds + \\
&+ \int_0^h (M_6 - Q_6s + P_{15}H(s - h_1) + P_5H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_7 - Q_7s + P_{16}H(s - h_1) + P_6H(s - h_3))^2 ds + \\
&+ \left. \int_0^h (M_8 - Q_8s + P_{17}H(s - h_1) + P_7H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_9 - Q_9s + P_{19}H(s - h_1) + P_9H(s - h_3))^2 ds \right]. \quad (7.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{IK} = &\frac{1}{2GI_{k1}} \left[\int_0^l (M_1 - Q_1h - R_0(h - h_2) + (M_2 - Q_2h + P_1(h - h_3) + P_{11}(h - h_1)) \times \right. \\
&\times H(s - a_1) + (M_3 - Q_3h + P_2(h - h_3) + P_{12}(h - h_1))H(s - a_2) + (M_4 - Q_4h + \\
&+ P_3(h - h_3) + P_{13}(h - h_1))H(s - a_3) + (M_5 - Q_5h + P_4(h - h_3) + P_{14}(h - h_1)) \times \\
&\times H(s - a_4) + (M_6 - Q_6h + P_5(h - h_3) + P_{15}(h - h_1))H(s - a_5) + (M_7 - Q_7h + \\
&+ P_6(h - h_3) + P_{16}(h - h_1))H(s - a_7) + (M_8 - Q_8h + P_7(h - h_3) + P_{17}(h - h_1)) \times \\
&\times H(s - a_9) + (M_9 - Q_9h + P_8(h - h_3) + P_{18}(h - h_1))H(s - a_{10}) \left. \right]^2 ds + \\
&+ \int_0^l (M_1 - R_0h_2 + (M_2 + P_1h_3 + P_{11}h_1)H(s - a_1) + (M_3 + P_2h_3 + P_{12}h_1)H(s - a_2) + \\
&+ (M_4 + P_3h_3 + P_{13}h_1)H(s - a_3) + (M_5 + P_4h_3 + P_{14}h_1)H(s - a_4) + (M_6 + P_5h_3 + \\
&+ P_{15}h_1)H(s - a_5))^2 ds + (M_7 + P_6h_3 + P_{16}h_1)H(s - a_7) + (M_8 + P_7h_3 + P_{17}h_1) \times \\
&\times H(s - a_9))^2 ds + (M_9 + P_8h_3 + P_{18}h_1)H(s - a_{10})^2 ds] + \\
&+ \frac{1}{2GI_{k2}} \int_0^h K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 + K_4^2 + K_5^2 + K_5^2 + K_7^2 + K_8^2 + K_9^2 ds. \quad (7.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{IM} = &\frac{1}{EI_1} \left[\int_0^l (Q_1s - K_1 - R_0s + (Q_2s - K_2 + (P_1 + P_{11}))H(s - a_1) + (Q_3s - K_3 + \right. \\
&+ (P_2 + P_{12}))H(s - a_2) + (Q_4s - K_4 + (P_3 + P_{13}))H(s - a_3) + (Q_5s - K_5 + (P_4 + P_{14})) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times H(s - a_4) + (Q_6 s - K_6 + (P_5 + P_{15}))H(s - a_5) - R_1 s H(s - a_6) + (Q_7 s - K_7 + (P_6 + P_{16})) \times \\
& \times H(s - a_7) - R_2 s H(s - a_8) + (Q_8 s - K_8 + (P_7 + P_{17}))H(s - a_9) + (Q_9 s - K_9 + (P_8 + P_{18})) \times \\
& \times H(s - a_{10})^2 ds] + \frac{1}{2EI_2} \left[\int_0^h (M_1 + Q_1 s - R_0 s H(s - h_2))^2 ds + \right. \\
& + \int_0^h (M_2 + Q_2 s + P_{11} H(s - h_1) + P_1 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_3 + Q_3 s + P_{12} H(s - h_1) + P_2 H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_4 + Q_4 s + P_{13} H(s - h_1) + P_3 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_5 + Q_5 s + P_{14} H(s - h_1) + P_4 H(s - h_3))^2 ds + \\
& + \int_0^h (M_6 + Q_6 s + P_{15} H(s - h_1) + P_5 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_7 + Q_7 s + P_{16} H(s - h_1) + P_6 H(s - h_3))^2 ds + \\
& \left. + \int_0^h (M_8 + Q_8 s + P_{17} H(s - h_1) + P_7 H(s - h_3))^2 ds + \int_0^h (M_9 + Q_9 s + P_{19} H(s - h_1) + P_9 H(s - h_3))^2 ds \right]. \quad (7.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{\text{шк}} = & \frac{1}{2GI_{k1}} \left[\int_0^l (M_1 + Q_1 h - R_0 (h - h_2) + (M_2 + Q_2 h + P_1 (h - h_3) + P_{11} (h - h_1))H(s - a_1) + \right. \\
& + (M_3 + Q_3 h + P_2 (h - h_3) + P_{12} (h - h_1))H(s - a_2) + (M_4 + Q_4 h + P_3 (h - h_3) + P_{13} (h - h_1)) \times \\
& \times H(s - a_3) + (M_5 + Q_5 h + P_4 (h - h_3) + P_{14} (h - h_1))H(s - a_4) + (M_6 + Q_6 h + P_5 (h - h_3) + \\
& + P_{15} (h - h_1))H(s - a_5) + (M_7 + Q_7 h + P_6 (h - h_3) + P_{16} (h - h_1))H(s - a_7) + (M_8 + Q_8 h + \\
& + P_7 (h - h_3) + P_{17} (h - h_1))H(s - a_9) + (M_9 + Q_9 h + P_8 (h - h_3) + P_{18} (h - h_1))H(s - a_{10})^2 ds + \\
& + \int_0^l (M_1 - R_0 h_2 + (M_2 + P_1 h_3 + P_{11} h_1)H(s - a_1) + (M_3 + P_2 h_3 + P_{12} h_1)H(s - a_2) + (M_4 + P_3 h_3 + \\
& + P_{13} h_1)H(s - a_3) + (M_5 + P_4 h_3 + P_{14} h_1)H(s - a_4) + (M_6 + P_5 h_3 + P_{15} h_1)H(s - a_5))^2 ds + \\
& + (M_7 + P_6 h_3 + P_{16} h_1)H(s - a_7) + (M_8 + P_7 h_3 + P_{17} h_1)H(s - a_9))^2 ds + (M_9 + P_8 h_3 + P_{18} h_1) \times \\
& \left. \times H(s - a_{10})^2 ds \right] + \frac{1}{2GI_{k2}} \int_0^h K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 + K_4^2 + K_5^2 + K_5^2 + K_7^2 + K_8^2 + K_9^2 ds. \quad (7.5)
\end{aligned}$$

На підставі правила Лейбніца про диференціювання підінтегральних функцій потенціальної енергії деформації за невідомими параметрами і теореми про найменшу роботу, кожна з похідних від потенціальної енергії деформації прирівнюється до нуля. В результаті отримується система лінійних канонічних рівнянь, кількість яких співпадає з кількістю статично невизначених зусиль [231].

$$\frac{\partial U}{\partial M_i} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial K_i} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial Q_i} = 0 \quad (7.6)$$

Шукані величини згинальних M і крутних K моментів, а також поперечних зусиль Q з подальшими обчисленнями напружень у перетинах несучої металоконструкції причіпного розкидача визначаються при наступних вихідних даних:

- зовнішні навантаження;
- геометричні та фізичні характеристики, властивості матеріалу конструкції.

Величини обчислених напружень у перетинах металоконструкції (рис.7.7) приведені у табл. 7.1.

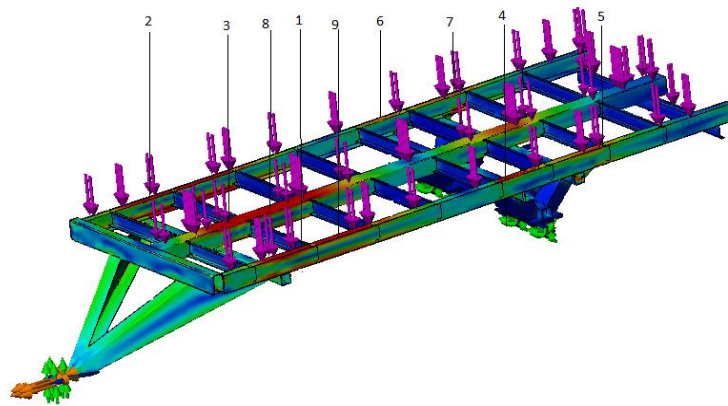


Рис. 7.7. Перетини несучої рами розкидача органічних добрив РТД - 9 з максимальними напруженнями

Таблиця 7.1

Напруження у небезпечних перетинах несучої системи розкидача твердих органічних добрив РТД –9

№ з/п	№ перетину	Величини нормальних напружень
1	1	160 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)
2	2	152 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)
3	3	188 МПа (два Z-подібні холодногнуті профілі 200×60×5)
4	4	66 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)
5	5	126 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)
6	6	68 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)
7	7	105 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)
8	8	99 МПа (два Z-подібні холодногнуті профілі 200×60×5)
9	9	152 МПа (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5)

Подальші розрахунки ресурсу роботи виконуються для найбільш навантажених елементів. Перетин №1: лонжерон, Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, рівень напружень у поперечному перетині 160 МПа; перетин №3: Ω - подібний, центральна балка, два Z-подібних профілі 200×60×5, зварені між собою у верхній частині за допомогою покладеної на верхні полиці сталюї полоси товщиною 5 мм., рівень напружень у поперечному перетині 188 МПа. Геометричні характеристики профілів представлено у [81 - 90]. Середовищами для розрахунків розглядаються рідкі органічні і найбільш агресивні з позиції корозійної стійкості мінеральні добрива.

Оцінка ресурсу несучих структур причіпних розкидачів добрив з врахуванням впливів корозійно - експлуатаційних середовищ. Проводиться згідно одержаних корозійних та корозійно-втомних характеристик машинобудівних сталей у середовищах добрив (розділи 2, 3) та кількісних і якісних показників навантаженості несучих систем причіпних розкидачів добрив в реальних експлуатаційних умовах за залежностями розд. 4, розд. 5, розд. 6. Викладені результати опубліковані в працях дисертанта [191, 201, 203, 234]. З розділів 1, 5, 6, відкритими профілями несучих структур причіпних розкидачів стандартизовано є елементи Z – подібного та Ω - подібного профілів, а також швелери, кутники рівнобічні і нерівнобічні. Вказані профілі, застосовуються з міркувань забезпечення величин осьових і полярних моментів опору і інерції максимальних значень і, таким чином, досягнення мети, щоб максимальні напруження і жорсткості при відповідних деформаціях несучих систем були оптимальними. Визначення довговічності найбільш навантажених несучих елементів металоконструкцій розкидачів описується відомою залежністю $N_p = N_z + N_d$, де період N_z зародження корозійно - втомної тріщини визначається на основі інформації з кривих Велера, достовірне знаходження тривалості періоду докритичного росту тріщини N_d запропоновано у розділах 4 і 5.

Досліджено балковий елемент металоконструкції відкритого тонкостінного профілю, послаблений поверхневою прямолінійною тріщиною довжини l_0 під дією циклічного згину. Визначення періоду докритичного росту тріщини $N = N_D$ реалізується за співвідношеннями (5.4), (5.5), розглядаються профілі найбільш навантажених елементів розкидача (рис. 7.7, табл. 7.1).

Довговічність лонжеронів несучої системи розкидача (Z – подібний перетин). Балка з крайовою тріщиною Z – подібного профілю висотою H, шириною полиці h, з товщиною стінки t, навантажена згинальним моментом M. При реалізації математичної моделі (5.4) і (5.5) для вказаного випадку коефіцієнт інтенсивності напружень визначається з (7.8) при осьовому моменті опору [62, 291]:

$$W_x = (6H)^{-1}[hH^3 - (h-t)(H-2t)^3]. \quad (7.7)$$

Тоді представивши невідому тут функцію як $F_2(\varepsilon_2)$ у вигляді поліному із коефіцієнтами, які максимально наближують співвідношення КІН у даних граничних випадках

$$K_I = \sigma\sqrt{2h}\sqrt{\pi\varepsilon_2}[1,12 + F_2(\varepsilon_2)], \quad (7.8)$$

$$F_2(\varepsilon_2) = 0,52\sqrt{\varepsilon_2}(1 + 6,42\varepsilon_2^2 - 6,53\varepsilon_2^3 + 5,86\varepsilon_2^4), \quad \varepsilon_2 = l_0(2h + H)^{-1}.$$

Після підстановки (7.8) в (5.4) і інтегруванні його в межах умов (5.5) для визначення періоду докритичного росту тріщини $N = N_D^{(1)}$:

$$N_D^{(1)} = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{jc}^2(H + 2h)}{\beta_1 K_{th}^4(1 - R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_* = \frac{l_*}{2h + H}, \quad \varepsilon_i = \frac{l_i}{2h + H}, \quad (7.9)$$

$$f_1(\varepsilon) = \frac{\pi\sigma^2\varepsilon(2h + H)}{K_{jc}^2}[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2\sigma^4\varepsilon^2(2h + H)^2}{K_{th}^4}[1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$

Ресурс N_P досліджуваної балки

$$N_P = N_0 10^{-\sigma/\sigma_0} + \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fC}^2 (H + 2h)}{\beta_1 K_{th}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon. \quad (7.10)$$

Для обчислень за (7.10), застосовуються експериментально визначені, розділи 2 і 3, характеристики матеріалу $N_0, \sigma_0, V_c, K_{th}, K_{fC}, K_{fi}, \beta_1$, а також геометричні параметри балки та її навантаженість. Рекомендується для проведення практичних розрахунків, величину l_0 приймати два міліметри [33]. При цьому обчислена величина N_P буде занижена, а похибка додатково забезпечить збільшення запасу довговічності.

Розрахунок довговічності $N = N_P$ лонжерона Z- подібного профілю для Ст 3, січення $200 \times 60 \times 5$ в середовищах з навантаженням: в повітрі; при дії розчину нітрофоски; в безпідстилковому змішаному гної. В даному випадку розрахунок проводиться за (7.10). Механічні і втомні характеристики Ст 3 визначено у розділі 3. Отже, характеристики у робочих середовищах:

повітря

$$N_0 = 1,51 \cdot 10^8 \text{ цикли}, \beta_1 = 4,51 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, K_{fC} = 102 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, \quad (7.11)$$

$$\sigma_0 = 120,18 \text{ МПа}, K_{th} = 12,81 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, R = 0,1;$$

мінеральне добриво (нітрофоска)

$$\sigma_0 = 95,63 \text{ МПа}, N_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ цикли}, K_{fi} = 50 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, \quad (7.12)$$

$$V_c = 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ м} / \text{цикл},$$

змішана гноївка

$$\sigma_0 = 121,56 \text{ МПа}, N_0 = 1,44 \cdot 10^8 \text{ цикли}, \beta_1 = 4,81 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, l_i = l_0,$$

$$V_c \approx 0, K_{th} = 11,21 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, R = 0,1, K_{fC} = 101 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}.$$

Необхідні характеристики матеріалів отримано з інваріантних кінетичних діаграм втоми, розділ 3, рис. 7.7-7.9.

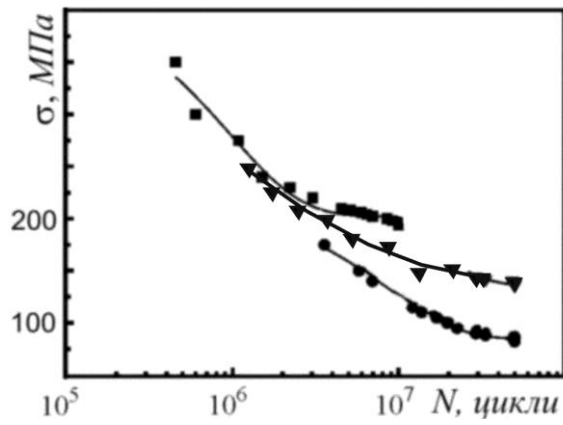


Рис. 7.7. Криві Велера для Ст 3: повітря – ■; нітрофоска ●, змішана гноївка ▲.

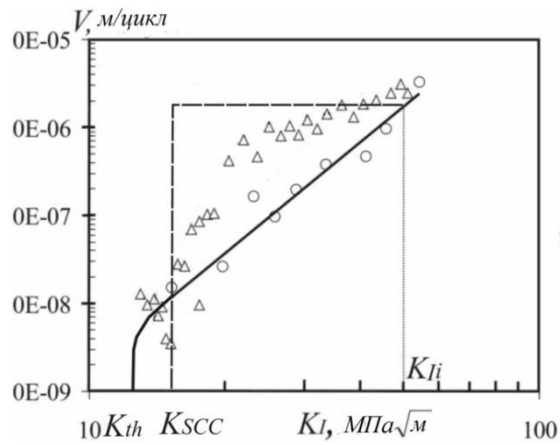


Рис. 7.8. Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин в Ст 3 на повітрі – ○, при дії розчину нітрофоски – △.

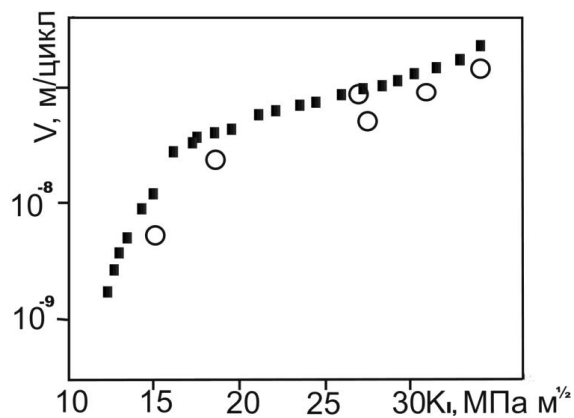


Рис. 7.9. Кінетичні діаграми поширення втомних тріщин в Ст 3: повітря – ○, змішана гноївка – ■.

На основі (7.11) - (7.12) формула (7. 10) запишеться для середовищ:
повітря

$$N_p^{(II)} = 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/120,18} + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon; \quad (7.13)$$

розчин нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/95,63} + 4,31 \cdot 10^5 (558,43\sigma^{-2} - 0,002) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (7.14)$$

$$\varepsilon_i = 1745,09\sigma^{-2}, \quad \varepsilon_* = 5513,66\sigma^{-2};$$

змішана гноївка

$$N_p^{(\Gamma)} = 1,44 \cdot 10^{8-\sigma/121,56} + 6,5 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (7.15)$$

$$f_1(\varepsilon) = 9,66 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = 3,75 \cdot 10^{-5} \sigma^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4,$$

$$f_3(\varepsilon) = 9,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_4(\varepsilon) = 6,40 \cdot 10^{-5} \sigma^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$

Величина l_i , в (7.10), (7.14) визначена з $K_I(\varepsilon_i) = K_{II}$, $l_i = (H + 2h)\varepsilon_i$:
 $l_i \approx 558,43\sigma^{-2}$. На основі (7.13) - (7.15) побудовано графічні залежності
довговічності $N = N_p$ балки від рівня амплітуди напружень σ (рис. 7.10).

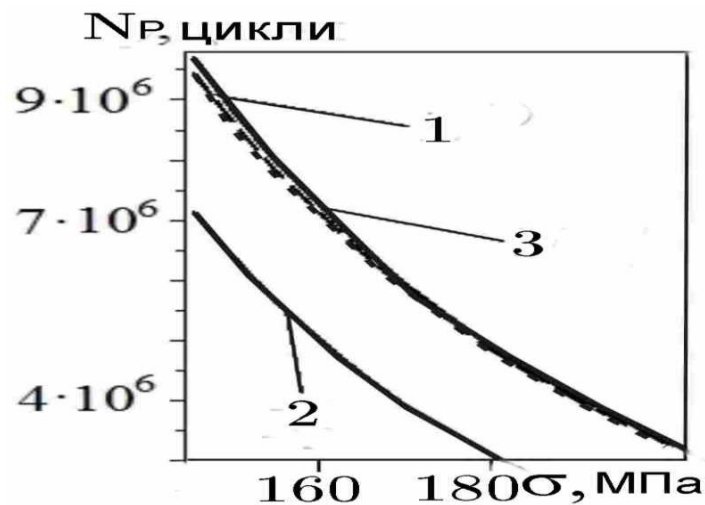


Рис. 7.10. Залежність ресурсу лонжерона несучої системи розкидача добрив від рівня напружень: 1 - повітря; 2 - нітрофоска; 3 - органічне добриво.

Отже, рис. 7.10, корозійне середовище розчину нітрофоски значно понижує довговічність балки Z - подібного профілю.

Довговічність центральної балки причинного розкидача. Балка Ω - подібного профілю, з двох балок Z - подібного профілю (рис. 5.10). Визначається N_p - кількість циклів навантаження, в результаті дії якої в полицях зародяться дві симетричні тріщини.

Спочатку обчислюються N_3 і N_D , де N_3 визначається на основі $N_3 = N_0 10^{-\sigma\sigma_0^{-1}}$ [34], а N_D , з розв'язку (5.4): $V = V_c, K_{sc} < K_{I_{\max}} \leq K_{I_i}$;

$$\frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I_{\max}}^4 - K_{sc_{\max}}^4) (K_{fC}^2 - K_{I_{\max}}^2)^{-1}, K_{I_i} < K_{I_{\max}} < K_{fC},$$

з заданими початковою і кінцевою умовами:
 $N = 0, l(0) = l_0; N = N_D, l(N_D) = l_*, K_I(l_*) = K_{fC}$.

Коефіцієнт інтенсивності напружень буде визначатися через σ на основі (7.8), причому величину σ знаходимо з (7.16). З урахуванням [42, 62]:

$$W_x = 2(6H)^{-1} [hH^3 - (h-t)(H-2t)^3]. \quad (7.16)$$

Ресурс N_p для даного балкового елемента буде визначатися аналогічно до попереднього випадку, результати обчислень - рис. 5.9. При аналізі рис. 5.9, залишкова довговічність N_D при наявності тріщини початкової довжини l_0 може бути обмеженою, у залежності від величини l_0 , що це суттєво скорочує час експлуатації елементів металоконструкції розкидачів добрив. Розглядується балка Ω - подібного перетину при циклічних навантаженнях з амплітудою M , що викликає в крайніх волокнах максимальне напруження амплітуди $\sigma = 188 \text{ МПа}$. При цьому, досліджуються випадки навантаженості в середовищах повітря, розчину нітрофоски та змішаної гноївки.

Для визначення залишкового ресурсу N_D застосовуються залежності:

повітряне середовище

$$N_{\text{Д}}^{(\text{П})} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (7.17)$$

розчин нітрофоски

$$N_{\text{Д}}^{(\text{Н})} = 1,37 \cdot 10^5 (0,049 - \varepsilon_0) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,049}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad 0,056 > \varepsilon_0 > 0,00625, ,$$

$$N_{\text{Д}}^{(\text{Н})} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon \quad 0,23 > \varepsilon_0 > 0,049, \quad (7.18)$$

змішана гноївка

$$N_{\text{Д}}^{(\text{Г})} = 6,5 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,141} \frac{1 - f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (7.19)$$

$$f_1(\varepsilon) = 3,41\varepsilon[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = 4,68 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4,$$

$$f_3(\varepsilon) = 3,48\varepsilon[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_4(\varepsilon) = 7,99 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$

Залежності (7.17)-(7.19) описують кінетику розвитку корозійно - втомних тріщин, результати обчислень зображено на рис. 7.11.

