

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

**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

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

ТЕРНОПІЛЬ – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор **Рибак Тимофій Іванович**, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри технічної механіки, сільськогосподарських машин і транспортних технологій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Дідух Володимир Федорович**, Львівський національний аграрний університет, завідувач кафедри експлуатації та технічного сервісу машин імені О.Д. Семковича;

доктор технічних наук, професор **Сало Василь Михайлович**, Кіровоградський національний технічний університет, декан факультету сільськогосподарського машинобудування;

доктор технічних наук, доцент **Ріпецький Євгеній Йосипович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри інженерної геодезії.

Захист відбудеться 27 січня 2015 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.02 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, аудиторія 79.

З дисертаційною роботою можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розіслано 27 грудня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.Б. Гевко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 пошкоженості 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 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 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 замкнених 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 здійснювалися 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 замкнених 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, напівпричепи 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».

**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 [1, 8]. У публікаціях що виконані у співавторстві, дисертантові належить: [2, 3] - визначення впливу органічних та мінеральних добрив на корозійні і електрохімічні характеристики конструкційних сталей; [4, 5, 10, 31] - 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 [6, 30] та циклічному [7,11] навантаженні; [9] - обґрунтування напрямків досліджень за впливами середовищ; [12, 15, 38] - систематизація причин руйнувань металоконструкцій с/г машин при експлуатації; [13, 14, 19, 20, 21] - розробка аналітичних моделей НДС несучих систем; [16, 17] - вибір критеріїв оцінки надійності мобільної с/г техніки; [18, 22]- обґрунтування раціональних напрямків схематизації нерегулярних навантажень мобільної с/г техніки; [23, 39] - адаптація параметрів експлуатаційної навантаженості для проведення лабораторних досліджень елементів несучих систем; [24] - формування розрахункової схеми підвіски причепа; [25] - розробка методики розкриття статичної невизначеності елементів несучих систем с/г машин; [26] - обґрунтування аналітичних залежностей для обчислень міцності при стендових випробуваннях елементів металоконструкцій розкидачів добрив; [32, 33, 40, 41] - розробка розрахункових залежностей для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень першого роду; [34 – 37] - постановка задач, розробка моделей НДС базових несучих структур сільськогосподарської техніки; розробка моделі навантаження бітера розкидача добрив [42]; обґрунтування напрямків досліджень довговічності несучих систем мобільних с/г машин [43, 44].

**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 Croation Metallurgical Society», Croatia (Хорватія, Šibenik, 2010р., 2012р.); «Mechanical engineering technologies'04» (Болгарія, Varna 2004р.); «Инновационные 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 технологи:

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 симпозиумах 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.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 322 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 443 сторінок, з них 360 сторінок основного тексту, 133 рисунки і 50 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання та визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, зазначено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, наведено дані про апробацію і публікації, які відображають основну суть результатів роботи.

**У першому розділі** викладено огляд літературних джерел, результати випробувань та експлуатації мобільних сільськогосподарських машин, на основі їх аналізу обґрунтовано вибір теми та напрямки досліджень.

З досліджень сучасних технологій і тенденцій розвитку мобільної сільськогосподарської техніки, зокрема розкидачів добрив, відзначено, що продуктивність та експлуатаційна надійність нових моделей зарубіжних виробників значно вищі у порівнянні з вітчизняною технікою. Встановлено, що при спільних впливах на несучу здатність агресивних робочих середовищ і експлуатаційної навантаженості, внаслідок корозійних руйнувань з ладу виходять до 30 % с/г машин. На даний час, незважаючи на суттєву поширеність корозійних пошкоджень, недоліками оцінки експлуатаційної надійності і довговічності розкидачів добрив є неврахування сумісних впливів корозійно - активних середовищ добрив і фактичних робочих навантажень.

Основні напрямки та наукові концепції розвитку сільськогосподарської техніки і аграрного виробництва розглянуто в наукових працях учених Адамчука В.В., Бойка А.І., Булгакова В.М., Василенка П.М., Войтюка Д.Г., Гукова Я.С., Гевка Б.М., Гевка Р.Б., 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., Рибак 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.

Теоретичним та експериментальним дослідженням надійності і довговічності сільськогосподарської техніки присвячено праці Аніловича В. Я., Баловнева Г. Г.,



Бичкова Д. В., Вейбулла В., Волкова П. М., Годжаєва Г. А., Грошева Л.М., Дмитриченка С.С., Ловейкіна В.С., Міркітанова В.І., Почтенного Є. К., Підгурського М. І., Погорілого В.В., Спиченкова В. В., Тат'янка В.В., Тененбаума М. М., Русанова О. А., Ріпецького Є.Й., Черновола М.І., та ін.