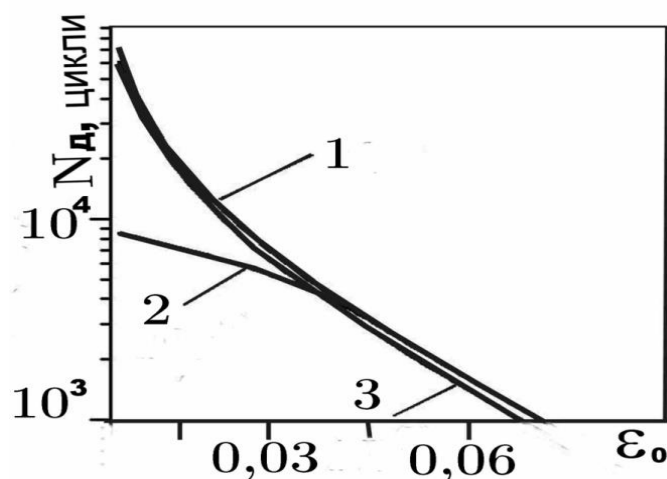


Рис. 7.11. Графічні залежності залишкової довговічності центральної балки несучої металоконструкції причіпного розкидача Ω - подібного профілю:

1- повітря; 2 - нітрофоска; 3 - змішана гноївка.

Отже, розчин нітрофоски понижує залишкову довговічність балки на порядок порівняно з випробуваннями на повітрі, рис. 7.11.

Для досліджень і розрахунків довговічності несучих елементів розкидачів добрив N_p , при використанні швелерів, застосовується формула

$$N_p = N_0 10^{-\sigma/\sigma_0} + V_c^{-1} (l_i - l_0) + \int_{l_i}^{l_*} \frac{(K_{fC}^2 - K_{I_{\max}}^2) dl}{\beta_1 (1-R)^4 (K_{I_{\max}}^4 - K_{th_{\max}}^4)} \quad (7.20)$$

Розрахунки проводяться аналогічно до обчислень з Z – подібними перетинами. Навантаження холодногнутого швелера $180 \times 80 \times 5$, Ст 3 досліджується для середовищ: повітря, розчину мінерального добрива, в рідкому змішаному органічному добриві. Механічні і втомні характеристики матеріалу визначаються згідно даних розділу 3. Одержані результати і графічні залежності $N_p \sim \sigma$ для всіх вище згаданих видів з незначною похибкою співпадають з обчисленнями для Z - подібного профілю, що пояснюється тим, що геометрія перерізу балок включена тільки у формулу з визначення σ , а при моделюванні (розд. 5) балки замінюються смугами з тріщинами тієї ж товщини і аналогічного значення моменту опору поперечного перерізу W_x , досліджуваного перетину.

При розрахунково - експериментальних дослідженнях навантажених елементів несучих систем причіпних розкидачів добрив для квадратних труб, ресурс

$$N_p = N_0 10^{-\beta_0 \sigma \sigma_0^{-1}} + V_c^{-1} (\rho_i - \rho_0) + \frac{t}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_5^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_4^4(\varepsilon_3) - K_{scc}^4} d\varepsilon_3, + \quad (7.21)$$

$$+ \frac{h+H}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{40}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_4^2(\varepsilon_4)}{\sigma^4 f_4^4(\varepsilon_4) - K_{scc}^4} d\varepsilon_4 + \frac{H}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{50}}^{\varepsilon_*} \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_7^2(\varepsilon_5)}{\sigma^4 f_7^4(\varepsilon_5) - K_{scc}^4} d\varepsilon_5$$

Довговічність $N = N_p$ несучої системи розкидача – центральної балки (квадратна труба) січення $180 \times 180 \times 5$, Ст 3 (рис. 5.15), описується за (7.21). Механічні і втомні характеристики матеріалу визначаються згідно даних розділу 3, коефіцієнт концентрації напружень визначається для випадку поверхневого корозійного концентратора як найбільш вірогідного. Як наслідок пітингової корозії $\beta_0 \approx 2$. Приймається, максимальне напруження σ в стінці труби змінюється в межах 100 МПа – 200 МПа, що в свою чергу призводить до умови $l_i > l_0$ на третій ділянці поширення тріщини. На основі цього і даних (7.11)-(7.13) формула (7.21) для кожного випадку середовища навантаження:

на повітрі

$$N_p^{(II)} = 6,53 \cdot 10^5 \int_{0,4}^1 \frac{1 - 1,51 \cdot 10^{-6} \sigma^2 f_{1,1}^2(\varepsilon)}{9,16 \cdot 10^{-9} \sigma^4 f_{1,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 4,70 \cdot 10^7 \int_{0,014}^{0,0281} \frac{1 - 10,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{2,1}^2(\varepsilon)}{4,74 \cdot 10^{-5} \sigma^4 f_{2,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 2,35 \cdot 10^7 \int_{0,03}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/60,09}, \quad (7.22)$$

$$\varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}};$$

в розчині нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/47,81} + 7,76 \cdot 10^4 (\varepsilon_i + 0,93) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (7.23)$$

$$\varepsilon_i = 2,21 - 2,06 \sqrt{1,15 + 127,86 \sigma^{-1} + 127,86 \sigma^{-1}},$$

$$\varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}};$$

в змішаній гноївці

$$N_p^{(II)} = 6,12 \cdot 10^5 \int_{0,4}^1 \frac{1 - 1,51 \cdot 10^{-6} \sigma^2 f_{1,1}^2(\varepsilon)}{9,16 \cdot 10^{-9} \sigma^4 f_{1,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 4,41 \cdot 10^7 \int_{0,014}^{0,0281} \frac{1 - 10,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{2,1}^2(\varepsilon)}{4,74 \cdot 10^{-5} \sigma^4 f_{2,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 2,20 \cdot 10^7 \int_{0,03}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/60,09} \quad (7.24)$$

$$\varepsilon_* = 2,33 - 2,32\sqrt{1 + 225,38\sigma^{-1}} + 262\sigma^{-1},$$

$$f_{1,1}(\varepsilon_3) = \sqrt{\varepsilon_3} [1 + 0,6\exp(-0,21\varepsilon_3^2)] (1,1 + 0,53\varepsilon_3^2), \quad f_{2,1}(\varepsilon_4) = 1,67\sqrt{\varepsilon_4} (1 - 0,1\varepsilon_4 + \varepsilon_4),$$

$$f_{3,1}(\varepsilon_5) = \sqrt{\varepsilon_5} [1,12 + 0,52\sqrt{\varepsilon_5} (1 + 6,42\varepsilon_5^2 - 6,53\varepsilon_5^3 + 5,86\varepsilon_5^4)].$$

В результаті розрахунків за (7.22) - (7.24) побудовано графічні залежності ресурсу від рівня амплітуди напружень, рис. 7.12.

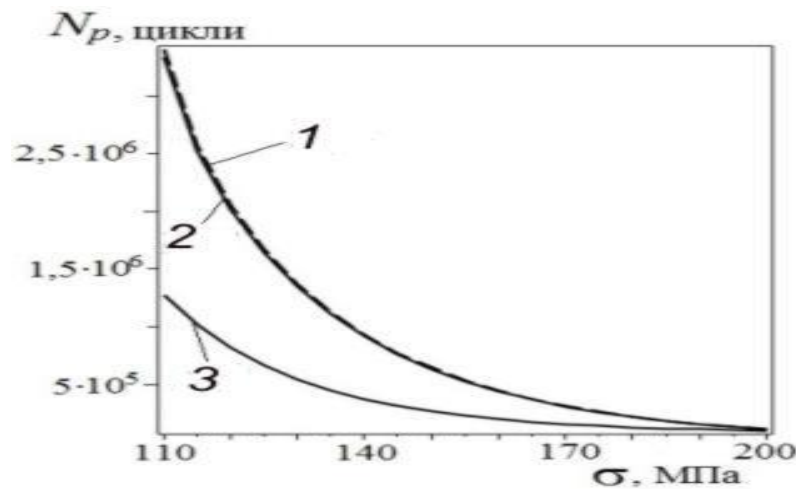


Рис. 7.12. Залежність ресурсу центральної балки розкидача (квадратна труба) від рівня напружень: 1 - повітря; 2 - гноївка; 3 - нітрофоска.

На основі проведених моделювань і обчислень удосконалено несучу систему розкидача РТД – 9 з забезпеченням рівномірного зменшення за величиною рівня напружень по периметру несучої системи (рис. 7.13, табл. 7.2), покращено показники довговічності (рис. 7.10, рис. 7.11, рис. 7.12) з одночасним зменшенням металоємності на 62 кг. Додатково, за рахунок застосування квадратної труби у якості заміни двох зварених Z – подібних профілів, для центральної балки покращується опір корозійній втомі. На основі застосування розроблених методів пропонується ряд вдосконалень, технічна новизна яких підтверджена актами впроваджень та патентами [171, 172, 200], (додаток Г, додаток Д). Розроблені методики впроваджено ВАТ «Ковельсьільмаш» при удосконаленні розкидачів РТД – 9, РРД – 12, ВАТ «Коломиясьільмаш», при удосконаленнях несучої системи навантажувача ПЕА-

1.0 та передано ПАТ «Рівнесільмаш», де застосовуються при модернізації тракторних причепів ПТС-4, ПТС-6, ПТС-8 і напівпричепа АСП-25 (додаток Д).

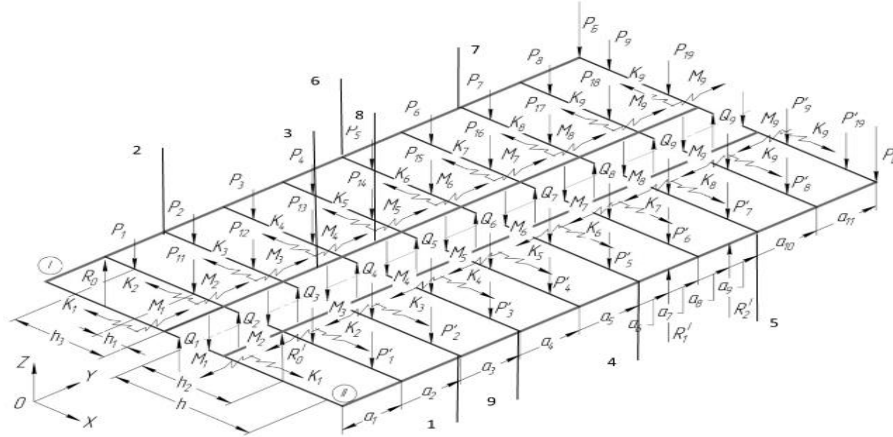


Рис. 7.13. Схематизація розрахункової моделі несучої системи РТД-9

Таблиця 7.2

Порівняльні значення напруженого стану існуючої та модернізованої несучих систем розкидача добрив РТД –9

№ з/п	№ січ.	Базова несуча система, матеріал - Ст 3, МПа	Модернізована несуча система, матеріал – Ст 3, МПа
1	1.	160 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	147 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)
2	2.	152 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	146 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)
3	3.	188 (два Z-подібні холодногнуті профілі 200×60×5, зварені між собою у верхній частині)	126 (квадратна труба 180×180×5, ГОСТ 30245-2003)
4	4.	66 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	65 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)
5	5.	126 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	101 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)
6	6.	68 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	59 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)
7	7.	105 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	108 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)
8	8.	99 (два Z-подібні холодногнуті профілі 200×60×5, зварені між собою у верхній частині)	122 (квадратна труба 180×180×5, ГОСТ 30245-2003)
9	9.	152 (Z-подібний холодногнутий профіль 200×60×5, ГОСТ 13229-78)	140 (рівнополочні холодногнуті швелери 180×80×5 ГОСТ 8278-83)

7.2. Висновки

Розроблена методика розрахунково - експериментальної оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням агресивно - експлуатаційних факторів є основою для розробки несучих структур мобільної с/г техніки для внесення органічних, а також мінеральних добрив. На основі результатів застосування розроблених методів запропоновано модернізацію несучої системи причіпного розкидача добрив РТД – 9 при якій забезпечено рівномірний за величиною з зменшенням до 25% розподіл напружень у перетинах за контуром несучої системи, також покращено показники довговічності і корозійної стійкості з одночасним зменшенням металоємності і підвищенням технологічності. Результати теоретичних і експериментальних досліджень передано та впроваджено в ПАТ «Ковельсьільмаш», ВАТ «Коломиясьільмаш», ПАТ «Рівнесільмаш».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано комплексні аналітично - емпіричні основи вирішення важливої науково - технічної проблеми оцінки і підвищення ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням впливу агресивно - експлуатаційних факторів.

Це дало змогу одержати результати, які, в основному, вирішують дану проблему. Їх суть полягає в наступному:

1. Розроблено методи розрахунку ресурсу несучих систем мобільної сільськогосподарської техніки з позицій механіки корозійно - втомного руйнування, що ґрунтуються на математичному моделюванні процесів руйнування при зародженні і розвитку тріщин під впливом агресивно - експлуатаційних факторів.

2. Запропоновано нову модель процесів корозії у тріщинах несучих систем розкидачів добрив, що описує нестационарний потік водню в метал як адитивну функцію концентрації іонів в електроліті, навантаженості та стандартного електродного потенціалу металу. Вперше для визначення кінетики наводнення зони передруйнування враховано тип і закономірності утворення пасивувального шару та електрохімічні реакції між вершиною і берегами тріщини на відстанях, співрозмірних з величиною розкриття вершини в агресивних сільськогосподарських середовищах.

3. На основі першого закону термодинаміки розроблено розрахункову модель визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних наскрізних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій при сумісній дії статичних навантажень і агресивних середовищ, яку адаптовано до двох видів корозійного впливу робочого середовища – для неефективних та ефективних анодних процесів.

4. На основі положень термодинаміки нерівноважних процесів і механіки втомного поширення тріщин сформульовано розрахункову модель для

визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів металоконструкцій з наскрізними тріщинами при дії циклічних навантажень і корозійно-агресивних середовищ добрив. Модель адаптовано до випадків, коли тріщина в результаті робочих навантажень рухається відносно швидко, анодні процеси не реалізуються і протилежному. Встановлено, що середовища добрив можуть зменшити залишковий ресурс на порядок.

5. Отримано сукупність математичних співвідношень у вигляді нелінійного диференціального рівняння в часткових похідних з початковими і кінцевими умовами для визначення ресурсу елементів несучих систем з поверхневими тріщинами при дії циклічних навантажень і корозійно-експлуатаційних середовищ.

6. Сформульовані основні положення методики визначення ресурсу тонкостінних несучих систем розкидачів добрив за умов їх експлуатації. Застосування методики в повному обсязі продемонстровано на прикладах циклічного згину швелера при дії нітрофоски, доведено, що агресивний вплив добрив зменшує довговічність швелера до 80% порівняно з дослідженнями на повітрі. Визначено ресурс при циклічному згині несучих елементів відкритих профілів з Ст 3 на повітрі, в розчині нітрофоски і змішаній гноївці для Z – подібного і Ω – подібного профілів у залежності від корозійно - експлуатаційних факторів, встановлено, що максимально негативний вплив має нітрофоска, яка зменшує ресурс на 30% порівняно з повітряним середовищем.

7. На основі сформульованої методики шляхом розробки нового ефективного методу обчислення КІН при довільному навантаженні поверхневих тріщин, проведено розрахунок ресурсу основних елементів закритих профілів металоконструкцій розкидачів при циклічному згині, побудовано залежності ресурсу прямокутної і круглої труб від розміру зовнішнього навантаження з урахуванням особливостей зародження корозійно – втомних тріщин. Результатами обчислень ресурсу квадратної труби з Ст 3 при циклічних навантаженнях у повітрі, в розчині мінеральних і органічних добрив доведено: розчин нітрофоски, в порівнянні з повітрям, зменшує ресурс у 2 рази.

8. На основі модифікованого методу мінімуму потенціальної енергії деформації для плоских просторово навантажених несучих систем причіпних розкидачів добрив побудовано розрахункову модель, на основі чого визначено НДС з підтвердженням результатами польових випробувань причіпного розкидача ПРТ – 10, визначено параметри експлуатаційних напружень, встановлено, що у спектрах випадкових процесів виділяються гармоніки з частотами в діапазонах 1,4 – 1,8Гц, 4 – 5Гц, 8 – 9 Гц, гармоніка основного тону має частоту 1 – 3,5Гц.

9. Визначено вплив робочих середовищ на циклічну тріщиностійкість сталей тримких елементів розкидачів добрив: доведено, середовища мають відчутний вплив на швидкість поширення втомних тріщин у сталях Ст 3 і сталі 20, під їх впливом швидкість розвитку тріщиноподібних дефектів зростає від 5 до 25 разів в порівнянні із випробуваннями на повітрі.

10. Встановлено значно менший вплив на границю витривалості сталей 20 та Ст 3 гноївки порівняно з мінеральними добривами, також визначено відсутність негативного впливу органічного добрива на умовну границю втоми порівняно з водою. Доведено, що насичені розчини мінеральних добрив зменшують опір втомі сталей 20 та Ст 3 на всіх рівнях навантажень, при цьому границя витривалості знижується порівняно з повітрям в 2,2 (сульфат амонію) та в 2,5 (нітрофоска) рази, вплив органічних добрив на границю витривалості на 8% слабший порівняно із дощовою водою.

11. Виявлено, що корозія конструкційних сталей в середовищах гноївок ВРХ і змішаної має локальний характер, зумовлений формуванням поодиноких гальванічних пар як наслідок налипання завислих твердих частинок. Швидкості корозії за першу добу експозиції становлять 0,032...0,040 мм/рік, що є у 3...4 рази нижчим порівняно з дощовою водою. Доведено, суттєве зниження швидкості до 0,003 мм/рік спричиняється інгібувальними властивостями хімічних складових гноївок. Встановлено, у порівнянні з водою, стаціонарні потенціали сталей зміщені в область більш від'ємних значень, струми корозії в

4 – 5 разів нижчі, а константи Тафеля вищі, що свідчить про утруднення обох електродних реакцій.

12. Встановлено, що розчини мінеральних добрив, зокрема, сульфату амонію та нітрофоски, на відміну від кристалічних концентратів, спричинюють інтенсивні локальні корозійні пошкодження сталей якісних і звичайної якості. Швидкості корозії максимальні протягом першої доби з збільшенням часу експозиції поступово знижуються до 0,29...0,33 мм/рік, що в 2,5 рази вище у порівнянні з дощовою водою, причиною є формування захисних шарів пасиваційної природи.

13. В розчинах міндобрив поляризаційні криві сталей звичайної якості порівняно з дощівкою знаходяться в області від'ємніших потенціалів, потенціал початку гальмування анодного розчинення сталей звичайної якості -370 мВ, якісних сталей -150 мВ. Константи Тафеля b_c обох груп сталей у дощівці і розчинах нітрофоски та сульфату амонію відрізняються несуттєво, що вказує на подібний характер катодної реакції в області стаціонарного потенціалу. Константи Тафеля $b_a = 8.6$ мінімальні в розчині нітрофоски з причини малої поляризованості анодного процесу, а струми корозії найвищі, що узгоджується з масометричними показниками швидкостей.

14. На основі проведених комплексних досліджень запропоновано модернізацію несучої системи розкидача добрив РТД – 9 при якій забезпечено рівномірний за величиною, з зменшенням до 25% без сачків, розподіл напружень у перетинах за периметром несучої системи, покращено показники довговічності з одночасним зменшенням металоємності на 62 кг. та значним підвищенням технологічності.

15. Результати теоретичних і експериментальних досліджень передано в ПАТ «Ковельсільмаш» та впроваджено при удосконаленні розкидачів твердих добрив РТД – 9, рідких добрив РРД – 12. Розроблені методики впроваджено на ВАТ «Коломиясільмаш» при удосконаленнях несучої системи сільськогосподарського навантажувача ПЕА-1.0 та передано ПАТ «Рівнесільмаш», де застосовуються при модернізації тракторних причепів ПТС-4, ПТС-6, ПТС-8 і напівпричепа АСП-25.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amirudin A. Corrosion mechanism of phosphate zinc layers on steel as substrates for automotive coatings // Prog. Org. coat. – 1996. – Vol. 28. – №1. – P. 54 – 75.
2. Atkinson J.D., Lindley T.C. Effect of stress wafe form and hold–time on environmentally assisted fatigue crack propagation in C-Mn structural steel // Met. Sci. – 1979. – Vol. 13. – N7. – P. 444 – 448.
3. Bamford W.H. The Influence Environment on Fatigue. L. IME. – 1977. – P. 51 – 56.
4. Benson J. P. Influence of grain size and yield strength on a threshold fatigue behaviour of low alloy steel // Metal. Sci. – 1979. – Vol.13, № 9. – P. 535 – 539.
5. Benthem J.P., Koiter W.T. Asymptotic approximations to crack problems// Mech. Fract. – Leyden. – 1973. Vol. 1. – P. 131 – 178.
6. Capelle J., Dmytrakh I., Pluvinage G. Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength // Corrosion Science. – 2010. – Vol. 52. – P. 1554–1559.
7. Capelle J., Gilgert J., Dmytrakh I., Pluvinage G. The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch // Engineering Fracture Mechanics. – 2011. – Vol. 78. – P. 364–373.
8. Elboujdaini M. Initiation of environmentally assisted cracking in line pipe steel. // 16th European on Frackture (ECF16th) “Fracture of Nano and Engineering materials and structures”, Alexandroupolis, Greece, July 3-7, 2006.– Dordrecht: Springer.– 2006. – P. 1007 – 1008.
9. Handbook of Corrosion Data. 2nd Edition, hrsg. von Bruce D. Craig und David S. Anderson, ASM International Materials Park, OH 44073, Juni 1995. – 998 p.
10. Hinton B.R.W., Procter R.P.M. The effect of cathodic protection and over protection on the tensile ductility and corrosion fatigue behaviour of X–65

- pipeline steel // Hydrogen Effects in Metals. – N.Y.: AIME. – 1981. – P. 1005 – 1014.
11. <http://www.agro-business.com.ua/2010-06-11-12-53-22/1130-2012-07-07-12-27-10.html>.
 12. <http://www.agro-business.com.ua/2010-06-11-12-53-22/1370-2013-01-12-13-01-51.html>.
 13. <http://www.apn-ua.com/dkpp/n29755>.
 14. http://www.splav.kharkov.com/choose_mat.php?class_id=9.
 15. Hydrogen solubility in pure iron and effects of alloying elements on the solubility in the temperature range 20 to 500°C / W.Y. Choo, I.Y. Lee, C.G. Cho, S.H.Hwang - J. Materials Science. – 1981. Vol. 16.№5. – P.1285 – 1292.
 16. Irwin G.R. Crack-extension force for a part through crack in a plate // Trans. ASME, s. E.84Journ.of Applied Mechanics. – 1962. – Vol. 29. – P.651 – 654.
 17. Knaster M. J. Parks Mechanism of corrosion and delamination of painted phosphate steel during accelerated corrosion testing // J of coatings technology. – 1986. – Vol. 56, № 738. – P. 31 – 39.
 18. Korrosion und Korrosionsschutz. Von Herbert H. Uhlig, Prof. der Metallurgie. Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. rer. nat. h.c. Kurt Schwabe, übersetzt und ergänzt von Dr. Werner Schmidt und Manfred Seidel. 384 S., 120 Abb. und 30 Tab. Akademie-Verlag GmbH., 108 Berlin 1970. – 390 p.
 19. Lohmeyr S.von. Metallische Korrosion. // Metalle Oberfläche. – 1977. – № 2. – P. 90–93.
 20. Newman J.C. A review and assessment of the stress-intensity factors for surface cracks // Part-through crack fatigue prediction, ASTM STP 687. – Philadelphia: ASTM. – 1979. – P. 43 – 46.
 21. Newman J.C., Raju I.S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack // Eng. Fract. Mech. – 1981. – Vol. 15, N 1 – 2. – P.185 – 192.
 22. P. Popovich. Remaining resource of bearings frames of machine–building constructions / P.V. Popovich, T. Rybak // Metalurgija, Vol. 49 (2010), br. 3. – Zagreb: Croatian Metallurgical Society. – 2010.– P. 237.

23. Panasyuk V.V., Ratych L.V., Dmytrakh I.N. Fatigue crack growth in corrosive environments // *Fatigue Engn. Mater. Struct.* – 1984. – №1. – P. 1 – 11.
24. Paris P. A critical analysis of crack propagation laws / P. Paris, F. Erdogan // *Journal of Basic Engineering.* – 1963. – Vol. 85, № 4. – P. 528 – 533.
25. P. Popovich. Experimental kinetic investigation of the fatigue cracks development of steelwork in ammonia water/ P. Popovich, S. Sikorskyi// *Metalurgija*, vol. 51 (2012), br.3.- Zagreb: Croatian Metallurgical Society, 2012. – 411 p.
26. P. V. Popovich Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska/ P. V. Popovych, Z. B. Slobodyan// *Materials Science* . – May 2014, Volume 49, Issue 6, pp 819-826.
27. QS Kompakt. Das QS-Prufsystem im Uberblick, Німеччина, 2008, Wir setzen Maßstabe. DLG – Testzentrum Technik und Betriebsmittel. – 207 p.
28. Radon J.C. Influence of environemnt on threshold on fatigue crack growth // *Metal.Sci.*– 1979. – 13. –H 7. – P.411–419.
29. Raju I.S., Newmen J.C. Methods for analysis of cracks in three dimensional solids // *Journ. of Aero. Soc. of India.* – 1984 – Vol. 36, N3. – P.153 – 172.
30. Schijve J.. "Fatigue of materials and structures in the 20th century: state-of-the-art," *Materials Science.* –2003. – 39. – №. 3. – P 7 – 27 .
31. Smith O., Stewart A.T. Effect of aqueous end hydrogen environments on fatigue crack growth in 2Ni-Cr-Mo-V rotor steel // *Ibid.* – P. 429 – 435.
32. Smith T.A., Warwick R.G. Summary of keported vessel defects for the period 1962-1978 and their relevance to nuclear primary circuits. – In: *Structural Safety and Reliabiliny* / Eds. T. Moan. M. Shinozuka. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier. – 1981, P. 451 – 465.
33. Stallybrass M.P. A semi–infinite crack perpendicular to the surface of an elastic half–plane // *Int. J. Eng. Sci.* – 1971.– 9, № 1. – P. 133 – 150.
34. The K_{th} dehaivour of three stainless steels in differents / M.Ait Bassidi, J.I.Dickson, J.P.Masounave // *Advances in gracture research.*

- Proc. 6th Int.Cont.Fract. – Oxford Pergamon Press. – 1984. – №4. – P. 2473 – 2480.
35. Tsyurulnyk O.T., Petryna D.Yu. Hredil M.I. The fracture peculiarities of trunk pipeline steels after their long term service // Proceedings of the international conference on Crack paths (CP 2006) 14th - 16th September 2006 – Parma (Italy). P. 61.
36. Vosikovsky O. Frequency, stress ratio, potential effects on fatigue crack growth of HY 130 steel in salt water // J. Test. and Eval. – 1979. – V. 6. – N3. – P. 175 – 182.
37. Адамчук В.В. Механіко-технологічні і технічні основи підвищення ефективності внесення твердих мінеральних добрив та хіммеліорантів: дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук. – Київ: Національний аграрний університет. – 2006. – 442 с.
38. Адамчук В.В. Сімейство кузовних машин для внесення мінеральних добрив // Міжвідомчий тематичний наук. зб.: Механізація та електрифікація сільського господарства. ННЦ “ІМЕСГ”. – Глеваха: ННЦ “ІМЕСГ”. – 2000.– Вип. 83.– С. 44 – 48.
39. Адамчук В.В. Проблеми і перспективи вітчизняного сільськогосподарського машинобудування / В.В. Адамчук, Я.С. Гуков, М.І. Грицишин // Вісн. аграр. науки. – 2010. – № 10. – С. 42 – 45.
40. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов / Г.В.Акимов // М.: Изд.-во АН СССР. – 1945. – 414 с.
41. Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин. – Киев: Наук. думка. – 1982. – 346с.
42. Андрейкив А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций.– К.: Наук. думка. – 1992.– 184 с.
43. Андрейків О.Є., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – Київ: Наукова думка. – 2008. – 344 с.

44. Андрейків О.Є., Кіт М.Б. Визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів конструкцій при двохосьовому навантаженні // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – №1. – С. 11 – 16.
45. Андрейків О.Є., Кіт М.Б. Визначення періоду докритичного росту тріщин в елементах конструкцій при їх двох частотному навантаженні // Машинознавство – 2006. – №2 – С. 3 – 9.
46. Андрейків О.Є., Сас Н.Б. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – №2. – С. 19 – 26.
47. Андрейків О.Є., Сас Н.Б. Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах // Доповіді НАН України. – 2006. – №5 – С. 47 – 52.
48. Андрейків О.Є., Сас Н.Б. Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – №2 – С. 62 – 68.
49. Андрейків О.Є., Тим'як Н.І. Електрохімічна модель локальної корозії у вершині навантаження тріщини // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1994. – № 1. – С. 25 – 30.
50. Анилович В.Я., Дьяченко В.А. Эксплуатационная надежность с.-х. машин. Минск: Ураджай. – 1974. – 263 с.
51. Анилович В.Я., Карпов В.Г. Обеспечение надежности с.-х. техники. К.: "Тэхника". – 1989. – 126 с.
52. Анілович В.Я., Гринченко О.С., Карабін В.В., Литвиненко В.Л., Литвинов В.О. Міцність та надійність машин. К.: Урожай. – 1976. – 285 с.
53. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высш. Школа. – 1984. – 518 с.
54. Атаманицын П.В. Плавность хода большегрузных тракторных полуприцепов // Атаманицын П.В., Миркитанов В.И. Гальсбанд Ф.С., Щурин К.В. /Механизация и электрификация сельського хозяйства. – 1985.– №6. – С. 14 – 15.

55. Афанасьев С., Горбатов В., Погорілий В. Якісна елементна база – основа надійності вітчизняної техніки // Техніка АПК. – 2006. – №5–6. – С. 40–43.
56. Балан С.О. Проектування конструкцій зварних рам. – Одеса: Астропринт. – 2001. – 111 с.
57. Баловнев Г.Г. Научные основы повышения долговечности сварных рамных конструкций сельскохозяйственных машин транспортного назначения при их производстве и ремонте: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.05.03. М. – 1971. – 32с.
58. Баловнев Г.Г. Сварные рамные конструкции сельскохозяйственных транспортных машин. М.: ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш. – 1974.– 64 с.
59. R. A. Barna. Influence of Operating Media on the Fatigue Fracture of Steels for Elements of Agricultural Machines/ R. A. Barna, P. V. Popovich // Materials Science . – 2014.– Vol. 50, 3– P. 377 - 380.
60. R. A. Barna. The influence of Operating Environments on Fatigue Crack Growth Resistance of Steels for Elements of Agricultural Machines/ R. A. Barna, P. V. Popovich, R. I. Vovk // Materials Science . – 2014.– Vol. 50, 4– P. 225 - 228.
61. Безуглий М.Д., Присяжнюк М.В. Сучасний стан реформування аграрно–промислового комплексу України. – К.: Аграрна наука. – 2012. – 48 с.
62. Беляев В. М. Сопротивление материалов: – 14-е издание. – М.: "Наука". – 1965. – 856 с.
63. Бодров А.С. Технология ремонтного окрашивания сельско–хозяйственных машин порошковыми красками / А.С. Бодров // Автореф. дис.канд. техн. наук. – Москва. – 2007. – 16 с.
64. Бойко А.И., Тасенко В.В. Многофункциональность и проблема обеспечения надежности посевных секций // Загальнодерж. міжвідомчий н.-т. зб. «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Кіровоград: КАНТ. – 2005. – Вип. 35. – С. 124 – 126.

65. Бойцов В.В. Надежность шасси самолета. – М.: Машиностроение. – 1976. – 216с.
66. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение. – 1984. – 312 с.
67. Босой Е.С. Теория, конструкции и расчет сельскохозяйственных машин / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнов, Е.Г. Султан-Шах. – М.: Машиностроение. – 1977. – 568 с.
68. Вайншток В.А., Варфоломеев И.В. Метод расчета коэффициентов интенсивности напряжений для типичных пространственных дефектов// Пробл. прочности. – 1986. – №8. – С. 18–24.
69. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физмат-гиз. – 1959. – 574 с.
70. Волков П.М., Тенненбаум М.М. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность. – М.: Машиностроение. – 1977. – 310 с.
71. Восиковский О. Рост усталостной трещины в трубопроводной стали Х65 при испытаниях с низкой частотой циклов в солёной и пресной воде // Теор. основы инж. расчётов. – 1975. – 97, Д; №4. – С. 12 – 20.
72. Гайдар С.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии и износа с применением нанотехнологий / С.М. Гайдар // Дис. докт. техн. наук. – Москва. – 2011. – 416с.
73. Гайдар С.М. Защита крепежных узлов резьбовой смазкой на основе однокомпонентного маслорастворимого ингибитора коррозии / Диссерт. канд. техн. наук. – Москва. – 2007. – 223 с.
74. Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах. – М.: Metallurgy. – 1974. – 272с.
75. Гембара О.В., Терлецька З.О., Чепіль О.Я. Визначення електричних полів у системі електроліт-метал // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – № 2. – С.71 – 77.

76. Гембара О.В., Терлецька З.О., Чепіль О.Я. Концентрація водню біля вершини корозійної тріщини // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – № 1. – С.109 – 111.
77. Годжаев З.А., Сергеев В.Н., Фараджаев Ф.А. Многокритериальный выбор оптимальной конструкции рамы // Тракторы и сельхозмашины. – 2006. – №3. – С. 20 – 24.
78. Годжаев З.А., Сергеев В.Н., Фараджев Ф.А. Оценка и расчет эффективности альтернативных вариантов рамы несущей системы мобильной машины / Тракторы и сельхозмашины. – 2006. – №2. – С. 15 – 20.
79. ГОСТ 10704-91 Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент.
80. ГОСТ 11474-76 Профили стальные гнутые. Технические условия.
81. ГОСТ 12492.0-90 Прокат для сельскохозяйственных машин. Общие технические условия.
82. ГОСТ 13229-78 Профили стальные гнутые зетовые. Сортамент.
83. ГОСТ 19771-93 Уголки стальные гнутые равнополочные. Сортамент.
84. ГОСТ 19772-93 Уголки стальные гнутые равнополочные. Сортамент.
85. ГОСТ 25.101-83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
86. ГОСТ 30245-2003. EN 10219 Профиль замкнутый, сварной, гнутый прямоугольный. . Сортамент.
87. ГОСТ 5267.1-90 Швеллеры. Сортамент.
88. ГОСТ 8278-3 Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент.
89. ГОСТ 8509-93 Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент.
90. ГОСТ 8510-86 Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент.

91. Гуков Я.С. Концепція розроблення системи машин для виробництва сільськогосподарської продукції / Я.С. Гуков, М.І. Грицишин, Л.В.Погорілий та ін. // Вісн. аграр. науки. – 2002. – № 9. – С. 48 – 50.
92. Гусев А.С. Экспериментальные исследования узлов металлоконструкций кабин тракторов / А.С. Гусев, И.М. Илинич, В.И. Щербаков, Б.И. Петров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. –1987. – №12. – С. 26 – 30.
93. Дівєєв Б. Розрахунок та оптимізація одновісного причепа з підвіскою змінної жорсткості // Дівєєв Б., Попович П., Керницький І./Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Вип. 37. – Луцьк: ЛНТУ. – 2012. – С.86 – 91.
94. В.Ф. Дідух. Розрахунок геометричних параметрів робочої поверхні засобу формування гранул органо-мінеральних добрив / В.Ф. Дідух, В.В. Тарасюк, І.В. Тараймович // Технологічні комплекси. Науковий журнал, Вип. 1 (3). – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2011. – С. 121 – 123.
95. В.Ф. Дідух. Дослідження балансування гвинтових робочих органів для внесення сапропелів / В.Ф. Дідух, Ю.Б. Гладьо, С.Ф. Бабарика, О.Л. Ляшук // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя «Науковий журнал ». – Тернопіль, 2010. – №2. – С.99 – 107.
96. Дідух В.Ф. Дослідження руху частинки органо-мінеральних добрив по формуючій поверхні / В.Ф. Дідух, В.В. Тарасюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вип. 10 т.2. (59). – Вінниця : Видавничий центр ВНАУ, 2012. – С. 84 – 88.
97. Дмитрах І.М., Похмурський В.І. Вплив сірководню на роботоздатність матеріалів обладнання газодобувної промисловості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 2. – С. 157 – 169.
98. Дмитрах І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка. – 1999. – 342 с.

99. Дмитриченко С.С. Создание тракторов с минимальной металлоемкостью и требуемой прочностью // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 4. – С. 22 – 25.
100. Дмитриченко С.С. Методы оценки и повышения долговечности несущих систем тракторов и других машин: Дис. д-ра техн. наук: 05.05.03. М. –1971. – 440с.
101. Дудина Н.Х. Агрохимия и система удобрения / Н.Х. Дудина // – М.: Колос. – 1991. – 400 с.
102. Емельянов Н.Я. Исследование прочности несущих систем седельных тягачей и самосвалов. Автореф. дис.канд.техн.наук.–М. – 1979. – 22 с.
103. Живейнов Е.Е. Строительная механика металлоконструкций строительных и дорожных машин // Живейнов Е.Е., Карасев Г.Е., Цвей И.К. / М.:Машиностроение. –1988. – 279 с.
104. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов [Текст] / Н. П. Жук. –М.: ООО Альянс. – 2006.– 472 с.
105. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия. – 1966. – 407 с.
106. Жуков А.П. - Основы металловедения и теории коррозии: Учебник для машиностроительных техникумов // М.:Металлургия. –1976. – 375с.
107. Закорчимски Г. Проникновение электролитического водорода в железо и стали и его влияние на механические свойства металлов // ЗМ. – 1983. – № 5. – С. 733–739.
108. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов: учебник [для вузов] / В.С. Золотаревский. – [2-е изд.]. – М.: Металлургия. – 1983. – 352 с.
109. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение. – 1986. – 248 с.
110. Зубець М.В. Актуальні проблеми технічної політики в аграрному секторі України / М.В. Зубець, Я.С. Гуков, М.І. Грицишин. — К. – 2007. — 78 с.
111. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия. – 1979. – 495с.

112. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М.М. Севернев, Н.Н. Подлекарев, В.Ш. Сохадзе и др.; под ред. М.М. Севернева. – Минск: Беларус. навука. – 2011. – 332 с.
113. Іванишин В. Випробування – необхідний етап в створенні конкурентоспроможної сільськогосподарської техніки // Техніка АПК. – 2006. – №5. – С. 10 – 11.
114. Карпенко Г.В. О сущности коррозионной усталости стали/ Г.В.Карпенко // Вопросы машиноведения и прочности в машиностроении, вып.3. – М.: Изд.-во АН СССР. – 1955. – С. 100 – 116.
115. Кархин В.А., Михайлов В.Г. Распределение водорода при однопроводной сварке стали // Автомат. Сварка. – 1985. – №6. – С.39 – 42.
116. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. – М.: Металлургия. – 1982. – 400с.
117. Кистяковский В.А. Коррозия железа при контакте с границей двух фаз/ В.А. Кистяковский // Тр. Июньской сессии АН СССР.– М.: Изд.-во АН СССР. – 1932.– С.37 – 42.
118. Классификатор отказов тракторных прицепов. –Центральная МИС, Солнечногорск. – 1975. – 46 с.
119. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение. – 1979. – 232с.
120. Кореньков Д.А. Добрива та їх способи використання /Д.А. Кореньков, І.І. Синягин // За ред. Коренькова. – М.: Колос. – 1982. – 415 с.
121. Корнеєнко С.В., Корбутяк О.М. Ресурси підземного геологічного простору України. Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2008. – №43. – С. 51 – 53.
122. Корнієнко С., Корбутяк О. Проблеми впливу ґрунтового середовища на корозію магістральних газопроводів України // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2009. – №46. – С. 42 – 43.

123. Кравчук В. Алгоритм розвитку сільськогосподарського машинобудування на сучасному етапі / В. Кравчук // Техніка і технології АПК. –К.:ДП "УкрЦВТ". – 2012. – № 1. – С.6 – 9.
124. Кравчук В. Науково-організаційні аспекти технічного переоснащення АПК та розвитку сільськогосподарського машинобудування / В. Кравчук, О. Григорович, В. Гусар // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 9 (36). – С. 7 – 12.
125. Кравчук В. Стратегія технічного переоснащення АПК та прогноз розвитку сільськогосподарського машинобудування /В. Кравчук, О. Григорович, В. Погорілий, В. Гусар // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. ДНУ УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке. – 2012. – Вип. 16 (30), кн. 1. – С. 3 – 14.
126. Кравчук В.І. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / За ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалюка. – К.: Аграрна наука. – 2004. – 396 с.
127. Крауч С., Старфильд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела / Пер. с англ. – М.: Мир. – 1987. – 328 с.
128. Криштал М.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полуинин и др.// – М.: Техносфера. – 2009. – 206 с.
129. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов / Н.Д.Томашов, П.Н.Жук, В.А.Титов, М.А.Веденева. – М.: Металлургия. – 1971. – 280 с.
130. Лавренко В.А., Швеца В.А. Определение коррозионной активности грунтов по отношению к стали методом поляризационного сопротивления // Физико-химическая механика материалов. –1992. – Т. 28. – № 3. – С. 108 – 110.
131. Лельчук Л.М. Испытания и ремонт автомобильных рам/Лельчук Л.М., Сархошьян Г.Н., Кобрин М.М., Гурман В.С. /М. Транспортю. – 1974.–224с.

132. ЛИРА 9.0 Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций: Руководство пользователя. – К.: НИИАСС. – 2002. – В 3 т. – 435 с.
133. Лінник М.К. Сенчук М.М. Технології і технічні засоби виробництва та використання органічних добрив: монографія // за ред. доктора технічних наук, академіка НААН В.В Адамчука. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М. – 2012. – 248с.
134. Лозановская И.Н. Теория и практика использования органических удобрений // Лозановская И.Н., Орлов Д.С., Попов П.Д. / М. – 1988. – 96 с.
135. Лурье А.Б., Громбчевский А.А. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин. – Л.: Машиностроение. – 1977. – 528 с.
136. Лычковский Э.И. К вопросу о моделировании электрохимических процессов в вершине трещины // Физико-химическая механика материалов. – 1987. – № 3. – С. 33 – 35.
137. Макаренко М. Пітинг та інші загрози міжсезоння / М. Макаренко. // Агробізнес сьогодні. – 2012. – № 22. – С. 245.
138. Мальцева Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. – 2000. – 457 с.
139. Мальцева Г.Н. Электрохимические и химические процессы коррозии [Текст]: учеб. пособие / Г. Н. Мальцева; под ред. С. Н. Виноградова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. – 2004. – 116 с.
140. Меламед М.Н. О системе дифференцированного хранения машин в сельском хозяйстве / М.Н. Меламед // Сб. научн. Работ Курганского СХИ, вып. У11, Изд.-во газеты Советское Зауралье. – 1963. – 356 с.
141. Металлические конструкции / Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат. – 1986. – 560 с.
142. Металлические конструкции / Под ред. Н.П. Мельникова. – М.: Стройиздат. – 1980. – 776 с.

143. Методика ускоренных прочностных испытаний несущих систем машин на полигоне КубНИИТиМ // Всесоюзное объединение „Союзсельхозтехника” Совета Министров СССР. – Новокубанск: КубНИИТиМ. – 1968. – 213 с.
144. Механика разрушения и прочность материалов [Текст]: справ. пособ. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – К: Наукова думка. – 1990. [Т. 4]: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др.. – К: Наукова думка, 1990. – 680 с.
145. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка. – 1988. – Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами/ М.П. Саврук. – 620 с.
146. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб.; за заг. ред. В.В. Панасюка. – К.: ВД „Академперіодика”. – 2005. [Т. 7] : Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л. Тот; за ред. І.М. Дмитраха. – К.: ВД „Академперіодика”. – 2005. – 378 с.
147. Минеев В.Г. Агрохимия. Учебник / В.Г. Минеев // – М.: МГУ, Колос. – 2004. – 720 с.
148. Михайлович Я. Проблема зберігання сільськогосподарської техніки/ Я.Михайлович, А. Рубець // Пропозиція. – 2008. – № 12. – С. 90 – 104.
149. Мінеєв В.Г. Агрохімія. Підручник – М.: Изд-во МГУ. – 1990. – 486 с.
150. Рибак Т. Определение характеристик усталостного разрушения при сложном напряженном состоянии // Рибак Т. Попович П. Сташків М., и др. Материалы третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-09, Москва, - М: Интерконтакт Наука, 2009. – С. 95 – 96.
151. Морозов Е.М., Никишков Г.Л. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука. – 1980. – 254с.