Проблематиці протикорозійного захисту сільськогосподарських машин присвячено роботи Баранова В. Є., Курочкіна, В.Н., Латишенка М. Б., Меламеда М. Н., Мітягіна В. А., Пасечнікова Н. М., Поцкалева А. Ф., Простоквашина В. Г., Прохоренкова В. Д., Петрашева А. І., Северного А. З., Севернева М. М., Синявського І. А., Щукіна А.Р., Яковлева Б. П., та ін.

Фундаментальним питанням міцності, втоми та тріщиностійкості матеріалів в робочих середовищах присвячені роботи Андрейківа О.Є., Вайнштока В.А., Гусенкова А.П., Дмитраха І.М., Ільїна А.В., Злочевського А.Б., Карзова Г.П., Кир'яна В.І., Когаєва В.П., Красовського А.Я., Крижанівського Є.І., Ларіонова В.В., Лобанова Л.М., Махненко В.І., Махутова М.А., Морозова Є.І., Никифорчина Г.М., Ніколаєва Г.А., Осадчука В.А., Панасюка В.В., Похмурського В.І., Партонна В.З., Работнова Ю.М., Саврука В.П., Сосновського Л.А., Трощенко В.Т., Труфякова В.І., Черепанова Г.П., Чаусова М.Г., Фролова К.В., Яснія П.В., Яреми С.Я., та ін.

Дана дисертаційна робота присвячена важливій науково - технічній проблемі, зокрема прогнозування залишкової міцності і довговічності несучих систем машин для внесення добрив. Слід зазначити, що вказані машини працюють у складних технологічних умовах при дії корозійно - агресивних середовищ, в результаті чого в їхніх елементах утворюються корозійно - механічні тріщини (рис. 1).

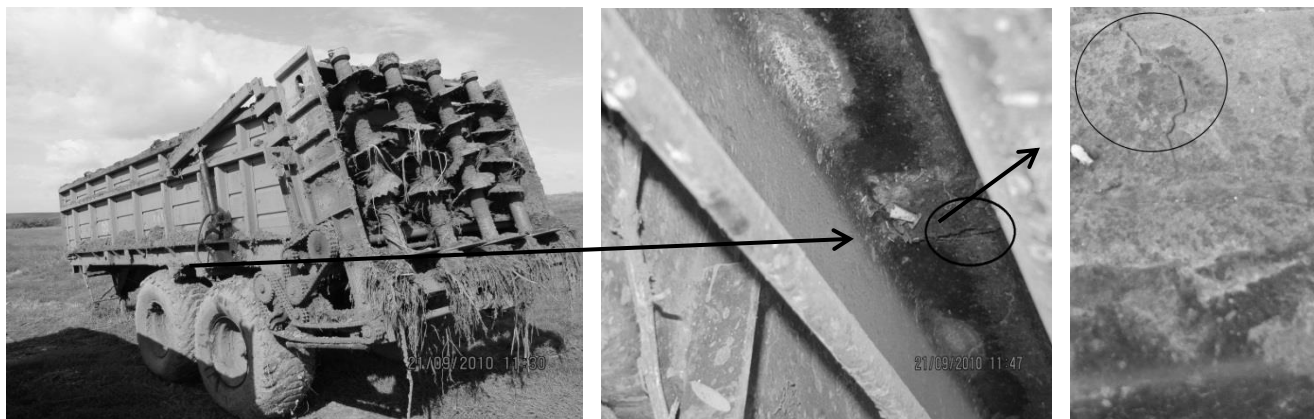


Рис. 1. Утворення корозійно - механічної тріщини в несучій системі розкидача добрив

За існуючою нормативною документацією не визначено критерії та не розроблено ефективних методик оцінки ресурсу роботи машин для розкидання добрив з урахуванням впливу експлуатаційної корозійно - втомої дефектності. З причини, що допустимих величин корозійних пошкоджень та зменшення несучої здатності елементів конструкцій на сьогодні не визначено, мають місце значні складнощі з обґрунтуванням нормативних термінів експлуатації і виконанням оцінки граничного стану несучих систем с/г техніки, в плануванні витрат на виробництво і ремонтно - відновлювальні роботи. Встановлено, що незважаючи на значний об'єм досліджень, закономірності зародження і розвитку дефектності в

складнонавантажених несучих системах сільськогосподарських машин з урахуванням агресивних робочих середовищ, фізичної природи відмов, розвитку втомних дефектів при фактичних експлуатаційних навантаженнях вивчені недостатньо. Дослідження процесів зародження і розвитку корозійно - втомних пошкоджень розширюють коло питань, пов'язаних з нормуванням показників надійності і довговічності, допустимої дефектності в металоконструкціях несучих структур розкидачів добрив.