152. Москвичев В.В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений: В 3 т. – Т.1: Постановка задач и анализ предельных состояний. – Новосибирск: Наука. – 2002. – 106 с.
153. Муравин Е.А. Агрохімія. – М.: Колос. – 2003. – 384 с.
154. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука. – 1966. – 708с.
155. Мінеральні добрива.
<http://www.agrouiness.com.ua/component/content/article//960.html> ed =58.
156. Овчинников А.Н. Приближенная формула для определения коэффициентов интенсивности напряжений для тел с поверхностными трещинами // Пробл. прочности. – 1986. – №11. – С. 44 – 47.
157. Оптимизация конструктивных параметров несущих металлоконструкций прицепов: Отчет. / Оренбургский политехнический институт.: Руководители работы Е. А. Бондаренко, К. Е. Щурин. – N ГР 01890006482: Оренбург. – 1989. – 95 с.
158. Попович П. Определение характеристик циклической трещиностойкости материалов металлоконструкций с/х техники / П. Попович, А. Бабий. /Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов VIII международной научно-технической конференции. Беларусь, Гомельский государственный технический университет им П. О. Сухого.– Гомель: ГГТУ. – 2010. – 38 с.
159. P. V. Popovich. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska / P. V. Popovich, Z. B. Slobodyan // Materials Science . – 2014.– Vol. 49, 6. – P. 819-826.
160. Попович П. Оцінка несучої здатності і залишкової довговічності мобільних с/г машин//Т. Рибак, П.Попович / Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків. – 2008. – Вип. 69.–С. 18–23.
161. Павленко П.Д. Методология разработки рациональных конструкций несущей системы и ходовой части большегрузных строительных

- автомобилей–самосвалов / Диссерт. докт. техн. наук. – Набережные челны: КГПИ. – 2005. – 395 с.
162. Панасюк В.П., Андрейкив А.Е., Стадник М.М. Метод граничной интерполяции в задачах механики разрушения // Физ.-хим. механика материалов. – 1983 – №1. – С. 3 – 12.
163. Панасюк В.В., Андрейкив О.Є., Партон В.З. Основы механики разрушения.– К.: Наукова думка, 1988. – 488 с.
164. Панасюк В.В., Остащ О.П., Костык Е.М. Зарождение усталостных трещин у концентратора напряжений // Физ.-хим. механ. матер. – 1985. – № 6. – С. 3 – 10.
165. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. О некоторых задачах исследования циклической трещиностойкости материалов в жидких средах // Физико–химическая механика материалов. – 1982. – №6. – С. 42 – 49.
166. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Определение циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде // ДАН СССР. – 1983. –269, – №1. – С. 109 – 112.
167. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Циклическая трещиностойкость металлов в коррозионных средах // Успехи механики. – 1984. – №3. – С. 37 – 50.
168. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацишин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. – Киев: Наук. думка. – 1976. – 445с.
169. Панов С.А. Многоканальные компьютеризованные системы для виброакустических измерений // Мир измерений. – 2004. – №11. – С. 14 – 24.
170. Пархиловский И.Г. Спектральная плотность распределения неровностей микропрофиля дорог и колебания автомобиля. Автомобильная промышленность. – 1961. – № 10.– С. 25 – 28.
171. Рибак Т. Пат. України на корисну модель 48663, МПКА01М 7/00. Рама причіпного вентиляторного обприскувача // Рибак Т., Паламарчук П.,

- Бабій А., Попович П., Матвіїшин А. / Пат. України на корисну модель 48663, МПКА01М 7/00. Від 25.03.2010 р. Заявл. 27.10.2009 р.; опубл. 25.03.2010 р. Бюл. №6 2010р.
172. Попович П. Пат. України на корисну модель 89757, МПКА01М 7/00. Вертикальний бітер розкидача// Попович П., Бабій А., Сташків М. /Пат. України на корисну модель 89757, МПКА01С 3/06. Від 25.04.2014 р. Заявл. 17.12.2013 р.; опубл. 25.04.2014 р. Бюл. №8 2014р.
173. Петухов М.П. Агрохімія і система добрив / М.П.Петухов // – М.: Колос, 1979. – 392 с.
174. Підгурский Н. Прогнозирование и обеспечение усталостной надежности несущих конструкций мобильных машин // Підгурский Н., Сташків Н., Попович П. / Международен конгрес «Машиностроителни технологии» International congress “Mechanical engineering technologies’04” 2004, Varna, Bulgaria, volume 6. – С.139–142.
175. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка. – 1988. – 734 с.
176. Підгурський М. Прогнозування ресурсу роботи елементів рам самохідних бурякозбиральних комплексів на стадії росту втомних тріщин// Підгурський М. Сташків М. Попович П. / Динаміка, міцність і надійність сільськогоспо–дарських машин “DSR AM–I” Праці I Міжнародної науково–технічної конференції, Тернопіль. – 2004. – С.636 – 642.
177. Підгурський М.І. Методи прогнозування ресурсу несучих і функціональних систем бурякозбиральних комбайнів / Дисерт. доктора техн. наук. – Тернопіль: ТДТУ. – 2007. – 338 с.
178. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытания сельскохозяйственных машин. – К.: Техніка. – 1981. – 176 с.
179. Погорелый Л.В. Ускоренные испытания на усталость несущих систем тракторных прицепов и кормораздатчиков / Л.В. Погорелый, Г.В. Макушин, Э.Я. Филатов, М.С. Тракало // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1981. – № 10. – С. 31 – 33.

180. Погорелый Л.В., Анилович В.Я. Испытания сельскохозяйственной техники и научно–технические основы оценки и прогнозирования надежности сельскохозяйственных машин. – К.: Феникс. – 2004. – 208 с.
181. Погорецкий Р.Г. Машина ИМА-5 для испытаний металлов на усталость в жидких средах / Р.Г. Погорецкий, М.М. Мацейко // Влияние рабочих сред на свойства материалов. – К.: Наук. думка. – 1964. – Вып. 3. – С. 146–150.
182. . Попович П.В. Підвищення корозійної стійкості металоконструкцій машин для рослинництва / Попович П., Рибак Т.І., Бортник І.М., ін. // Вісник ХНТУСГ. Випуск 145 . – Х.: Віровець А.П. «Апостроф», 2014. – С. 46–55.
183. . Попович П. Моделювання експлуатаційної навантаженості несучих систем розкидачів добрив типу ПРТ – 10 // Попович П., Сташків М.Я., Довбуш Т. / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 151.– Х.: Віровець А.П. «Апостроф», 2014. – С. 367–372.
184. . Попович П. В. Моделювання експлуатаційної навантаженості при стендових випробуваннях на втому вузлів рам с.-г. машин / П.В. Попович, Т.І. Рибак, М.Я. Сташків та ін. // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009. – Вип. 80. – С. 28–33.
185. . Попович П.В. Моделирование роста угловых трещин в тонкостенных профилях при стесненном кручении // Попович П.В., Сташків Н.Я. / Труды V Международной научно – технической конференции «Современные проблемы машиностроения». – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. – . С. 107–112.
186. . П. Попович. Особенности оценки несущей способности и долговечности машиностроительных конструкций/П. Попович, С. Сикорский, Р. Халилов. / Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов VIII международной научно-технической конференции. Беларусь, Гомельский государственный технический университет им П. О. Сухого.- Гомель: ГГТУ. – 2010. – С. 32.

187. Попович П. Вплив експлуатаційних середовищ на поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій сільськогосподарських машин // Попович П., Цьонь О., Довбуш Т./Вісник ТНТУ № 3(75). – Тернопіль: ТНТУ. – 2014 р. –С. 157 – 166.
188. Попович П. Деформівно-напружений стан несучої системи розкидачів твердих органічних добрив РТД–14 // Попович П., Сікорський С. / Вісник ХНТУСГ. – Вип. 128. – Харків: ХНТУСГ. – 2012.– С. 304 – 309.
189. Попович П. Дослідження НДС несучих систем важконавантажених мобільних с/г машин // Попович П., Сікорський С., Бабій А. /Вісник ХНТУСГ вип. 120 – Харків: ХНТУСГ. – 2012. – С. 331 – 335.
190. Попович П. Енергетичний спосіб розкриття статичної невизначеності несучих рамних стержневих систем мобільних с/г машин // Попович П., Сташків М., Дутка А., Довбуш Т. / Вісник ХНТУСГ вип. 121 – Харків: ХНТУСГ. – 2012.– С. 251 – 256.
191. Попович П. Залишковий ресурс тонкостінних конструктивних елементів несучих систем сільськогосподарських машин при дії агресивних середовищ // Попович П., Хомик Н., Добровольська Л./ Вісник ХНТУ. Випуск 146. – Х.: Віровець А.П. «Апостроф». – 2014. – С. 142 – 150.
192. Попович П. Імітаційне моделювання при розрахунках на квазістатичну міцність конструктивних структур важконавантажених сільськогосподарських машин // Попович П., Рибак Т., Довбуш Т., Цьонь Г. т.ін./Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 139. – Х.: Віровець А.П. «Апостроф». – 2013. – С. 321 – 326.
193. P. V. Popovich. Influence of Organic Fertilizers on the Corrosion-Electrochemical Characteristics of Low-Carbon Steels / P. V. Popovych, L. A. Mahlatyuk, R. B. Kupovych // Materials Science . – 2014.– Vol. 50, 2– P. 284 - 289.

194. Попович П. Методика визначення ресурсу елементів металоконструкцій рам розкидачів добрив з врахуванням умов їх експлуатації / Попович П. / Вісник ЛНТУ. Випуск 28. – Луцьк.: ЛНТУ, 2014. – С. 47 – 60.
195. Попович П. Моделирование нагруженности винтовой поверхности вращающихся частей металлоконструкций // Попович П., Сикорский С. / I всероссийская научно – техническая конференция «Современная техника и технологии:проблемы, состояние и перспективы». Сборник материалов. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт. – 2011. – С. 298 – 302.
196. Попович П. Моделирование нагруженности машиностроительных металлоконструкций рабочей средой // Попович П., Сикорский С. / IV международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-11. Сборник материалов. – М: Интерконтакт Наука. – 2011. – С. 787 – 789.
197. Попович П. Моделювання експлуатаційної навантаженості несучих систем розкидачів добрив типу ПРТ – 10 // Попович П., Сташків М.Я., Довбуш Т. / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Випуск 151. – Х.: Віровець А.П. «Апостроф». – 2014. – С. 367 – 372.
198. Попович П. Особенности проектирования базовых конструкций сельскохозяйственных машин с позиций прогнозирования надежности // Попович П., Бабий А. / Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: доклады Международной научно-практической конференции.– Минск: БГАТУ. – 2011.– С. 137 – 140.
199. Попович П. коррозия машиностроительных сталей в средах органических удобрений / П.В. Попович, О.Цень, Т. Довбуш, др. // Мотрол. – 2014: Люблин. –Т. 16, № 4. – С. 219–226.
200. Попович П. Пат. України на корисну модель 48663, МПКА01М 7/00. Рама розкидача твердих органічних добрив // Попович П., Бабій А., Сташків М.,

- Довбуш Т. / Пат. України на корисну модель 92328, МПКА01С 15/00. Від 11.08.2014 р. Заявл. 18.03.2014 р.; опубл. 11.08.2014 р. Бюл. №15. – 2014.
201. Попович П. Пошукове конструювання на сучасному розвитку експериментальних засобів та аналітичних досягнень – концептуальна триєдина модель // Попович П.В., Рибак Т., Бабій А. / Вісник ТНТУ. Спецвипуск. Ч.2. – Тернопіль: ТНТУ. – 2011.– С. 164–172.
202. Попович П. Формирование расчетных оценок нагруженности машиностроительных металлоконструкций // Попович П., Сикорский С. Цьонь О./Научные чтения им. И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН. – 2012. – С. 195 – 197.
203. Попович П.В. Аналітичні залежності взаємодії твердих органічних добрив з вертикальними робочими органами розкидачів // Попович П.В. / Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей ЛНТУ. – Вип. 21, Том 2. – Луцьк. – 2011.– С.41 – 49.
204. Попович П.В. Комплексний аналіз надійності несучих систем тракторних причепів при їхній експлуатації / Попович П., Рибак Т. // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ, Вип. 93 Харків. – 2010. – С. 411 – 414.
205. Попович П.В. Напрямки досліджень корозійно – втомної довговічності металоконструкцій машин для внесення добрив / Попович П., Сташків М., Господарський Я. // Вісник ХНТУСГ. Випуск 134 . – Х.: Віровець А.П. «Апостроф». – 2013. – С. 227 – 233.
206. Попович П.В. Оцінка надійності машин для хімічного захисту в рослинництві // Попович П.В., Бабій А.В.,Хомик Н.І., Дутка А.М./Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей ЛНТУ. –Вип. 21 Том 2. Луцьк. – 2011. – С.31 – 36.
207. Попович П.В. Розрахункова модель модель для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії тривалого статичного навантаження і корозійного середовища // Попович П.В.,

- Добровольська Л.Н. /Вісник ТНТУ № 1(73). – Тернопіль: ТНТУ. –2014. – С. 179 – 186.
208. Попович П. Особливості корозійної та корозійно-втомної поведінки сталі 20 у водних середовищах мінеральних та органічних добрив / Павло Попович // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2014): у 2-х т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. № 10. – Т. 2. – С. 80 – 83.
209. Попович П. Надійність несучих металоконструкцій розкидачів органічних добрив // Попович П., Рибак Т., Бабій А., Цьонь О. /10 міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2011. – С. 360 – 361.
210. Попович П. Експериментальне забезпечення досліджень тріщиностійкості металоконструкцій несучих рам сільськогосподарських транспортних засобів // Попович П., Рибак Т., Сташків М. /9 міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2009. – С. 95 – 97.
211. Сташків М. Визначення КІН для кутової тріщини у швелерному профілі при дії бімоментів / Сташків М. Попович П. Підгурський М. // Матеріали міжнародної конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування». – Тернопіль, 2009р. – С. 296 - 302.
212. Похмурский В. И., Хома М.С. Коррозійна втома металів і сплавів. – Львів: Споллом. – 2008. – 299 с.
213. Похмурский В.И. Коррозионная усталость металлов / В.И. Похмурский. – М.: Металлургияю. – 1985. – 206 с.
214. Похмурський В.І. Корозійна втома корозійнотривких сталей і сплавів та їх зварних з'єднань / В.І. Похмурський, М.С. Хома / Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К.: Наук. думка. – 1998. – С. 604–619.
215. Похмурський В.І. Корозійна втома металів та сплавів / В.І. Похмурський, М.С. Хома. – Львів: СПОЛОМ.– 2008. – 384 с.

216. Почтенный Е. Вероятностная оценка долговечности рам транспортных средств: оперативно – информационные материалы / Е.Почтенный, А. Журавель, К.Щурин // – Минск. – 1985. – 39с.
217. Почтенный Е. Метод анализа полуциклов напряжений // Вестник машиностроения. – 1975. – №10. С6–8.
218. Почтенный Е.К., Минюкович С.М., Шмелев А.В. Оценка ресурса конструкций по сопротивлению усталости при типовых режимах эксплуатации в условиях случайного многочастотного нагружения // Вестник машиностроения. – 2006. – № 8. – С. 13–19.
219. Практикум по электрохимии / Под ред. Б.Б. Дамаскина. – М.: Высшая школа. – 1991. – 288 с.
220. Проблема хранения сельхозтехники (техника для внесения удобрений) <http://agrosev.narod.ru/page149itemid3124number103.htm>.
221. Проскуряков В.Д. Динамика и прочность рам и корпусов транспортных машин. –Л.: Машиностроение. – 1972. – 232с.
222. Пучин Е.А. Хранение и противокоррозионная защита сельскохозяйственной техники: учебно-методическое пособие / Е.А. Пучин, С.М.Гайдар // – М.: ФГНУ Росинформагротех. – 2011. – 512с.
223. Райченко А.И. Математическая теория диффузии в приложениях. – К.: Наук. думка. – 1981. – 396с.
224. Ратыч Л.В. Коррозионная трещиностойкость конструкционных материалов: состояние и перспективы развития исследований // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – №5. – С. 6–16.
225. РД 22-82-81. Методические указания по проведению обследования металлоконструкций. – М.: ВНИИСТРОЙДОРМАШ. – 1983. – 52 с.
226. РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. – М: Издательство стандартов. – 1991. – 84 с.
227. Реферативный журнал сельское хозяйство, механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – Ч.2. – 128с.

228. Решетов Д.Н. Надежность машин // Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З./М.: ВШ. – 1988. – 238с.
229. Рибак Т. Відправна база критеріальних засад оцінки несучої здатності мобільної с/г техніки // Рибак Т, Попович П., Сташків М., Ферендюк О. / Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України. –Вип. 144. – Ч. 2.– Київ. – 2010. – С. 301 – 309.
230. Рибак Т.І. Підвищення надійності машин для хімічного захисту у рослинництві. – К.: Урожай. – 1986. – 104 с.
231. Рибак Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин. – ВАТ. ”ТВПК “ЗБРУЧ”. – 2003. – 332 с.
232. Рибак Т. Концепція пошукового конструювання мобільної техніки в АПК // Рибак Т. Попович П. Сташків М. / Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Випуск 39. – Кіровоград: КДТУ. – 2009. – С. 40 – 47.
233. Рибак Т. Моделювання міцності елементів металоконструкцій с/г машин при стендових випробуваннях//Рибак Т., Попович П., Цьонь О/Вісник ХНТУСГ. Вип. 122. – Харків: ХНТУСГ. – 2012.– С. 198–204.
234. Рибак Т. Оцінка несучої здатності і залишкової довговічності мобільних с/г машин // Т. Рибак, П.Попович. / Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми надійності машин та засобів механізації/г виробництва» – Харків. – 2008. – Вип. 69.–С. 18–23.
235. Рибак Т. Пат. України на корисну модель 48663, МПКА01М 7/00. Рама причіпного вентиляторного обприскувача // Рибак Т., Паламарчук П., Бабій А., Попович П., Матвіїшин А. /Пат. України на корисну модель 48663, МПКА01М 7/00. Від 25.03.2010 р. Заявл. 27.10.2009 р.; опубл. 25.03.2010 р. Бюл. №6. – 2010.
236. Рибак Т. Аналітичні напрямки структуризації процесу циклічної навантаженості мобільних сільськогосподарських машин // Т. Рибак,

- посівних машин [Текст] : монографія / М. І. Черновол, В. М. Сало, Ю. В. Мачок [та ін.] // Кіровоград. нац. техн. ун-т, М-во освіти і науки, молоді та спорту України. - Кіровоград : СПД ФОП Лисенко В. Ф., 2012. - 148 с.
244. Сало В.М. Визначення умови руху неперервного потоку рослинних решток по стеблевідводу сошника / В.М. Сало, О.Р. Лузан, П.Г. Лузан, С.Я. Гончарова // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. Праць - Кіровоград: КНТУ, 2012, вип. 25.
245. Сало В.М. Вибір напрямів вдосконалення сошників сівалок прямого посіву зернових культур / В.М. Сало, О.Р. Лузан // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.– Кіровоград: КНТУ, 2010, Вип. 40, Част. II.– С. 271 – 277.
246. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов./И.Л. Розенфельд // М.: Изд.-во АН СССР. 1961. – 372с.
247. Розенфельд И.Л. Ингибиторы атмосферной коррозии [Текст] / И. Л. Розенфельд В.П. Персианцева. –М.: Наука. – 1985. – 277 с.
248. Романив О. Н., Деев Н. А., Сорокинский И. С. О некоторых особенностях механизма зарождения усталостных трещин в высокопрочных низкоотпущенных сталях // Физ.–хим. механика материалов. – 1975. – №4. – С. 41 – 47.
249. Романив О. Н., Ярема С. Я., Никифорчин Г. Н., Махутов Н. А., Стадник М. М. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – К.: Наукова думка. – 1990. – 680 с.
250. Романив О.Н. О закономерностях роста трещин при коррозионной усталости сталей // Физико–химическая механика материалов. – 1980. – №3. – С. 14 – 29.
251. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н., Вольдемаров А.В. Коррозионно–циклическая трещиностойкость: закономерности формирования порогов и ресурсные возможности различных конструкционных сплавов // Физико–химическая механика материалов. – 1985. – №3. – С. 7 – 20.

252. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н., Цирульник А.Т. Об ингибиторной защите высокопрочных сталей от коррозионного растрескивания на стадии распространения трещины // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1981. – №1. – С.46 – 53.
253. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н., Цирульник А.Т. О влиянии состава коррозионной среды на развитие трещин в высокопрочной стали с мартенситной структурой // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – №2. – С. 3 – 10.
254. http://www.agrosev.narod.ru/page_149_itemid_3124_number_103.htm
255. Романив О.Н., Ткач А.Н. Структурный анализ кинетических диаграмм усталостного разрушения конструкционных сталей // Физико-химическая механика материалов. – 1987. – №5. – С. 3 – 16.
256. РТМ 23.2.54–75. Рамы сварные с/х машин. Конструкторско-технологические проектирование. – М.: ВИСХОМ. – 1975. – 82 с.
257. РТМ 23.2.75-82. Руководящий технический материал. Рамы сварные сельскохозяйственных машин. Конструкторско-технологическое проектирование. – М. ВИСХОМ. – 1982. – 112 с.
258. Рудицин М.Н. Артемов П.Я., Любошиц М.И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. – Минск: Высшейш. школа. – 1970. – 630 с.
259. Русанов О.А. Расчетный анализ напряженного состояния и оценка прочности несущих систем тракторов: дис. д-ра техн. наук: 01.02.06, 05.05.03. – М.–2009. – 347с.
260. Рыбак Т.І. Методи проектування с/г машин. Методичні вказівки для виконання РГР. – Тернопіль.: ТНТУ. – 2008. – 34 с.
261. Рыбак Т.И. Экспериментальное определение динамических реакций в опорах масс на основании мобильных и стационарных машин. – М.: Наука. – 1982. – 30 с.
262. Рыбак Т. Оценка несущей способности и остаточной долговечности металлоконструкций в машиностроении // Рыбак Т., Попович П., Мотрук С./ Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-

- Петербург, 13-15 апреля 2010 г.: сборник материалов. – Ч. 1. – СПб.– 2010. – С. 330
263. Рыбак Т.И. Методы оценки несущей способности и долговечности машин для химической защиты в растениеводстве. – К.: Наукова думка.– 1985. – 232 с.
264. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка. – 1968. – 887с.
265. Саврук М.П. Двухмерные задачи упругости для тел с трещинами. – Киев: Наук. думка. – 1981. – 323с.
266. . Ріпецький Є.Й. Наукова концепція проектування сільськогосподарських грейферних навантажувачів [Текст] / Є.Й. Ріпецький // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць: – Львів: Вид-во РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.13. – С. 127 – 131.
267. Ріпецький, Є.Й. Вплив пружності опор несучої рами на її завантаженість [Текст] / Є.Й. Ріпецький // Вісник ХНТУ «Проблеми технічної експлуатації машин». – Харків. – 2011. – Вип. 109. – С. 204 – 210.
268. Ріпецький, Є.Й. Автоматизований розрахунок стійкості грейферних навантажувачів на основі просторового аналізу [Текст] / Є.Й. Ріпецький // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. – Львів: Вид-во РВВ НЛТУ України, 2011. – Вип. 21.4. – С. 323 – 329.
269. Севернев М. Износ деталей сельскохозяйственных машин / М. Севернев, Г. Каплун, В. Короткевич и др. // –Л.: Колос. – 1972. – 288 с.
270. Севернев М.М. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М.М. Севернев, Н.Н. Подлекарев, В.Ш. Сохадзе, В.О. Китиков // Беларус. навука. – Минск – 2011. – 333 с.
271. Севернев М.М. Долговечность и работоспособность сельскохозяйственных машин / М.М.Севернев // В кн. вопросы сельскохозяйственной механики.– Т.Х. – Минск: Сельхозгиз БССР. – 1963. – 145 с.