На підставі цього сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі досліджено процеси атмосферної корозії техніки у аграрному виробництві. Обґрунтовано матеріали та методики експериментальних досліджень конструкційних сталей в робочих агресивних середовищах. Встановлено особливості корозійної і електрохімічної поведінки сталей звичайної якості та якісних у мінеральних і органічних добривах, дощовій воді.

Сукупність наукових досліджень і результати аналізу технічного стану розкидачів добрив з позиції впливу корозійної пошкодженості на зниження довговічності і роботоздатності з урахуванням класифікації мінеральних та органічних добрив за корозійною активністю викликає необхідність комплексних досліджень процесів корозії ряду якісних сталей і сталей звичайної якості в сульфаті амонію, нітрофосці, гноївці великої рогатої худоби, гноївці змішаній (1/2 ВРХ і 1/2 свиняча) та дощовій воді. Задачами випробувань були оцінка характеру корозійних пошкоджень поверхонь за видами добрив, встановлення механізмів та закономірностей корозійної і електрохімічної поведінки сталей в експлуатаційних середовищах. Швидкість корозії  $K_m$  визначалась масометричним методом після експозиції 1, 7, 12, 24 діб, отримані величини перераховано на глибинний показник  $P$ . Характер пошкоджень поверхні оцінювався за допомогою мікроскопа EVO-40XUP. Потенціал реєструвався у середовищах протягом 30 хв., показники  $i_{cor}$ ,  $b_c$ ,  $b_a$  визначено з прямолінійних ділянок поляризаційних кривих.

Вплив кристалічних міндобрив на корозійну тривкість досліджувався в сухих добривах до появи корозійних пошкоджень. Перші пітінги на зразках, поміщених у кристалічний сульфат амонію з'явилися через 24 год і протягом 4 діб злились у виразки, у кристалічній нітрофосці поодинокі пітінги з'явилися на 7 добу. Встановлено, що швидкості корозії досліджуваних сталей в насичених розчинах сульфату амонію та нітрофоски впродовж першої доби в 2 – 2,5 рази вищі, ніж у моделі дощівки (дистильована вода). У насиченому розчині сульфату амонію швидкості корозії досліджуваних сталей в 2 – 3 рази вищі, ніж у воді, в розчині нітрофоски після 12 діб експозиції показники швидкості корозії зменшуються. Встановлено, нижчі значення  $K_m$  в розчині нітрофоски порівняно з сульфатом амонію і водою при експозиції від 12 діб пов'язані з пасивуючою дією аніонів  $NO_3^-$  та утворенням іонами  $HPO_4^{2-}$  фосфатного шару на поверхні. Швидкості корозії розчинів добрив в 29 – 36 разів вищі, ніж кристалічних.

Сульфат амонію спричиняє точкові пошкодження більших глибини і площі у порівнянні з водою, поелементним аналізом встановлено: на дні пітінгів присутні S, Ca, O; в пітінгах, сформованих у воді, переважають Ca, O; поверхня зразків після експозиції в розчині нітрофоски вкрита поодинокими пітінгами, на дні яких виявлено K, Ca, Na, O, N.

Площа і глибина пітінгів на поверхні сталі 20 після експозиції в нітрофосці є меншою, у порівнянні з сульфатом амонію. Встановлені результати розходяться з відомим твердженням про найбільшу корозійну агресивність нітрофоски.

Таблиця 1

Швидкості корозії типових матеріалів металоконструкцій розкидачів добрив у робочих агресивних середовищах

Середовище, сталь		Час експозиції $\tau$ , діб	Швидкість корозії $K_m \cdot 10^5$ , г/(см <sup>2</sup> ·год)			
			1	7	12	24
Модель дощівки	Сталь 20		1,17	0,67	0,70	0,64
	Ст 3		1,25	0,70	0,81	0,79
Сульфат амонію	Сталь 20		2,66	1,58	1,37	1,52
	Ст 3		3,67	2,23	2,46	2,43
Нітрофоска	Сталь 20		2,92	0,96	0,57	0,40
	Ст 3		3,21	1,05	0,84	0,62