272. Севернев М.М., Коротков В.А. Износостойкие наплавочные материалы и высокопроизводительные методы их обработки. – М.: Машиностроение. – 1992. – 224 с.
273. Северный А.Э. Справочник по хранению сельскохозяйственной техники/ А.Э. Северный, А.Ф. Поцкалев, А.Л. Новиков // – М.: Колос. – 1984: – 223 с.
274. Северный А.Э. Комплексное решение проблемы сохраняемости и защита от коррозии сельскохозяйственной техники // Труды ГОСНИТИ. – Т.80 (1987). – С.96–106
275. Северный А.Э. Сохраняемость и защита от коррозии сельскохозяйственной техники [Текст] / А.Э. Северный. – М.: ГОСНИТИ. – 1993. – 234 с.
276. Северный А.Э. Система рационального хранения сельскохозяйственной техники : дисс. докт. техн. наук.: Северный А.Э.–М. – 1988. – 461с.
277. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. Учеб. пос. для вузов. М.: Атомиздат. – 1975. – 192 с.
278. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения / Пер. с японск. – М.: Мир. – 1986. – 334с.
279. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия.– Ленинград: Химия. – 1974. – 568с.
280. Смирнов П.М. Агрохимия. – 3-е изд., Перераб. і доп. / Смирнов П.М., З.А.Муравин // – М: Агропромиздат. – 1991. – 288с.
281. Снеддон И. Преобразование Фурье. – М.: ИЛ. – 1966. – 667с.
282. СНиП II-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования. М.: Стройиздат. – 1982. – 96 с.
283. Сопротивление материалов /Под редакцией Писаренко Г.С. / К.: Высшая школа.– 1988. – 224 с.
284. Сохраняемость и противокоррозионная защита техники: в сельском хозяйстве //В.И.Черноиванов/ – М.:ГОСНИТИ.– 2009. – 240 с.

285. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под. ред. Мураками. – М.: Мир. – 1990. – Т.1, 2. – 1016с.
286. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / За ред. В.І.Кравчука, М.І.Грицишина, С. М. Ковалю. – К.: Аграрна наука. – 2004.– 396 с.
287. Т. Рибак. лаяційних таблиць для систематизації динамічних напружень в елементах несучих конструкцій мобільних сільськогосподарських машин // Т. Рибак, В.Парацій, П.Попович, А. Довбуш / Загальнодержавний міжвідомчий науково – технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Випуск 28. – Кіровоград: КДТУ. – 1999. – С. 158 – 164.
288. Тензометрические исследования корнеуборочной машины КС-6. Отчет № 3–74–1. Украинская государственная зональная машиностроительная станция. – 1974. – 68 с.
289. Тензорезисторы. Техническое описание и инструкция по наклейке. – К.: ООО “Веда”. – 2005. – 21 с.
290. Терренен К., Ганнинен Н., Кемпайнен М. Рост трещин в употребляемых на АЭС материалах и автоклавное устройство для его измерения. М. – 1982. – 41 с.
291. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. – Ч. 1, 2. – М. – 1965.
292. Тимяк Н.І, Андрейків А.Е. Визначення швидкості росту тріщин в умовах сумісної дії статичних навантажень і корозійно активного середовища // Фізико–хімічна механіка матеріалів. – 1995. – 2. – С.68–74.
293. Токарева М.А., Рассоха В.И., Филиппов В.Ю. К вопросу оценки напряженно–деформированого состояния рамных металлоконструкций мобильных машин // Контроль. Диагностика, 1999. – № 11. С. 7–11.
294. Токарева М.А., Чепасов В.И. Моделирование статического нагружения несущих конструкций мобильных машин расчетным методом // Техника в сельском хозяйстве. – 2002. – № 3. – С. 28–31.

295. Томашов Н.Д. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов / Н.Д. Томашов, П.Н. Жук, В.А.Титов, М.А. Веденева. – М.: Металлургия. – 1971. – 280 с.
296. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов/ Н.Д. Томашов // М.: Изд.-во АН СССР.–1966. – 321с.
297. Томашов Н.Д., Михайловский Ю.Н. Исследование кинетики электродных процессов под адсорбционными пленками влаги/ Н.Д.Томашов, Ю.Н. Михайловский // – Докл. АН СССР. – 1956.Т.110. – №6.–С. 1026–1029.
298. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при малоцикловом нагружении.– К.: Наукова думка. – 1981.–343 с.
299. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней/ Г.Г. Улиг // – Л.: Химия. – 1989. – 455 с.
300. Уманский А.А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций // Техника воздушного флот. – 1940. – № 12. – С. 8–12.
301. Упрочнение стали механической обработкой / Карпенко Г.В., Бабей Ю.И., Карпенко И.В., Гутман Э.М. –Киев: Наук. думка, – 1966. – 204 с.
302. Уфлянд Я.С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. – Л.: Наука, – 1968. – 402с.
303. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. – М.: Наука, – 1986. – 512 с.
304. Фокин М.Н. Методы коррозионных испытаний металлов / М.Н. Фокин, К.А. Жигалова // Под ред. Колотыркина. – М.– 1986. – 80 с.
305. Фрейман Л.И. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / Л.И. Фрейман, В.А. Макаров, И.Е. Брыскин // – Л.: Химия. – 1972. – 340 с.
306. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: в 2-х т. / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение. – 1972. – Т. 2. – 368 с.
307. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. – К.: НМК ВО, – 1991. – 200 с.

308. Хоббахер А.Ф. Расчет на усталость сварных конструкций по напряжениям // Автоматическая сварка, – 2003. – № 10–11. – С. 122–126.
309. Ценюх Я. Тенденції розвитку конструкцій розкидачів мінеральних добрив// Я. Ценюх, О. Ковальчук/ Збірник наукових праць. УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого.– Дослідницьке. – 2009. – Вип. 13 (27), кн.2.– С. 44–48.
310. Черепанов Г.П. О распространении трещин в сплошной среде // Прикладная математика и механика. – 1967. – Т. 31. – №3. – С. 476–488.
311. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения.– М.: Наука.– 1974.–640 с.
312. Черников С.А., Садчиков К.В. О достоверности расчетных оценок напряженно - деформированного состояния рамы грузового автомобиля / Проблемы машиностроения и надежность машин.–1998. – № 3. – С. 117–121.
313. Шата М.М, Терлецька З.О Енергетичний підхід у механіці втомного поширення макротріщини // Механіка руйнування і міцність конструкцій / під.ред. В.В. Панасюка – Львів: Каменяр. – 1999. – Т. 2. – С. 141–148.
314. Швабюк В.И. Предельное равновесие трансверсально-изотропной сферической оболочки с двумя поверхностными трещинами / М.М. Николишин, В.И. Швабюк, Ю.П. Фещук // Приклад. механика. – 2009. – 45.– № 4. – С. 109–115.
315. Швабюк В.І. Згин круглої трансропної плити, послабленої дископодібною внутрішньою тріщиною / В. І. Швабюк, С. В. Ротко, А. В. Маткова, В.О. Ротко // Ресурсоеконом. матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 24. – С. 300–307.
316. Швабюк В.І. Опір матеріалів: навч. посіб. / В. І. Швабюк. – К.: Знання. – 2009. – 380 с.
317. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. – М.: Металлургия. – 1978. – 304с.
318. Щурин К.В. Прогнозирование и повышение усталостной долговечности несущих систем сельськохозяйственных тракторных средств / Диссерт. докт. техн. наук. – Оренбург: ОПИ. – 1994. – 423с.

319. Ярема С. Я. Стадийность усталостного разрушения и ее следствия // Физ.-хим. механика материалов. – 1973. – №6. – С. 66–72.
320. Ярема С.Я. Методология определения характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкости) материалов при циклическом нагружении // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – Т. 17. № 4. – С. 100–110.
321. Ясній П. В., Пиндус Ю. І. Методологія оцінки втомної довговічності елементів конструкцій машин за експлуатаційного навантаження // Праці I-ї Міжнародної н.-т. конф. «Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин» – Тернопіль, ТДТУ ім. Івана Пулюя.–2004. – С.73–87.
322. Ясній П. В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиноотривкість. – Львів: Світ, 1998. — 292 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТАРУВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ

Розмір балки: $b := 8\text{mm}$ $h := 19\text{mm}$

Момент опору перетину балки $W := \frac{b \cdot h^2}{6}$ $W = 4.813 \times 10^{-7} \cdot \text{m}^3$

Коефіцієнт підсилення тарувального столу $K := 50$

Відстань між опорами $L_{\text{op}} := 160\text{mm}$

Відстань між прикладеними силами $L_{\text{sil}} := 70\text{mm}$

$\text{ORIGIN} := 1$ $n := 7$ $i := 1..n$

Acceleration $m := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \text{kg}$

Момент з одного боку балки $M := K \cdot m \cdot g \cdot \left(\frac{L_{\text{op}} - L_{\text{sil}}}{2} \right)$ $M = \begin{pmatrix} 0 \\ 22.065 \\ 44.13 \\ 66.195 \\ 88.26 \\ 110.325 \\ 132.39 \end{pmatrix} \text{m} \cdot \text{N}$

$\text{MPa} := 10^6 \text{Pa}$

Напруження $\sigma := \frac{M}{W}$ $\sigma = \begin{pmatrix} 0 \\ 45.841 \\ 91.683 \\ 137.524 \\ 183.365 \\ 229.207 \\ 275.048 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$

точ := 1

Ряд1 := $\begin{pmatrix} 2040 \\ 2106 \\ 2179 \\ 2254 \\ 2312 \\ 2372 \\ 2419 \end{pmatrix} \text{точ}$

Ряд2 := $\begin{pmatrix} 1982 \\ 1962 \\ 1895.5 \\ 1811.5 \\ 1777 \\ 1676 \\ 1589.5 \end{pmatrix} \text{точ}$

A 1

Коефіцієнт підсилення по апаратурі при таруванні

$$k_{PA} := 1 \frac{64}{4}$$

Коефіцієнт тарування

$$k_{T1_i} := \frac{\sigma_i \cdot k_{PA}}{Ряд1_i}$$

$$k_{T1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.348 \\ 0.673 \\ 0.976 \\ 1.269 \\ 1.546 \\ 1.819 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{MPa}}{\text{точ}}$$

$$k_{T2_i} := \frac{\sigma_i \cdot k_{PA}}{Ряд2_i}$$

$$k_{T2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.374 \\ 0.774 \\ 1.215 \\ 1.651 \\ 2.188 \\ 2.769 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{MPa}}{\text{точ}}$$

$$R1_i := \frac{Ряд1_i}{k_{PA}} \cdot k_{T1_i}$$

$$R1_i =$$

0
45.841
91.683
137.524
183.365
229.207
275.048

·MPa

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 \\ 45.841 \\ 91.683 \\ 137.524 \\ 183.365 \\ 229.207 \\ 275.048 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$R2_i := \frac{Ряд2_i}{k_{PA}} \cdot k_{T2_i}$$

$$R2_i =$$

$i := 1..n - 1$

0
45.841
91.683
137.524
183.365
229.207
275.048

·MPa

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 \\ 45.841 \\ 91.683 \\ 137.524 \\ 183.365 \\ 229.207 \\ 275.048 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

A 2

$$\text{Ряд1}_{i+1} - \text{Ряд1}_i =$$

66
73
75
58
60
47

$$\text{Ряд2}_{i+1} - \text{Ряд2}_i =$$

-20
-66.5
-84
-34.5
-101
-86.5

$$\frac{\sum_i (\text{Ряд1}_{i+1} - \text{Ряд1}_i)}{n-1} = 63.167$$

$$\frac{-\left[\sum_i (\text{Ряд2}_{i+1} - \text{Ряд2}_i)\right]}{n-1} = 65.417$$

$$\text{Prurist} := \frac{\frac{\sum_i (\text{Ряд1}_{i+1} - \text{Ряд1}_i)}{n-1} + \frac{-\left[\sum_i (\text{Ряд2}_{i+1} - \text{Ряд2}_i)\right]}{n-1}}{2} \cdot \text{точ} \quad \text{Prurist} = 64.292 \cdot \text{точ}$$

$$\text{Ряд}_i := 2048 + (i-1) \cdot \text{Prurist}$$

$$\text{Ряд}_i =$$

$2.048 \cdot 10^3$
$2.112 \cdot 10^3$
$2.177 \cdot 10^3$
$2.241 \cdot 10^3$
$2.305 \cdot 10^3$
$2.369 \cdot 10^3$

$$\text{Ряд}_i - \text{Ряд1}_i =$$

8
6.292
-2.417
-13.125
-6.833
-2.542

$$\text{Ряд1} = \begin{pmatrix} 2.04 \times 10^3 \\ 2.106 \times 10^3 \\ 2.179 \times 10^3 \\ 2.254 \times 10^3 \\ 2.312 \times 10^3 \\ 2.372 \times 10^3 \\ 2.419 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$\text{Ряд2} = \begin{pmatrix} 1.982 \times 10^3 \\ 1.962 \times 10^3 \\ 1.896 \times 10^3 \\ 1.812 \times 10^3 \\ 1.777 \times 10^3 \\ 1.676 \times 10^3 \\ 1.589 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

A 3

$$k_T := \frac{\sigma_2}{Pr_{urist}} \cdot k_{PA}$$

$$k_T = 11.408 \cdot \frac{\text{MPa}}{\text{точ}}$$

$$\frac{\text{Ряд}_i - 2048}{k_{PA}} \cdot k_T =$$

0	·MPa
45.841	
91.683	
137.524	
183.365	
229.207	

$$\sigma_i =$$

0	·MPa
45.841	
91.683	
137.524	
183.365	
229.207	

$$\frac{\text{Ряд}_i - 2048}{k_{PA}} \cdot k_T - \sigma_i =$$

0	·MPa
-1.118·10 ⁻¹³	
8.941·10 ⁻¹⁴	
-2.98·10 ⁻¹⁴	
-1.192·10 ⁻¹³	
8.941·10 ⁻¹⁴	

$$i := 1..n - 2$$

Коефіцієнт тарування

$$k_{T_i} := \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\text{Ряд}_{i+1} - \text{Ряд}_i} \cdot k_{PA}$$

$$k_{T_i} =$$

11.408	·MPa
11.408	точ
11.408	
11.408	
11.408	

Додаток Б

ОБЧИСЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ СИЛОВИХ ФАКТОРІВ У НЕСУЧІЙ СИСТЕМІ
РОЗКИДАЧА ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРІВ ПРТ – 10

Syms m1 m2 k1 k2 q1 q2 x

r1=22060

r2=41470

q=4102

e=2*100000000000

g=8*10000000000

ix1=1.82*1000000/e

ik1=477750/g

ix2=821528/e

ik2=526436/g

ix3=2.1*1000000/e

ik3=1255/gr1 = 22060

r2 =

41470

q =

4102

e =

2.0000e+011

Б 1

 $g =$

8.0000e+010

 $ix1 =$

9.1000e-006

 $ik1 =$

5.9719e-006

 $ix2 =$

4.1076e-006

 $ik2 =$

6.5804e-006

 $ix3 =$

Б 2

1.0500e-005

ik3 =

1.5688e-008

$M1 = m1 - q1 * x - q * x * x / 2$

$UK1 = \text{int}((K1 * K1) / (2 * g * ik1), 0, 1.1)$

$UM1 = \text{int}((M1 * M1) / (2 * e * ix1), 0, 1.1)$

$K2 = m1 - q1 * 1.1 - q * 1.1 * 1.1 / 2$

$M2 = -k1 - q1 * x - 1.1 * q * x - 2 * q * x * x / 2$

$UK2 = \text{int}((K2 * K2) / (2 * g * ik3), 0, 1.66)$

$UM2 = \text{int}((M2 * M2) / (2 * e * ix3), 0, 1.66)$

$K3 = k2$

$M3 = m2 - q2 * x$

$UK3 = \text{int}((K3 * K3) / (2 * g * ik2), 0, 1.1)$

$UM3 = \text{int}((M3 * M3) / (2 * e * ix2), 0, 1.1)$

$K4 = m1 - q1 * 1.1 - q * 1.1 * 1.1 / 2 + m2 - q2 * 1.1$

$M4 = -k1 - q1 * 1.66 - q1 * x - 1.1 * q * 1.66 - 2 * q * 1.66 * 1.66 / 2 - 1.1 * q * x - 2 * q * x * x / 2 - k2 - q2 * x$

Б 3

$$UK4 = \text{int}((K4 * K4) / (2 * g * ik3), 0, 0.285)$$

$$UM4 = \text{int}((M4 * M4) / (2 * e * ix3), 0, 0.285)$$

$$K5 = m1 - q1 * 1.1 - q * 1.1 * 1.1 / 2 + m2 - q2 * 1.1$$

$$M5 = -k1 - k2 - q1 * 1.945 - q1 * x - 1.1 * q * 1.945 - 1.1 * q * x - 2 * q * 1.945 * 1.945 / 2 - 2 * q * x * x / 2 - q2 * 0.285 - q2 * x + r2 * x$$

$$UK5 = \text{int}((K5 * K5) / (2 * g * ik3), 0, 3.335)$$

$$UM5 = \text{int}((M5 * M5) / (2 * e * ix3), 0, 3.335)$$

$$K6 = -k1 - q * 1.1 * 5.3 - q1 * 5.3 - 2 * q * 5.3 * 5.3 / 2 + r2 * 3.355 - k2 - q2 * 3.64$$

$$M6 = -m1 - m2 + q1 * 1.1 + q2 * 1.1 - q1 * x - q2 * x + q * 1.1 * 1.1 / 2 - 2 * q * 5.3 * x - q * 1.1 * x + r2 * x - q * x * x / 2$$

$$UK6 = \text{int}((K6 * K6) / (2 * g * ik1), 0, 1.1)$$

$$UM6 = \text{int}((M6 * M6) / (2 * e * ix1), 0, 1.1)$$

$$K1 =$$

$$k1$$

$$M1 =$$

$$- 2051 * x^2 - q1 * x + m1$$

$$UK1 =$$

Б 4

1331/2866500000

UM1 =

$$\begin{aligned} & (11811160064*m1^2)/39084202393599995 - (64961380352*m1*q1)/195421011967999975 - \\ & (1465593702121472*m1)/2931315179519999625 + (357287591936*q1^2)/2931315179519999625 + \\ & (2015191340417024*q1)/4885525299199999375 + 45464731831148478464/122138132479999984375 \end{aligned}$$

K2 =

$$m1 - (11*q1)/10 - 5457338003535955/2199023255552$$

M2 =

$$-k1 - (22561*x)/5 - q1*x - 4102*x^2$$

UK2 =

$$\begin{aligned} & (83*(m1 - 5457338003535955/2199023255552)^2)/125500 - (75779*m1)/62750000 + \\ & 155119891744265900149951/5174576598220800000000 \end{aligned}$$

UM2 =

$$\begin{aligned} & (83*k1^2)/210000000 + (6889*k1*q1)/10500000000 + (668115887*k1)/112500000000 + \\ & (571787*q1^2)/157500000000 + (78573254179*q1)/1125000000000 + \\ & 48125868392053319/140625000000000 \end{aligned}$$

Б 5

K3 =

k2

M3 =

$m2 - q2*x$

UK3 =

1331/3158616000

UM3 =

$(23622320128*m2^2)/35284358927482875 - (129922760704*m2*q2)/176421794637414375 + (714575183872*q2^2)/2646326919561215625$

K4 =

$m1 + m2 - (11*q1)/10 - (11*q2)/10 - 5457338003535955/2199023255552$

M4 =

Б 6

$$-k_1 - k_2 - (83 \cdot q_1)/50 - (22561 \cdot x)/5 - q_1 \cdot x - q_2 \cdot x - 4102 \cdot x^2 - 10331958593801787/549755813888$$

UK4 =

$$(393129 \cdot q_2)/10040000000 - (35739 \cdot m_2)/1004000000 - (35739 \cdot m_1)/1004000000 + (57 \cdot (m_1 + m_2 - (11 \cdot q_2)/10 - 5457338003535955/219902325552)^2)/502000 + 24381001957074887351997/275977418571776000000000$$

UM4 =

$$(6029061 \cdot k_1)/400000000000 + (6029061 \cdot k_2)/400000000000 + (9037562439 \cdot q_1)/32000000000000 + (1030969431 \cdot q_2)/32000000000000 + (1083 \cdot (q_1 + q_2 + 22561/5) \cdot (k_1 + k_2 + (83 \cdot q_1)/50 + 10331958593801787/549755813888))/56000000000 + (20577 \cdot (q_1 + q_2 + 22561/5)^2)/1120000000000 + (19 \cdot (k_1 + k_2 + (83 \cdot q_1)/50 + 10331958593801787/549755813888)^2)/280000000 + 205687816278083269234104339/68719476736000000000000000$$

K5 =

$$m_1 + m_2 - (11 \cdot q_1)/10 - (11 \cdot q_2)/10 - 5457338003535955/219902325552$$

M5 =

$$(184789 \cdot x)/5 - k_2 - (389 \cdot q_1)/200 - (57 \cdot q_2)/200 - k_1 - q_1 \cdot x - q_2 \cdot x - 4102 \cdot x^2 - 13355876346856107/549755813888$$

Б 7

UK5 =

$$(53831569*q2)/1004000000 - (4893779*m2)/1004000000 - (4893779*m1)/1004000000 + (667*(m1 + m2 - (11*q2)/10 - 5457338003535955/219902325552)^2)/502000 + 10020062129958564581777231/827932255715328000000000$$

UM5 =

$$(86945102159*k1)/360000000000 + (86945102159*k2)/360000000000 + (309263728379563*q1)/288000000000000 + (64600210904137*q2)/96000000000000 + (667*(k1 + k2 + (389*q1)/200 + (57*q2)/200 + 13355876346856107/549755813888)^2)/840000000 + (296740963*(q1 + q2 - 184789/5)^2)/10080000000000 + (444889*(q1 + q2 - 184789/5)*(k1 + k2 + (389*q1)/200 + (57*q2)/200 + 13355876346856107/549755813888))/168000000000 - 2711547938189953242841210015933/20615843020800000000000000$$

K6 =

$$- k1 - k2 - (53*q1)/10 - (91*q2)/25 - 34316788695/4294967296$$

M6 =

$$(11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 - (2241423172698111*x)/343597383680 - q1*x - q2*x - 2051*x^2 + 5457338003535955/219902325552$$

UK6 =

$$(6413*k1)/955500000 + (6413*k2)/955500000 + (6413*q2)/262500000 + (11*(k1 + k2 + (91*q2)/25 + 34316788695/4294967296)^2)/9555000 + 20520000825570521/30778809384960000000$$

Б 8

UM6 =

$$\begin{aligned} & (1465593702121472*m1)/2931315179519999625 + (1465593702121472*m2)/2931315179519999625 - \\ & (2015191340417024*q1)/14656575897599998125 - (2015191340417024*q2)/14656575897599998125 + \\ & (11811160064*((11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 + \\ & 5457338003535955/2199023255552)^2)/39084202393599995 + (357287591936*(q1 + q2 + \\ & 2241423172698111/343597383680)^2)/2931315179519999625 - (64961380352*(q1 + q2 + \\ & 2241423172698111/343597383680)*((11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 + \\ & 5457338003535955/2199023255552))/195421011967999975 + \\ & 2734855440128783147108317/1500833371914239808000000 \end{aligned}$$