Корозія в добривах відбувається за електрохімічним механізмом. Стаціонарні потенціали найвід'ємніші в розчині сульфату амонію (табл. 2). Поляризаційні криві сталі 20 та Ст 3 знаходяться в області потенціалів  $-(600..700)$  мВ (рис. 2, табл. 2). Катодні криві в дистильованій воді і насичених розчинах міндобрив відрізняються: в сульфаті амонію на катодній кривій сталі 20 в області потенціалів  $-(800...980)$  мВ ділянка граничного дифузійного струму виражена менш чітко, ніж Ст 3 та на обох сталях у моделі дощової води і нітрофосці. Граничний дифузійний струм у розчині нітрофоски на сталі 20 –  $1 \text{ А/см}^2$ , на Ст 3 –  $1,5 \text{ А/см}^2$ , в розчині сульфату амонію, відповідно,  $0,5 \text{ А/см}^2$  і  $1,5 \text{ А/см}^2$ . Анодні поляризаційні криві у розчинах нітрофоски і сульфату амонію відрізняються від одержаних у дистильованій воді і між собою: в розчині сульфату амонію потенціал початку гальмування анодного процесу Ст 3 осадженими продуктами корозії:  $-390$  мВ, сталі 20:  $-300$  мВ, потенціал стабільного гальмування анодного розчинення, відповідно,  $-280$  мВ і  $-150$  мВ при величині граничної густини струму до  $6,0 \text{ А/см}^2$ . У розчині нітрофоски потенціал початку гальмування анодного процесу Ст 3:  $-370$  мВ, сталі 20:  $-150$  мВ, відповідно в мінеральних добривах анодне розчинення якісних сталей, у порівнянні з звичайними, починає гальмуватись при менш від'ємних значеннях потенціалів.

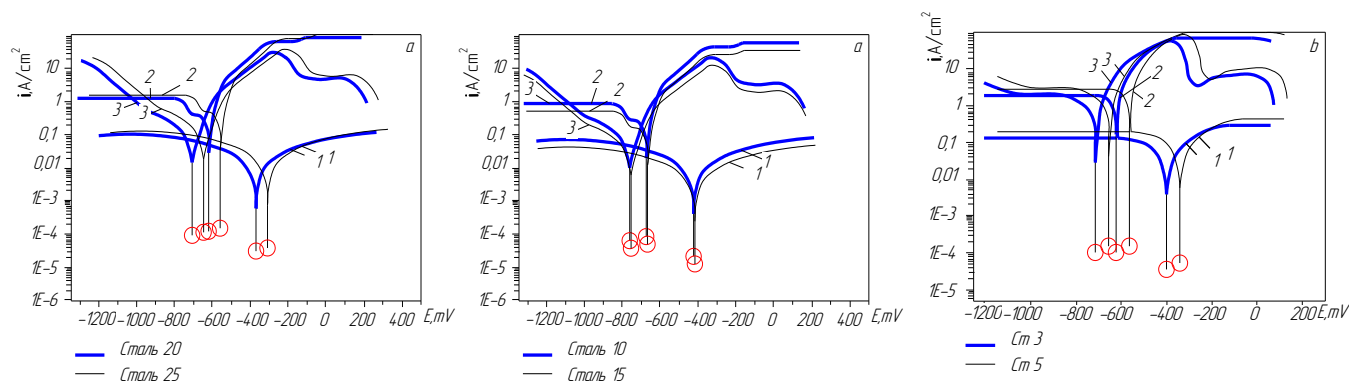


Рис. 2. Поляризаційні криві конструкційних сталей: 1 – модель дощівки; 2 – нітрофоска; 3 – сульфат амонію

Струми корозії, перераховані на масометричні показники задовільно узгоджуються з швидкостями корозії, отриманими ваговим методом.

Таблиця 2

Електрохімічні характеристики типових матеріалів металоконструкцій розкидачів добрив в насичених розчинах сульфату амонію і нітрофоски

Середовище Матеріал	Модель дощівки				Сульфат амонію				Нітрофоска			
	$-E_{st}$ , мВ	$i_{cor} \cdot 10^5$ , А/см <sup>2</sup>	$b_c$ , мВ	$b_a$ , мВ	$-E_{st}$ , мВ	$i_{cor} \cdot 10^5$ , А/см <sup>2</sup>	$b_c$ , мВ	$b_a$ , мВ	$-E_{st}$ , мВ	$i_{cor} \cdot 10^5$ , А/см <sup>2</sup>	$b_c$ , мВ	$b_a$ , мВ
Сталь 20	372	3,0	25	22,3	705	9,2	12	15,3	616	10,1	19,3	10,0
Ст 3	401	4,1	21,3	18,3	711	14,3	12,1	14,5	618	13,1	20,5	9,0

Константи Тафеля анодних реакцій у дистильованій воді і розчинах міндобрив відрізняються незначно, найвищі значення  $b_a$  у воді, найнижчі в нітрофосці, отже початковий анодний процес найбільш утруднений в дистильованій воді, найменш – у нітрофосці, потенціал перенапруження анодного процесу у досліджених середовищах більший на сталях якісних, ніж звичайної якості, що є причиною меншої корозійної стійкості останніх.