K7=k1

$$M7=m1-q1*x-q*x*x/2$$

$$UK7=\text{int}((K7*K7)/(2*g*ik1),0,1.1)$$

$$UM7=\text{int}((M7*M7)/(2*e*ix1),0,1.1)$$

$$K8=m1-q1*1.1-q*1.1*1.1/2$$

$$M8=-k1-q1*x-1.1*q*x-2*q*x*x/2$$

$$UK8=\text{int}((K8*K8)/(2*g*ik3),0,1.66)$$

$$UM8=\text{int}((M8*M8)/(2*e*ix3),0,1.66)$$

K9=k2

$$M9=m2-q2*x$$

$$UK9=\text{int}((K9*K9)/(2*g*ik2),0,1.1)$$

$$UM9=\text{int}((M9*M9)/(2*e*ix2),0,1.1)$$

Б 9

$$K10=m1-q1*1.1-q*1.1*1.1/2+m2-q2*1.1$$

$$M10=-k1-q1*1.66-q1*x-1.1*q*1.66-2*q*1.66*1.66/2-1.1*q*x-2*q*x*x/2-k2-q2*x$$

$$UK10=int((K10*K10)/(2*g*ik3),0,0.285)$$

$$UM10=int((M10*M10)/(2*e*ix3),0,0.285)$$

$$K11=m1-q1*1.1-q*1.1*1.1/2+m2-q2*1.1$$

$$M11=-k1-k2-q1*1.945-q1*x-1.1*q*1.945-1.1*q*x-2*q*1.945*1.945/2-2*q*x*x/2-q2*0.285-q2*x+r2*x$$

$$UK11=int((K11*K11)/(2*g*ik3),0,3.335)$$

$$UM11=int((M11*M11)/(2*e*ix3),0,3.335)$$

$$K12=-k1-q*1.1*5.3-q1*5.3-2*q*5.3*5.3/2+r2*3.355-k2-q2*3.64$$

$$M12=-m1-m2+q1*1.1+q2*1.1-q1*x-q2*x+q*1.1*1.1/2-2*q*5.3*x-q*1.1*x+r2*x-q*x*x/2$$

$$UK12=int((K12*K12)/(2*g*ik1),0,1.1)$$

$$UM12=int((M12*M12)/(2*e*ix1),0,1.1)$$

$$K7 =$$

$$k1$$

$$M7 =$$

$$- 2051*x^2 - q1*x + m1$$

$$UK7 =$$

Б 10

1331/2866500000

UM7 =

$$\begin{aligned} & (11811160064*m1^2)/39084202393599995 - (64961380352*m1*q1)/195421011967999975 - \\ & (1465593702121472*m1)/2931315179519999625 + (357287591936*q1^2)/2931315179519999625 + \\ & (2015191340417024*q1)/4885525299199999375 + 45464731831148478464/122138132479999984375 \end{aligned}$$

K8 =

$$m1 - (11*q1)/10 - 5457338003535955/2199023255552$$

M8 =

$$- k1 - (22561*x)/5 - q1*x - 4102*x^2$$

UK8 =

$$\begin{aligned} & (83*(m1 - 5457338003535955/2199023255552)^2)/125500 - (75779*m1)/62750000 + \\ & 155119891744265900149951/5174576598220800000000 \end{aligned}$$

UM8 =

B 11

$$(83*k1^2)/210000000 + (6889*k1*q1)/10500000000 + (668115887*k1)/112500000000 +$$

$$(571787*q1^2)/1575000000000 + (78573254179*q1)/11250000000000 +$$

$$48125868392053319/1406250000000000$$

$$K9 =$$

$$k2$$

$$M9 =$$

$$m2 - q2*x$$

$$UK9 =$$

$$1331/3158616000$$

$$UM9 =$$

$$(23622320128*m2^2)/35284358927482875 - (129922760704*m2*q2)/176421794637414375 +$$

$$(714575183872*q2^2)/2646326919561215625$$

$$K10 =$$

$$m1 + m2 - (11*q1)/10 - (11*q2)/10 - 5457338003535955/2199023255552$$

Б 12

$$-k_1 - k_2 - (83 \cdot q_1)/50 - (22561 \cdot x)/5 - q_1 \cdot x - q_2 \cdot x - 4102 \cdot x^2 - 10331958593801787/549755813888$$

UK10 =

$$(393129 \cdot q_2)/10040000000 - (35739 \cdot m_2)/1004000000 - (35739 \cdot m_1)/1004000000 + (57 \cdot (m_1 + m_2 - (11 \cdot q_2)/10 - 5457338003535955/219902325552)^2)/502000 + 24381001957074887351997/275977418571776000000000$$

UM10 =

$$(6029061 \cdot k_1)/400000000000 + (6029061 \cdot k_2)/400000000000 + (9037562439 \cdot q_1)/32000000000000 + (1030969431 \cdot q_2)/32000000000000 + (1083 \cdot (q_1 + q_2 + 22561/5) \cdot (k_1 + k_2 + (83 \cdot q_1)/50 + 10331958593801787/549755813888))/56000000000 + (20577 \cdot (q_1 + q_2 + 22561/5)^2)/1120000000000 + (19 \cdot (k_1 + k_2 + (83 \cdot q_1)/50 + 10331958593801787/549755813888)^2)/280000000 + 205687816278083269234104339/687194767360000000000000000$$

K11 =

$$m_1 + m_2 - (11 \cdot q_1)/10 - (11 \cdot q_2)/10 - 5457338003535955/219902325552$$

M11 =

$$(184789 \cdot x)/5 - k_2 - (389 \cdot q_1)/200 - (57 \cdot q_2)/200 - k_1 - q_1 \cdot x - q_2 \cdot x - 4102 \cdot x^2 - 13355876346856107/549755813888$$

Б 13

$$(53831569*q_2)/10040000000 - (4893779*m_2)/1004000000 - (4893779*m_1)/1004000000 + (667*(m_1 + m_2 - (11*q_2)/10 - 5457338003535955/2199023255552)^2)/502000 + 10020062129958564581777231/827932255715328000000000$$

UM11 =

$$(86945102159*k_1)/3600000000000 + (86945102159*k_2)/3600000000000 + (309263728379563*q_1)/2880000000000000 + (64600210904137*q_2)/9600000000000000 + (667*(k_1 + k_2 + (389*q_1)/200 + (57*q_2)/200 + 13355876346856107/549755813888)^2)/8400000000 + (296740963*(q_1 + q_2 - 184789/5)^2)/100800000000000 + (444889*(q_1 + q_2 - 184789/5)*(k_1 + k_2 + (389*q_1)/200 + (57*q_2)/200 + 13355876346856107/549755813888))/168000000000 - 2711547938189953242841210015933/2061584302080000000000000000$$

K12 =

$$- k_1 - k_2 - (53*q_1)/10 - (91*q_2)/25 - 34316788695/4294967296$$

M12 =

$$(11*q_1)/10 - m_2 - m_1 + (11*q_2)/10 - (2241423172698111*x)/343597383680 - q_1*x - q_2*x - 2051*x^2 + 5457338003535955/2199023255552$$

UK12 =

$$(6413*k_1)/955500000 + (6413*k_2)/955500000 + (6413*q_2)/262500000 + (11*(k_1 + k_2 + (91*q_2)/25 + 34316788695/4294967296)^2)/9555000 + 20520000825570521/307788093849600000000$$

Б 14

UM12 =

$$\begin{aligned} & (1465593702121472*m1)/2931315179519999625 + (1465593702121472*m2)/2931315179519999625 - \\ & (2015191340417024*q1)/14656575897599998125 - (2015191340417024*q2)/14656575897599998125 + \\ & (11811160064*((11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 + \\ & 5457338003535955/2199023255552)^2)/39084202393599995 + (357287591936*(q1 + q2 + \\ & 2241423172698111/343597383680)^2)/2931315179519999625 - (64961380352*(q1 + q2 + \\ & 2241423172698111/343597383680)*((11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 + \\ & 5457338003535955/2199023255552))/195421011967999975 + \\ & 2734855440128783147108317/1500833371914239808000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & >> UU=(UK1+UK2+UK3+UK5+UK6+ UK7+UK8+UK9+UK10+UK11+ UK12+ \\ & UM7+UM1+UM2+UM3+UM4+UM5+ UM6+UM7+UM8+UM9+UM10+UM11+UM12) \end{aligned}$$

$$UK= (UK1+UK2+UK3+ UK4+UK5+UK6+ UK7+UK8+UK9+UK10+UK11+ UK12)$$

UU =

$$\begin{aligned} & (5754405010217*k1)/95550000000000 + (13858496470499*k2)/28665000000000 - \\ & (3070991*m1)/251000000 - (51914059456748446493723*m2)/5886080880476159247000000 + \\ & (1290762760532886448327953924331*q1)/562812514467839928000000000000 + \\ & (95699270093795779884928079196049*q2)/659241058613329835664000000000000 + (1083*(q1 + q2 + \\ & 22561/5)*(k1 + k2 + (83*q1)/50 + 10331958593801787/549755813888))/28000000000 + \\ & (6889*k1*q1)/5250000000 - (129922760704*m1*q1)/195421011967999975 - \\ & (259845521408*m2*q2)/176421794637414375 + (11*(k1 + k2 + (91*q2)/25 + \\ & 34316788695/4294967296)^2)/4777500 + (23622320128*((11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 + \\ & 5457338003535955/2199023255552)^2)/39084202393599995 + (667*(k1 + k2 + (389*q1)/200 + \\ & (57*q2)/200 + 13355876346856107/549755813888)^2)/420000000 + (714575183872*(q1 + q2 + \\ & 2241423172698111/343597383680)^2)/2931315179519999625 + (20577*(q1 + q2 + \\ & 22561/5)^2)/560000000000 + (296740963*(q1 + q2 - 184789/5)^2)/50400000000000 + (83*(m1 - \\ & 5457338003535955/2199023255552)^2)/62750 - (129922760704*(q1 + q2 + \\ & 2241423172698111/343597383680)*((11*q1)/10 - m2 - m1 + (11*q2)/10 + \\ & 5457338003535955/2199023255552))/195421011967999975 + (444889*(q1 + q2 - 184789/5)*(k1 + k2 + \\ & (389*q1)/200 + (57*q2)/200 + 13355876346856107/549755813888))/84000000000 + \\ & (83*k1^2)/105000000 + (23622320128*m1^2)/39084202393599995 + \\ & (47244640256*m2^2)/35284358927482875 + \\ & (5970175652937072068213*q1^2)/6155761876991999212500000000 + \\ & (1429150367744*q2^2)/2646326919561215625 + (181*(m1 + m2 - (11*q2)/10 - \\ & 5457338003535955/2199023255552)^2)/62750 + (19*(k1 + k2 + (83*q1)/50 + \\ & 10331958593801787/549755813888)^2)/140000000 - \\ & 321308656602388260354392005017124863809223607478937896831/1271634665875559189437836037 \\ & 58967029760000000000000000 \end{aligned}$$

B 15

UK =

$$\begin{aligned} & (6413*k1)/477750000 + (6413*k2)/477750000 - (3070991*m1)/251000000 - (2464759*m2)/251000000 + \\ & (2859673949*q2)/263550000000 + (11*(k1 + k2 + (91*q2)/25 + 34316788695/4294967296)^2)/4777500 + \\ & (83*(m1 - 5457338003535955/2199023255552)^2)/62750 + (181*(m1 + m2 - (11*q2)/10 - \\ & 5457338003535955/2199023255552)^2)/62750 + \\ & 1581358975477853754457588313858341/52057233889825042464768000000000 \end{aligned}$$

DUUk1=diff(UU,k1)

DUUk2=diff(UU,k2)

DUUq1=diff(UU,q1)

DUUq2=diff(UU,q2)

DUUm1=diff(UU,m1)

DUUm2=diff(UU,m2)

DUKk1=diff(UK,k1)

DUKk2=diff(UK,k2)

DUKq1=diff(UK,q1)

DUKq2=diff(UK,q2)

DUKm1=diff(UK,m1)

DUKm2=diff(UK,m2)

DUUk1 =

$$\begin{aligned} & (5753*k1)/597187500 + (38471*k2)/4777500000 + (363*q1)/27343750 + (120761*q2)/5250000000 - \\ & 87067125737854291792967/1641536500531200000000000 \end{aligned}$$

Б 16

DUUk2 =

$$(38471*k1)/4777500000 + (38471*k2)/4777500000 + (62807*q1)/5250000000 + (120761*q2)/5250000000 - 319693996685311070534869/4924609501593600000000000$$

DUUq1 =

$$(363*k1)/27343750 + (62807*k2)/5250000000 - (259845521408*m1)/195421011967999975 - (129922760704*m2)/195421011967999975 + (382367394451947472084*q1)/8015314943999998974609375 + (159470684946426737103029*q2)/6155761876991999212500000000 - 300382254421689084191623514009281192361/100719222642454138938458112000000000000$$

DUUq2 =

$$(120761*k1)/5250000000 + (120761*k2)/5250000000 - (15564959923778353209*m1)/2452533700198399686250 - (4394616708976813244691495056163551*m2)/692288634876384102809059911217983750 + (159470684946426737103029*q1)/6155761876991999212500000000 + (73293003244245192530304206183187621587227*q2)/1038432952314576154213589866826975625000000 + 8257626122771451273844698715096379138324273/53089102254837576634461270835200000000000$$

DUUm1 =

$$(2064238806617292536*m1)/245253370019839968625 + (1415144586765926219*m2)/245253370019839968625 - (259845521408*q1)/195421011967999975 - (15564959923778353209*q2)/2452533700198399686250 - 176060789964808997980200472877723289/8426841627751996291184328704000000$$

Б 17

DUUm2 =

$$\begin{aligned} & (1415144586765926219*m1)/245253370019839968625 + \\ & (79929029357135505243090176863897*m2)/13845772697527682056181198224359675 - \\ & (129922760704*q1)/195421011967999975 - \\ & (4394616708976813244691495056163551*q2)/692288634876384102809059911217983750 - \\ & 2897002498494360756164459190229590439/20224419906604791098842388896000000 \end{aligned}$$

DUKk1 =

$$(11*k1)/2388750 + (11*k2)/2388750 + (11*q2)/656250 + 12880070049781/256490078208000000$$

DUKk2 =

$$(11*k1)/2388750 + (11*k2)/2388750 + (11*q2)/656250 + 12880070049781/256490078208000000$$

DUKq1 =

0

DUKq2 =

$$\begin{aligned} & (11*k1)/656250 + (11*k2)/656250 - (1991*m1)/313750 - (1991*m2)/313750 + (8284661*q2)/1176562500 \\ & + 142709944972622471696857/9055509046886400000000 \end{aligned}$$

Б 18

DUKm1 =

$$(264*m1)/31375 + (181*m2)/31375 - (1991*q2)/313750 - 22524709070497124711/1078036791296000000$$

DUKm2 =

$$(181*m1)/31375 + (181*m2)/31375 - (1991*q2)/313750 - 123556960804381155187/8624294330368000000$$

$$k1=820$$

$$k2=1076$$

$$k3=863$$

$$k4=108$$

$$m1=254$$

$$m2=624$$

$$m3=12334$$

$$m4=13543$$

$$q1=9665$$

$$q2=2334$$

$$q3=8315$$

$$q4=9422$$

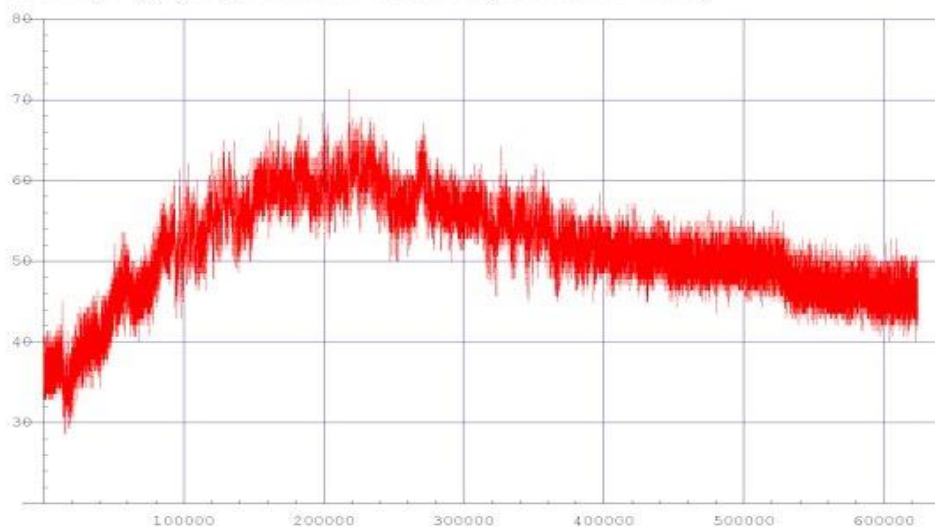
Додаток В

ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ
РОЗКИДАЧА ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ ПРТ –10

obrobka k1.nb

1

```
ListPlot[k1nul, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0], PointSize[0.001]},
PlotRange -> {20, 80}, GridLines -> Automatic, PlotJoined -> True]
```



```
- Graphics -
```

```
Min[k1nul]
```

```
28.6
```

```
Max[k1nul]
```

```
71.35
```

```
N[Mean[k1nul]]
```

```
51.1291
```

```
N[StandardDeviation[k1nul]]
```

```
6.22958
```

```
Коефіцієнт варіації :
```

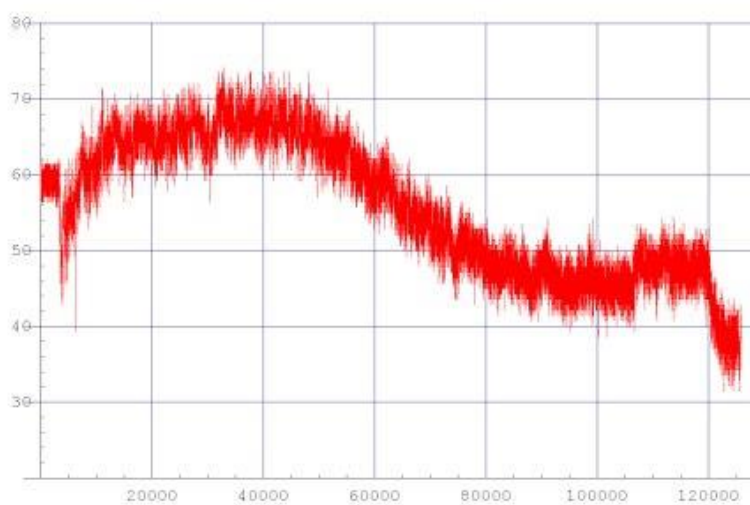
```
N[StandardDeviation[k1nul] / Mean[k1nul]]
```

```
0.12184
```

B 1

obrobka k2.nb

1



• Graphics •

Min[k5nul]

31.4875

Max[k5nul]

74.2375

N[Mean[k5nul]]

55.9772

N[StandardDeviation[k5nul]]

8.96266

Коефіцієнт варіації :

$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation}[k5nul]}{\text{Mean}[k5nul]}\right]$$

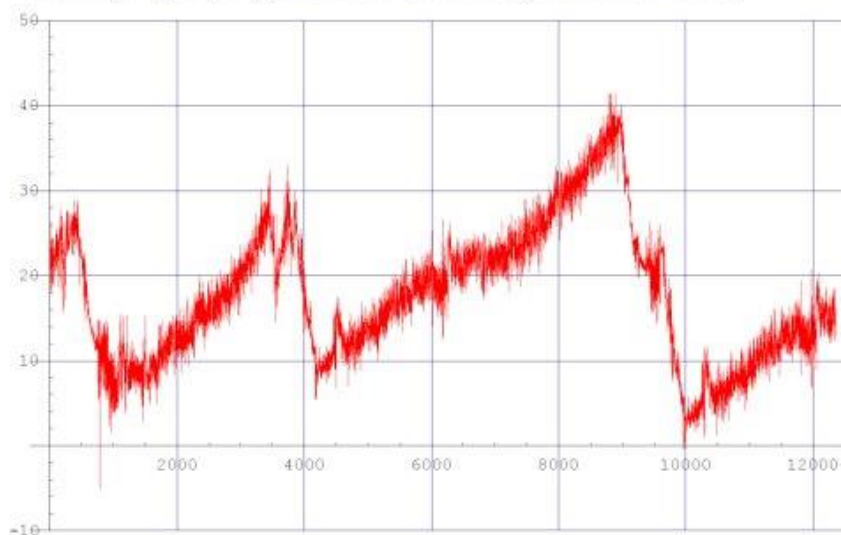
0.160113

B 2

obrobka k3.nb

1

```
ListPlot[k5nul, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0], PointSize[0.001]},
PlotRange -> {-10, 50}, GridLines -> Automatic, PlotJoined -> True]
```



• Graphics •

Min[k5nul]

1.029

Max[k5nul]

41.4885

N[Mean[k5nul]]

17.7004

N[StandardDeviation[k5nul]]

7.94506

Коефициент вариации :

$N\left[\frac{\text{StandardDeviation}[k5nul]}{\text{Mean}[k5nul]}\right]$

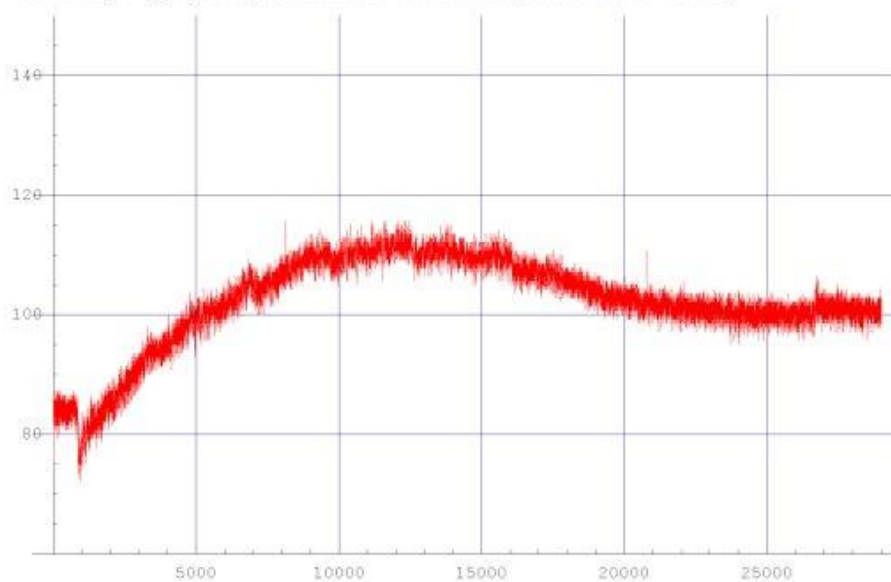
0.448863

B 3

obrobka k4.nb

1

```
ListPlot[k4nul, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0], PointSize[0.001]},
PlotRange -> {60, 150}, GridLines -> Automatic, PlotJoined -> True]
```



- Graphics -

Min[k4nul]

72.175

Max[k4nul]

115.638

N[Mean[k4nul]]

102.212

N[StandardDeviation[k4nul]]

7.75083

Коефициент вариации :

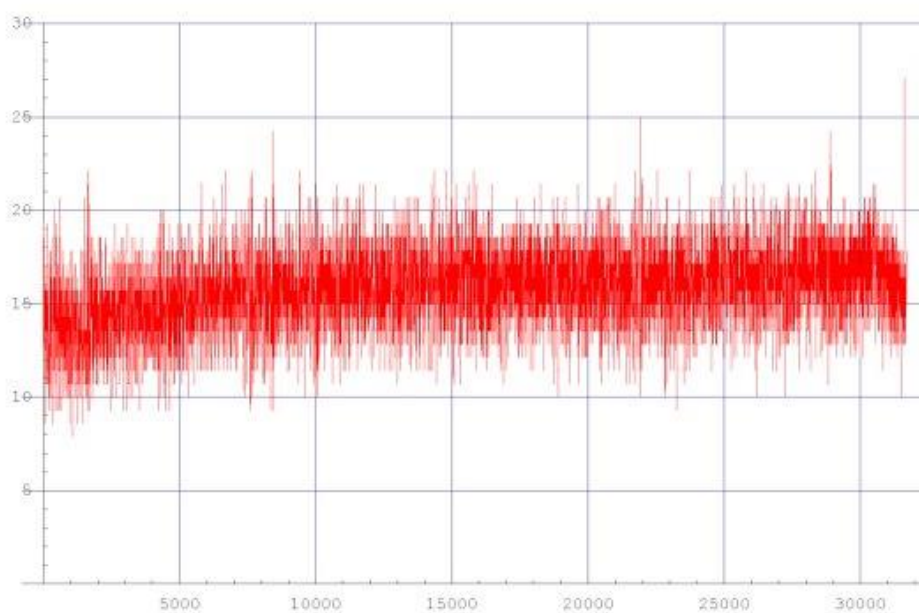
$N\left[\frac{\text{StandardDeviation}[k4nul]}{\text{Mean}[k4nul]}\right]$

0.0758311

B 4

obrobka k1.nb

1



• Graphics •

Min[k5nul]

7.8625

Max[k5nul]

27.1

N[Mean[k5nul]]

15.9914

N[StandardDeviation[k5nul]]

1.91822

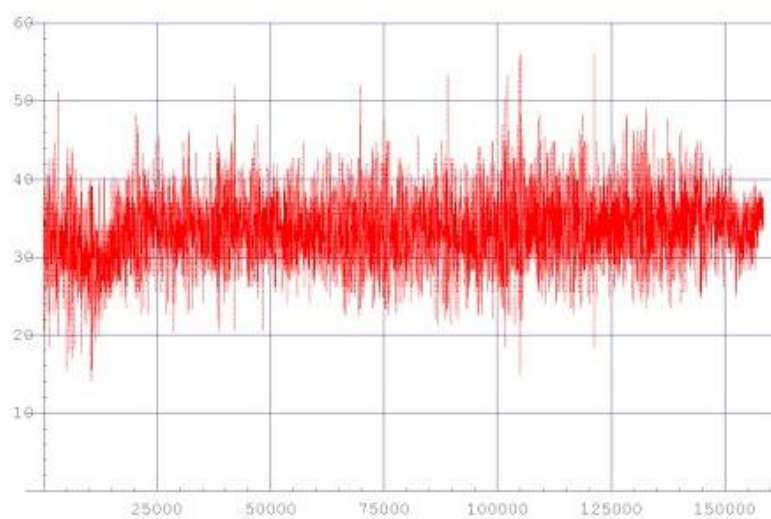
Коефіцієнт варіації :
$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}\right]$$

0.119953

B 5

obrobka k2.nb

1



- Graphics -

Min[k5nul]

14.1625

Max[k5nul]

56.2

N[Mean[k5nul]]

33.708

N[StandardDeviation[k5nul]]

4.2129

Коефіцієнт варіації :

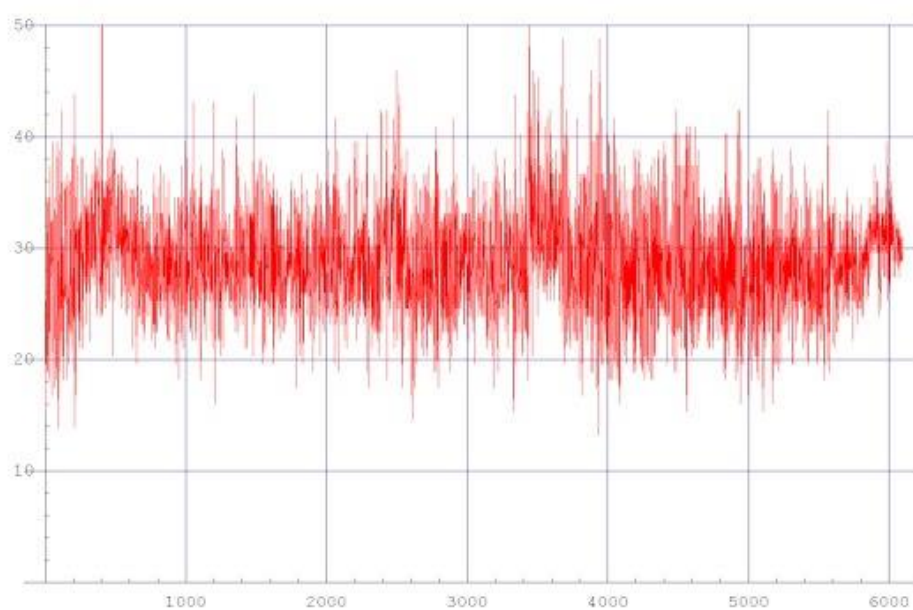
$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}\right]$$

0.124982

B 6

obrobka k3.nb

1



- Graphics -

Min[k5nul]

13.175

Max[k5nul]

58.0625

N[Mean[k5nul]]

28.89

N[StandardDeviation[k5nul]]

4.54628

Koeficient variancji :

$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}\right]$$

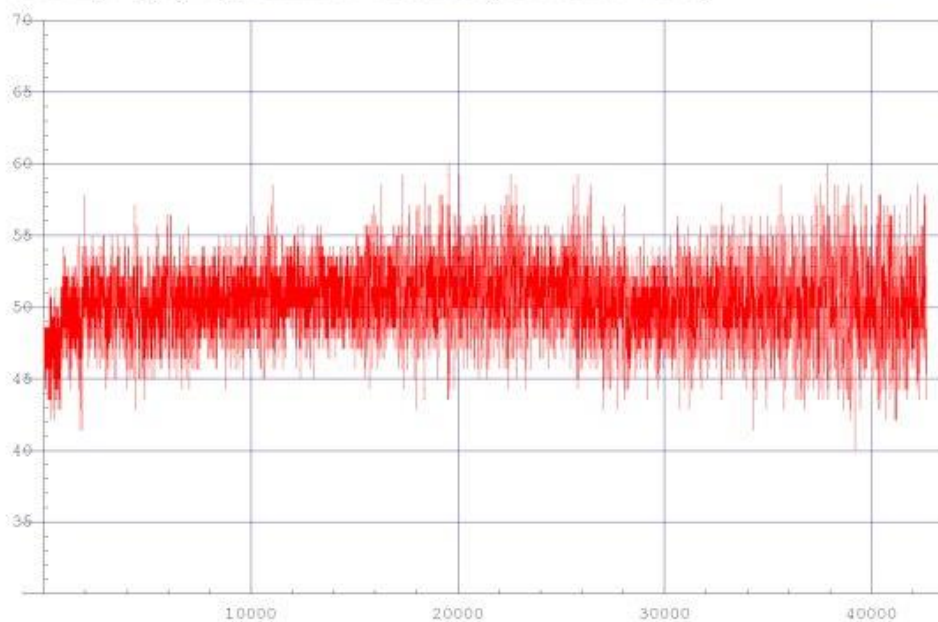
0.157365

B 7

obrobka k1.nb

1

```
ListPlot[k5nul, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0], PointSize[0.001]},
PlotRange -> {30, 70}, GridLines -> Automatic, PlotJoined -> True]
```



• Graphics •

Min[k5nul]

40

Max[k5nul]

59.95

N[Mean[k5nul]]

50.6936

N[StandardDeviation[k5nul]]

2.31529

Коефициент вариации :

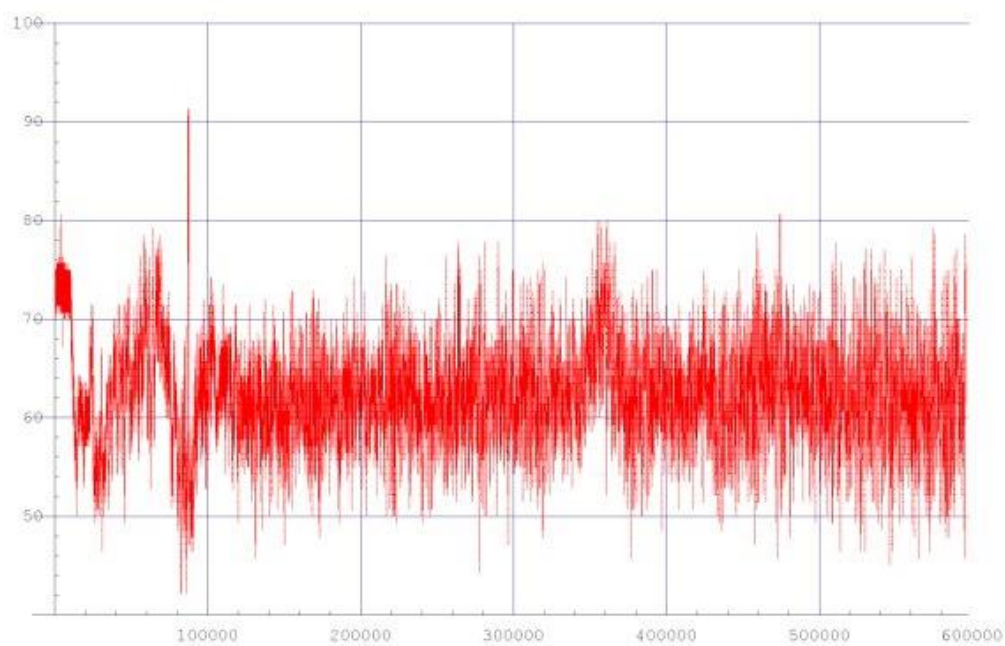
N[$\frac{\text{StandardDeviation}[k5nul]}{\text{Mean}[k5nul]}$]

0.0456723

B 8

obrobka k2.nb

1



- Graphics -

Min[k5nul]

42.175

Max[k5nul]

91.3375

N[Mean[k5nul]]

62.6022

N[StandardDeviation[k5nul]]

5.19806

Коефіцієнт варіації :

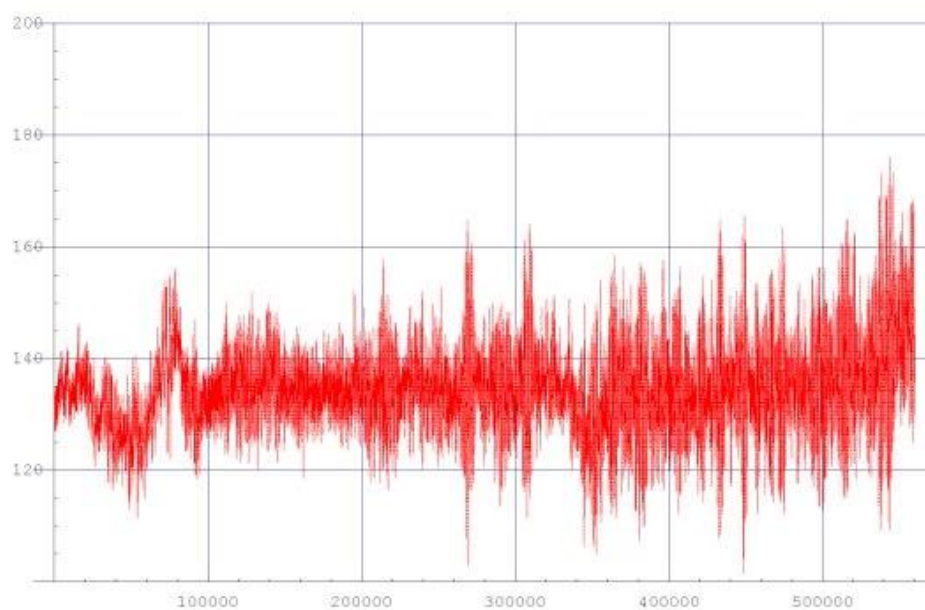
$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}\right]$$

0.0830333

B 9

obrobka k3.nb

1



• Graphics •

Min[k5nul]

101.438

Max[k5nul]

176.25

N[Mean[k5nul]]

134.425

N[StandardDeviation[k5nul]]

8.11985

Коефіцієнт варіації :

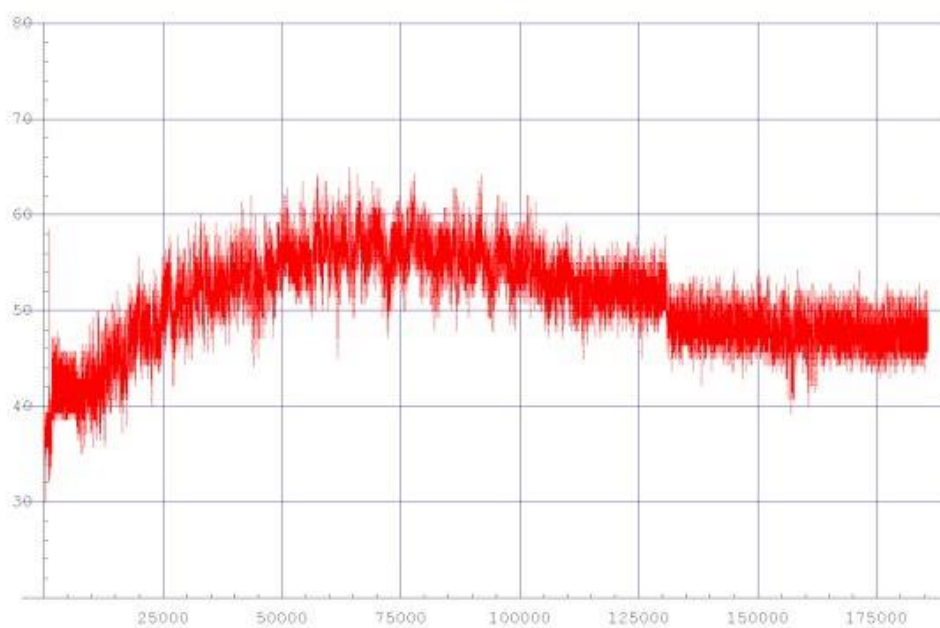
$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}\right]$$

0.0604044

B 10

obrobka k1.nb

1



• Graphics •

Min[k5nul]

30.025

Max[k5nul]

64.9375

N[Mean[k5nul]]

50.6318

N[StandardDeviation[k5nul]]

4.7562

Коефіцієнт варіації :

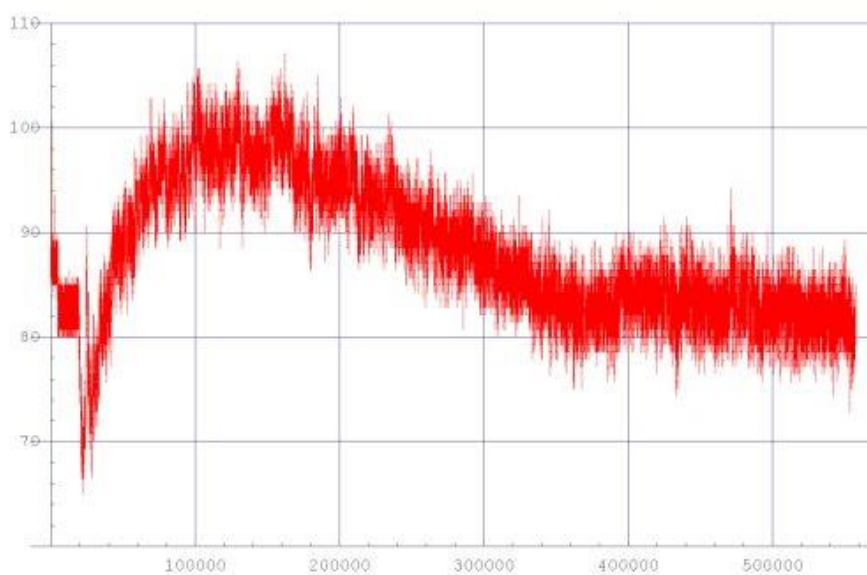
$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation}[k5nul]}{\text{Mean}[k5nul]}\right]$$

0.0939369

B 11

obrobka k2.nb

1



• Graphics •

Min[k5nul]

65.05

Max[k5nul]

107.088

N[Mean[k5nul]]

88.4197

N[StandardDeviation[k5nul]]

6.57741

Koefiциент вариации :

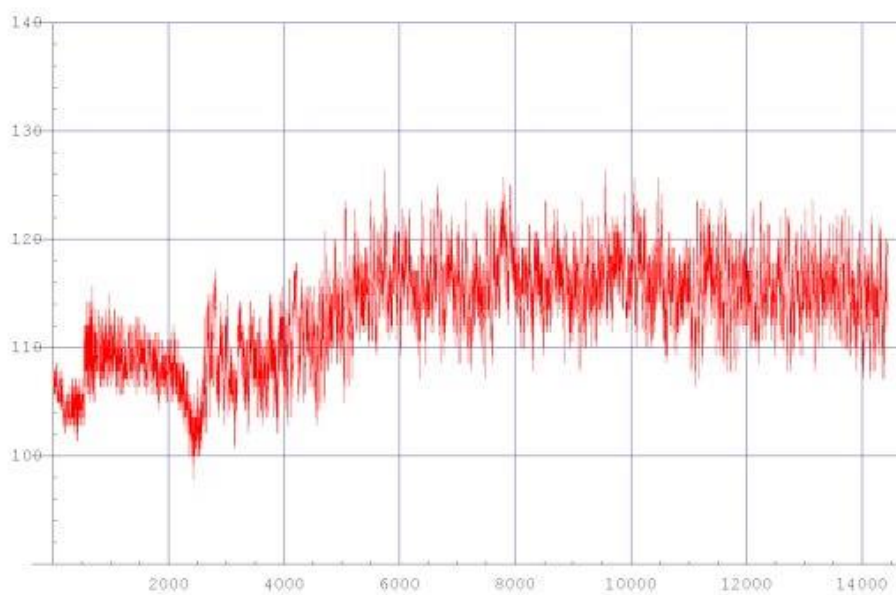
$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}\right]$$

0.0743885

B 12

obrobka k3.nb

1



• Graphics •

Min[k5nul]

97.875

Max[k5nul]

126.375

N[Mean[k5nul]]

113.224

N[StandardDeviation[k5nul]]

4.65508

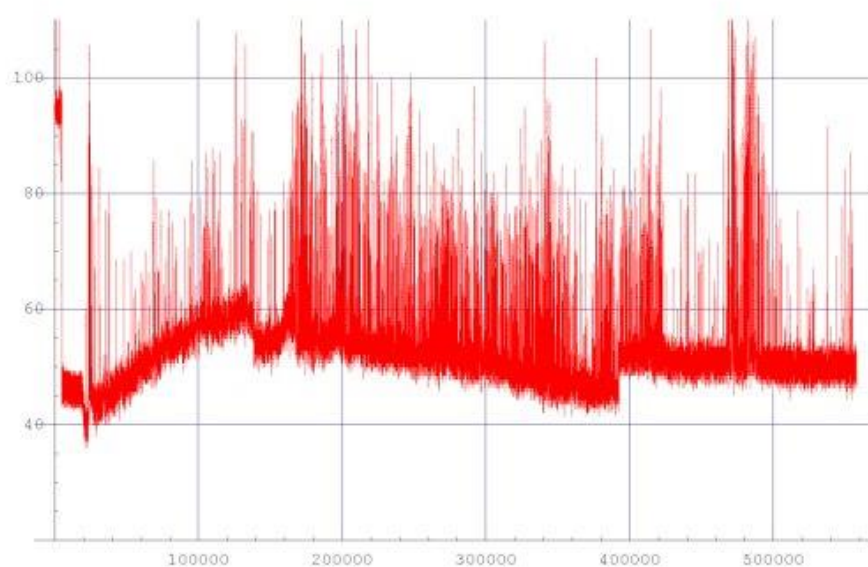
Коефіцієнт варіації :**N[$\frac{\text{StandardDeviation[k5nul]}}{\text{Mean[k5nul]}}$]**

0.0411138

B 13

obrobka k4.nb

1



- Graphics -

Min[k5nul]

35.7375

Max[k5nul]

121.238

N[Mean[k5nul]]

53.0096

N[StandardDeviation[k5nul]]

7.52226

Коефіцієнт варіації :

$$N\left[\frac{\text{StandardDeviation}[k5nul]}{\text{Mean}[k5nul]}\right]$$

0.141904

Додаток Г



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **92328** (13) **U**
(51) МПК (2014.01)
A01C 15/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2014 02703	(72) Винахідник(и): Попович Павло Васильович (UA), Бабій Андрій Васильович (UA), Сташків Микола Ярославович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 18.03.2014	(73) Власник(и): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 11.08.2014	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 11.08.2014, Бюл.№ 15	

(54) РАМА РОЗКИДАЧА ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРІВ**(57) Реферат:**

Рама розкидача твердих органічних добрив складається з двох бокових поздовжніх лонжеронів та центральної балки, що з'єднані між собою поперечками та мають приєднані причіп і балку кріплення коліс. При цьому два бокові поздовжні лонжерони виконані холодногнутими швелерами, а центральна балка утворена гнутим замкнутим профілем.



UA 92328 U

Г 1

UA 92328 U

Корисна модель належить до машинобудування і може бути використана в рамних конструкціях сільськогосподарських розкидачів добрив та іншого роду причепів.

Відома конструкція рами розкидача твердих органічних добрив складається з двох бокових поздовжніх лонжеронів та центральної балки, що з'єднані між собою поперечками та мають приєднані причіп і балку кріплення коліс [Машина для внесення добрив РТД-9. Продукція ОАО Ковельсьільмаш. Джерело <http://www.kovelselmash.com/produkt/mashina-rtd-9>, додається].

До недоліків вказаної конструкції рами розкидача твердих органічних добрив належить незадовільний напружений стан в деяких перерізах рами при повному її навантаженні. Напруження, які виникають, перевищують допустимі, а в деяких перерізах сягають межі міцності матеріалу, що в подальшому при експлуатації призводить до руйнування цих несучих елементів і відповідно зменшення ресурсу роботи всієї металоконструкції. Крім цього базова конструкція рами має низьку технологічність виготовлення через використання великої кількості зварних швів та додаткових елементів. Наслідком цього є велика її маса.

В основу корисної моделі поставлено задачу забезпечити раціональний перерозподіл напружень в елементах конструкції рами для зменшення значень напружень в небезпечних перерізах, що призведе до підвищення ресурсу роботи всієї металоконструкції, а також підвищити технологічність виготовлення рами та зменшити її масу, шляхом виконання рами розкидача твердих органічних добрив у вигляді двох бокових поздовжніх лонжеронів та центральної балки, що з'єднані між собою поперечками та мають приєднані причіп і балку кріплення коліс, виконавши два бокові поздовжні лонжерони холодногнутими швелерами, а центральну балку - гнутим замкнутим профілем.

Суть корисної моделі пояснюється графічним зображенням, де представлена конструкція пропонуваної рами розкидача твердих органічних добрив.

Рама розкидача твердих органічних добрив складається з двох бокових поздовжніх лонжеронів 1, що виконані холодногнутими швелерами та центральної балки 2, яка утворена гнутим замкнутим профілем. Ці елементи 1 і 2 з'єднані між собою поперечками 3 та мають приєднані причіп 4 і балку кріплення коліс 5.

Рама працює наступним чином. При комплектуванні машини робочими та додатковими органами, повному завантаженні кузова органічними добривами відбувається певний перерозподіл зусиль при їх роботі, який позначається на напружено-деформованому стані рами в цілому.

Використовуючи як два бокових поздовжніх лонжерони 1, холодногнуті швелери, завдяки їх моментам опору перерізу, відбувається більш повний перерозподіл навантаження між ними, приєднаними поперечками 3 та центральною балкою 2, яка утворена гнутим замкнутим профілем, що має також порівняно з базовим варіантом більший момент опору перерізу, а від того і підвищену несучу здатність. Таке поєднання профілів дозволяє рівномірно розподілити існуюче навантаження на всю площину рами, не концентруючи напружень в небезпечних перерізах. Крім цього гнутий замкнутий профіль центральної балки 2 підвищує її корозійну стійкість, оскільки органічні добрива не мають можливості затікати в середину профілю, а також тут не потрібно використовувати додаткові елементи та операцію зварювання для її формування, що підвищує технологічність конструкції в цілому. Загалом, використання для двох бокових поздовжніх лонжеронів 1 холодногнутих швелерів перерізом 180 × 80 × 5 ГОСТ 8278-83, а для центральної балки 2 гнутий замкнутий профіль 180 × 180 × 5 ГОСТ 30245-2003, то формування рами розкидача твердих органічних добрив на основі цих профілів зменшує її масу на 40 кг, а напруження в найбільш небезпечних перерізах зменшуються в 1,8 рази, крім того рама стає більш технологічною у виготовленні.

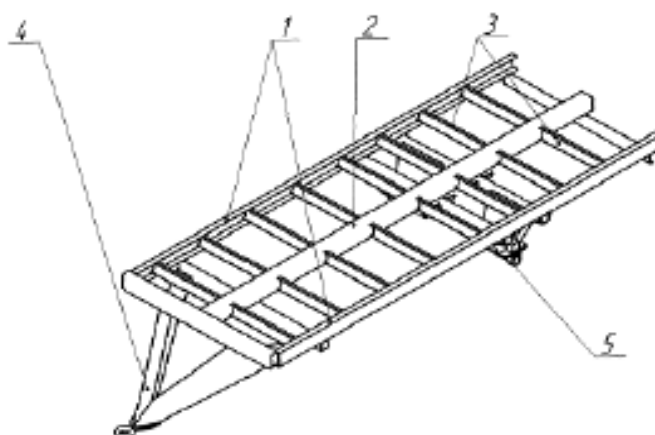
Таким чином, запропонована конструкція рами розкидача твердих органічних добрив забезпечує раціональний перерозподіл напружень в елементах конструкції рами, що зменшує значення напружень в небезпечних перерізах та загалом підвищує ресурс роботи всієї металоконструкції, а також технологічність виготовлення рами зі зменшення її маси.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Рама розкидача твердих органічних добрив, що складається з двох бокових поздовжніх лонжеронів та центральної балки, що з'єднані між собою поперечками та мають приєднані причіп і балку кріплення коліс, яка відрізняється тим, що два бокові поздовжні лонжерони виконані холодногнутими швелерами, а центральна балка утворена гнутим замкнутим профілем.

Г 2

UA 92328 U



Комп'ютерна верстка М. Мацело

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Г 3



УКРАЇНА

(19) UA (11) 48663 (13) U
 (51) МПК (2009)
 A01M 7/00
 F16M 1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
 І НАУКИ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ

ОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
 відповідальність
 власника
 патенту

(54) РАМА ПРИЧІПНОГО ВЕНТИЛЯТОРНОГО ОБПРИСКУВАЧА

1

р

(21) u200910833
 (22) 27.10.2009
 (24) 25.03.2010
 (46) 25.03.2010, Бюл.№ 6, 2010 р.
 (72) РИБАК ТИМОФІЙ ІВАНОВИЧ, ПАЛАМАРЧУК
 ПЕТРО ВАСИЛЬОВИЧ, БАБІЙ АНДРІЙ ВАСИ-
 ЛЬОВИЧ, СТАШКІВ МИКОЛА ЯРОСЛАВОВИЧ,
 МАТВІШИН АНАТОЛІЙ ЙОСИПОВИЧ, ПОПОВИЧ
 ПАВЛО ВАСИЛЬОВИЧ
 (73) ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧ-
 НИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

(57) Рама причіпного вентиляторного обприскувача, що складається з основного Т-подібного бруса, до якого за допомогою прямих розкосів приєднано рамку бака та консольно закріплено рамку вентилятора, яка відрізняється тим, що рамка вентилятора обладнана жорстко закріпленими на ній одним кінцем прямими розкосами, які іншим кінцем кріпляться до рамки бака, утворюючи просторову конструкцію.

Корисна модель відноситься до машинобудування і може бути використана в рамках конструкцій сільськогосподарських обприскувачів.

Відома конструкція рами причіпного вентиляторного обприскувача складається з основного Т-подібного бруса, до якого за допомогою прямих розкосів приєднано рамку бака та консольно закріплено рамку вентилятора (Машина для хімічного захисту рослин. Каталог виробів ВАТ «Львівагро-машпроект». - Львів, 2007. - 16с).

До недоліків вказаної конструкції відноситься неадекватність забезпечити консольно закріпленою рамкою вентилятора раціонального розподілу зусиль від навантаженої рамки до основного Т-подібного бруса, внаслідок чого спостерігається значна концентрація напружень в цій зоні, певна кількість циклів яких призводить до руйнування з'єднання або ж приєднаних профілів.

В основу корисної моделі поставлено завдання забезпечити раціональний перерозподіл зусиль від навантаженої рамки вентилятора до основного Т-подібного бруса, зменшуючи концентрацію напружень в цій зоні, що дозволить підвищити надійність та довговічність рами причіпного вентиляторного обприскувача в цілому, шляхом виконання рами причіпного вентиляторного обприскувача, що складається з основного Т-подібного бруса, до якого за допомогою прямих розкосів приєднано рамку бака та консольно закріплено рамку вентилятора, обладнавши рамку вентилятора жорстко закріпленими на ній одним кінцем прямими розко-

сами, які іншим кінцем кріпляться до рамки бака, утворюючи просторову конструкцію.

Суть корисної моделі пояснюється графічним зображенням, де представлена конструкція пропонуваної рами причіпного вентиляторного обприскувача з рамкою вентилятора, що обладнана прямими розкосами.

Рама причіпного вентиляторного обприскувача складається з основного Т-подібного бруса 1, до якого з допомогою прямих розкосів 2 приєднано рамку бака 3 та консольно закріплено рамку вентилятора 4, яка обладнана жорстко закріпленими на ній одним кінцем прямими розкосами 5, які іншим кінцем кріпляться до рамки бака 3, утворюючи просторову конструкцію.

Рама працює наступним чином. При комплектуванні машини робочими та додатковими органами відбувається певний перерозподіл зусиль при їх роботі, який позначається на напружено-деформованому стані рами в цілому. Основний Т-подібний брус 1 складає основу рами машини, оскільки до нього кріпляться решту складових. Через прямі розкоси 2 приєднано рамку бака 3, тобто передається зусилля від ваги бака з комунікацією на Т-подібний брус 1. Крім того, до основного Т-подібного бруса 1 консольно закріплено рамку вентилятора 4, яка є несучим елементом для вентиляторної установки, де збуджуються динамічні навантаження і діють через рамку вентилятора 4 на задню частину основного Т-подібного бруса 1. Оскільки рамка вентилятора 4

(19) UA (11) 48663 (13) U

Г 4

3

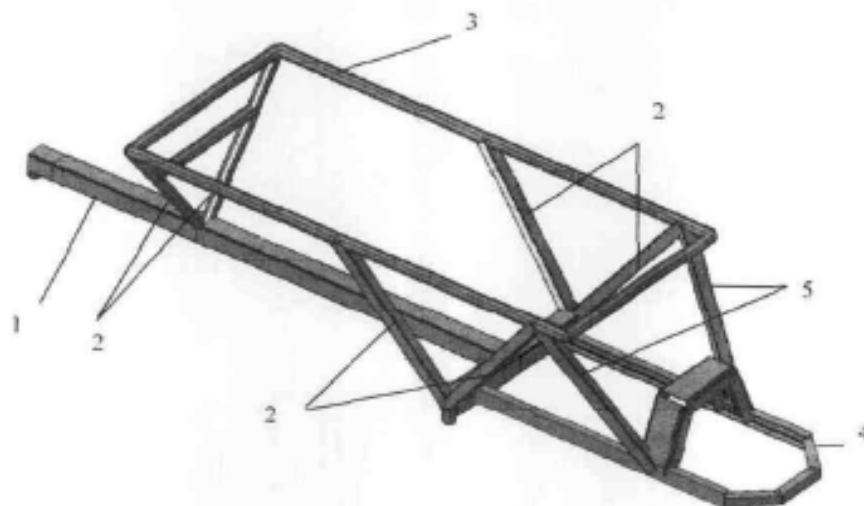
48663

4

закріплена консольне, то максимальний момент від навантаження рамки 4 зосереджений в місці II приєднання до основного T-подібного бруса 1, а це сприяє зосередженню напружень в цій зоні і як наслідок виникають втомні руйнування. Після проведення ряду теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено, що при роботі вентиляторної установки виникають значні кососиметричні навантаження, які змінюються циклічно і тому консольне закріплення рамки вентилятора 4 є небажаним, оскільки дана частина рами в площині і не може раціонально перерозподіляти діючі навантаження. Дана проблема успішно вирішується завдяки використанню прямих розкосів 5, які жорстко закріплені одним кінцем до рамки венти-

лятора 4, а іншим - до рамки бака 3, утворюючи просторову конструкцію. Така просторова конструкція суттєво дозволить розвантажити консольне закріплену рамку вентилятора 4, що значно знизить напруження в місці II приєднання до основного T-подібного бруса 1 і тим самим підвищить ресурс роботи конструкції рами в цілому.

Таким чином, запропонована конструкція рами причіпного вентиляторного обприскувача підвищить експлуатаційну надійність та довговічність рами даного обприскувача, забезпечуючи раціональний перерозподіл зусиль від навантаженої рамки вентилятора 4 до основного T-подібного бруса 1, зменшуючи концентрацію напружень в цій зоні.



Комп'ютерна верстка О. Рябко

Підпис

Тираж 26 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601

Г 5



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **89757** (13) **U**
(51) МПК
A01C 3/06 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2013 14812**
(22) Дата подання заявки: **17.12.2013**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.04.2014**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.04.2014, Бюл.№ 8**

(72) Винахідник(и):
**Бабій Андрій Васильович (UA),
Попович Павло Васильович (UA),
Сташків Микола Ярославович (UA)**
(73) Власник(и):
**ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА
ПУЛЮЯ,
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)**

(54) ВЕРТИКАЛЬНИЙ БІТЕР РОЗКИДАЧА

(57) Реферат:

Вертикальний бітер розкидача складається з вала, до якого послідовно приєднано сектори з косинцями, які утворюють навівку бітера, причому сектори обладнані змінними ножами. В одній площині з секторами розміщено змінні ножі, до яких одним кінцем приєднано криволінійні скидачі, що іншою стороною закріплені у виконаному отворі косинців, а своєю площиною закріплені в отворах сектора.

UA 89757 U

Г 6

UA 89757 U

Корисна модель належить, до сільськогосподарського машинобудування і може бути використана в конструкціях розкидачів органічних добрив.

Відома конструкція вертикального бітера розкидача, що складається з вала, до якого послідовно приєднано сектори з косинцями, які утворюють навівку бітера, причому сектори обладнані змінними ножами (Машина для внесення добрив РТД-14. Рекламний проспект <http://kovelselmash.com/prodiikt/mashina-rtid-14>).

До недоліків вказаної конструкції вертикального бітера розкидача належить необхідність надання йому порівняно великих кутових швидкостей, які беруть участь у створенні достатньої відцентрової сили, яка діє на частинку органічного добрива і змушує її сходити з навівки бітера, причому частинка добрива, рухаючись вздовж ножа сектора, має значне проковзування та при сходженні натрапляє на додатковий опір у вигляді пластини ножа та його кріпильних елементів, і як наслідок всі ці фактори призводять до великого енергоспоживання для приводу вертикального бітера. Крім того базове виконання навівки вертикального бітера не забезпечує достатньої жорсткості послідовно закріплених на валу секторів, що призводить до їх деформування та подальшого руйнування в процесі експлуатації.

В основу корисної моделі поставлено задачу знизити робочу кутову швидкість вертикального бітера, зменшити проковзування частинки органічного добрива вздовж сектора та усунути додаткові опори у вигляді пластини ножа та його кріпильних елементів, зменшуючи енергетичні затрати на привод вертикального бітера, а також збільшити ресурс роботи послідовно закріплених на валу вертикального бітера секторів, підвищуючи їх жорсткість, що забезпечуватиме зменшення їх деформації, шляхом виконання конструкції вертикального бітера розкидача, що складається з вала, до якого послідовно приєднано сектори з косинцями, які утворюють навівку бітера, причому сектори обладнані змінними ножами, розмістивши в одній площині з секторами змінні ножі, до яких одним кінцем приєднано криволінійні скидачі, що іншою стороною закріплені у виконаному отворі косинців, а своєю площиною закріплені в отворах сектора.

Суть корисної моделі пояснюється графічним зображенням, де представлена конструкція пропонованого вертикального бітера розкидача.

Вертикальний бітер розкидача складається з вала 1, до якого послідовно приєднано сектори 2, які зв'язані між собою косинцями 3, що утворюють навівку вертикального бітера розкидача. Сектори 2 обладнані змінними ножами 4, що розміщені в одній площині з секторами 2. До кожного ножа 4 одним кінцем приєднано криволінійні скидачі 5, що іншою стороною закріплені у виконаному отворі 6 косинців 3. Своєю площиною криволінійні скидачі 5 закріплені в отворі 7 сектора 2.

Вертикальний бітер розкидача працює наступним чином. До вала 1 вертикального бітера розкидача одним з відомих способів підводиться крутний момент, що надає йому обертового руху. Разом з валом 1 обертається навівка, яка утворена послідовно з'єднаними та нерухомо закріпленими секторами 2, що зв'язані між собою косинцями 3, а також обертовий рух мають змінні ножі 4 та криволінійні скидачі 5. Робочий процес проходить таким чином. Органічна маса (або інший подібний матеріал, який потрібно розкидати по полю) транспортером будь-якого типу, що є в конструкції розкидача, підводиться до вертикального бітера, що дозволяє забезпечувати їх безперервний контакт (живлення бітерів). Тоді, обертаючись з певною кутовою швидкістю, змінні ножі 4 розривають цю органічну масу, подрібнюючи її на більш дрібні частинки, які захоплюються площинами секторів 2 та криволінійними скидачами 5. Захоплена частинка органічного добрива обертається разом з навівкою вертикального бітера, поки сила тертя між ними є більшою або рівною від відцентрової сили, яка заставлятиме частинку сходити з навівки. Відповідно до цього вертикальний бітер за час перебування частинки на його навівці обернеться на певний кут. Сходження частинки з навівки відбудеться в тому випадку, коли відцентрова сила буде більшою від сил, що втримують частинку на її поверхні. Як відомо відцентрова сила $P_b = m\omega^2 r$, m - маса частинки; ω - кутова швидкість вала 1 вертикального бітера; r - радіус від осі обертання вала 1 бітера до місця розміщення частинки на навівці. Отже, для створення необхідного значення відцентрової сили, що діятиме на частинку, визначальною буде кутова швидкість частинки. З іншого боку кутову швидкість частинка набуде, обертаючись разом з навівкою бітера та втримуючись там за рахунок сили тертя об сектор 2, а також при зустрічі з криволінійним скидачем захопиться ним. Важливим тут залишається момент - зменшити шлях відносного ковзання частинки добрива по секторах 2 навівки бітера, забезпечуючи максимально ефективне її втримання та надання кутової швидкості. І цю функцію забезпечують встановлені криволінійні скидачі 5, які примусово захоплюють частинку добрива, надають їй швидкості та направляють по своїй криволінійній поверхні для сходження з навівки бітера для розкидання по поверхні поля. Рух частинки до сходження відбувається по

Г 7

UA 89757 U

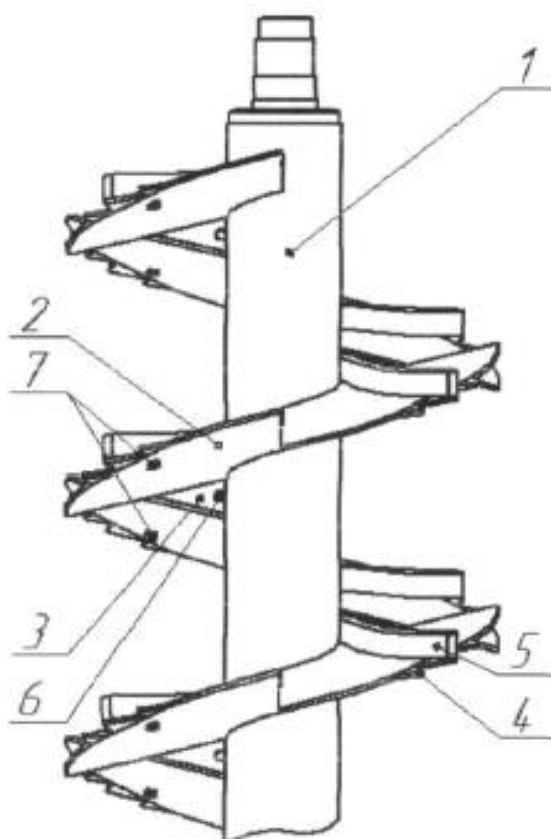
- плоскій поверхні без впливу будь-яких перешкод, наприклад, у вигляді виступів пластини ножа 4 чи його кріпильних елементів. Крім забезпечення ефективного розгону частинки встановленням криволінійних скидачів 5 досягається і інша важлива мета - підвищення жорсткості секторів 2, що закріплені на валу 1 вертикального бітера, утворюючи просторову конструкцію. За таких умов частину навантаження, що сприймали сектори 2 сприйматимуть криволінійні скидачі 5. Це значно розвантажить сектори 2 та сприятиме зниженню напружень, що виникають в їх перетинах, підвищуючи тим ресурс роботи. Крім того, вільні кінці криволінійних скидачів 5 разом з ножами 4 беруть участь у подрібненні органічної маси, підвищуючи якість розкидання її по поверхні поля.
- 10 Таким чином, запропонована конструкція вертикального бітера розкидача дозволить знизити робочу кутову швидкість вертикального бітера, зменшити проковзування частинки органічного добрива вздовж сектора та усунути додаткові опори у вигляді пластини ножа та його кріпильних елементів, зменшуючи енергетичні затрати на привод, а також збільшить ресурс роботи послідовно закріплених на валу вертикального бітера секторів, зменшуючи їх деформацію підвищенням жорсткості.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 20 Вертикальний бітер розкидача, що складається з вала, до якого послідовно приєднано сектори з косинцями, які утворюють навіяку бітера, причому сектори обладнані змінними ножами, який відрізняється тим, що в одній площині з секторами розміщено змінні ножі, до яких одним кінцем приєднано криволінійні скидачі, що іншою стороною закріплені у виконаному отворі косинців, а своєю площиною закріплені в отворах сектора.

Г 8

UA 89757 U



Комп'ютерна верстка І. Скворцова

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток Д



« РІВНЕСІЛЬМАШ »
ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО

35350 УКРАЇНА Рівненська область,
 Рівненський район, с/пгт Каасівів, вул.Індустріальна,6
 Адреса телеграфна: Каасівів, ВАТ «Рівнесільмаш»
 Телефони: (0362) 69-35-41
 № 515
 від « 01 » липня 2013 р.

Факс: (0362)69-35-41
 Розрахунковий рахунок 26004054705772
 в РФ «Приватбанк» м. Рівне
 код ЗКПО 00728380
 МФО 333391

«Затверджую»

Голова правління ПАТ «Рівнесільмаш»



Басараб Р.І.

«01» липня 2013 р.

АКТ

впровадження у виробництво результатів досліджень докторської дисертаційної роботи доцента кафедри технічної механіки, с/г машин і транспортних технологій тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя к.т.н. Поповича Павла Васильовича

Ми, нижчепідписані, комісія у складі:

Голова – Заступник Голови правління Целюк Г.Я.;

Члени комісії:

головний інженер – Сауляк С.О.

головний конструктор – Орлов В.Ф.

начальник технічного відділу – Дунаєв С.А.;

Склали даний акт у тому, що результати теоретичних та експериментальних досліджень в рамках докторської дисертаційної роботи Поповича Павла Васильовича передані в ПАТ «Рівнесільмаш» і застосовуються при розробці нових машин та удосконаленні існуючих машин: двоосних сільськогосподарських причепів ПТС-4, ПТС-6, ПТС-8, напівпричепа АСП-25 в частині обґрунтування конструктивних і експлуатаційних параметрів вказаної техніки і рекомендацій з підвищення корозійної міцності і довговічності несучих рамних систем з вибором матеріалів металоконструкцій.

Голова комісії

Члени комісії

Целюк Г.Я.

Сауляк С.О.

Орлов В.Ф.

Дунаєв С.А.

Д 1



АКТ

впровадження у виробництво результатів докторської дисертації доцента кафедри технічної механіки, с/г машин і транспортних технологій тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, к.т.н. Поповича Павла Васильовича

Результати теоретичних і експериментальних досліджень докторської дисертаційної роботи Поповича Павла Васильовича, які передані в ПАТ «Ковельсільмаш», впроваджено при удосконаленні розкидача твердих органічних добрив РТД - 9 та розкидача рідких органічних добрив РРД - 12 шляхом застосування пропонованих автором методик і рекомендацій при проектуванні несучих металоконструкцій даних машин що дало можливість підвищити корозійно - втомну довговічність та знизити матеріалоемність розкидачів. Впроваджено методику попередньої оцінки навантаженості несучих систем машин РТД - 9 і РРД - 12.

Д 2

"Затверджую"
Голова правління ВАТ «Коломиясільмаш»
Зарічний І.Ф.
« 3 » 06 2014р.

АКТ

впровадження у виробництво результатів докторської дисертаційної роботи Поповича Павла Васильовича, к.т.н., доцента кафедри технічної механіки, сільськогосподарських машин і транспортних технологій тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя

Результати аналітичних і експериментальних досліджень впливу агресивно – експлуатаційних середовищ на несучі системи мобільних сільськогосподарських машин, проведених в докторській дисертаційній роботі Поповича Павла Васильовича, передані ВАТ «Коломиясільмаш», впроваджено при удосконаленні несучої системи сільськогосподарського навантажувача ПЕА-1.0. Методологічні рекомендації попередньої оцінки навантаженості просторових несучих систем для проведення експериментальних досліджень несучих металоконструкцій сільськогосподарських навантажувачів, та методика оцінки і покращення несучих параметрів навантажувачів і на її основі рекомендації з вдосконалення несучих рам навантажувачів з зменшенням матеріаломісткості і підвищенням ресурсу роботи передані в ВАТ «Коломиясільмаш» і застосовуються при проектуванні нової та вдосконаленнях існуючої техніки в частині розробки і конструювання несучих рамних конструкцій.