Результатами випробувань матеріалів металоконструкцій розкидачів у гноївках доведено: швидкість корозії двох груп сталей протягом першої доби в 3...4 рази нижча, ніж у моделі дощівки і у 8...10 раз нижча, ніж у міндобривах (табл. 3). Збільшення часу експозиції приводить до суттєвого зменшення швидкості корозії – через 24 доби швидкості зрівнюються (рис. 3). Протягом першої доби гноївки, у порівнянні з дощівкою, виявляють інгібувальний ефект на рівні 65–75 %, через 24 доби ступінь захисту досягає 96 %. Різниця між корозійною активністю обох гноївок відсутня.

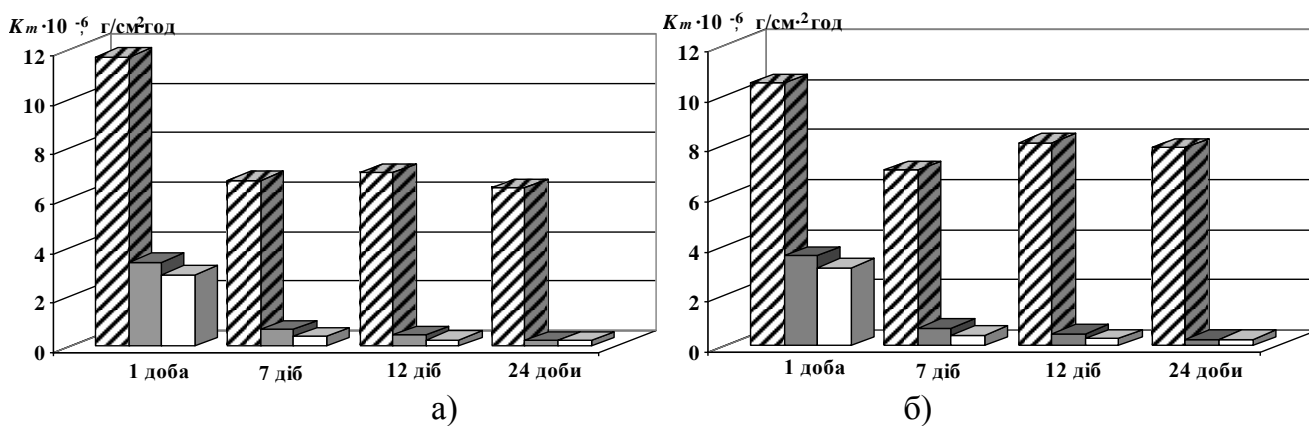


Рис. 3. Швидкості корозії сталі 20 (а) та сталі Ст 3 (б) при різній тривалості експозиції в середовищах:

▨ –  $\text{H}_2\text{O}$  ; ■ – гноївка ВРХ; □ – гноївка змішана.

Поодинокі локальні корозійні пошкодження є результатом утворення гальванічних пар внаслідок налипання диспергованих твердих залишків соломи, насіння, ін. На поверхнях зразків після досліджень протягом 24 діб виявлено поодинокі зміни у вигляді кольорів мінливості, що відповідає товщині оксидної плівки 460...680 нм. До початку випробувань гноївки ВРХ і гноївки змішаної  $\text{pH} = 7,45 - 7,50$ . Після експозиції сталей в середовищах протягом 24 діб

pH = 8,0 – 8,2, що є результатом мікробіологічних перетворень при старінні гною. Характер поляризаційних кривих подібний (рис. 4), катодні криві сталі 20 різняться між собою областю та величиною граничних дифузійних струмів: у гноївці при - (630...920) мВ величина граничного дифузійного струму  $7 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>, в гноївці змішаній в діапазоні -(510... 810) мВ:  $3 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>.

Таблиця 3

Глибинні показники швидкості корозії конструкційних сталей в добривах

Сталь	Середовище	Глибинний показник П, мм/рік			
		1 доба	7 діб	12 діб	24 доби
Сталь 20	H <sub>2</sub> 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
Ст 3	H <sub>2</sub> 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

Катодні криві Ст 3 в органічних добривах відрізняються винятково діапазоном потенціалів граничного дифузійного струму: у гноївці ВРХ -(680...1100) мВ, у гноївці змішаній -(580...1100) мВ, граничний дифузійний струм вищий, ніж сталі 20 і становить, відповідно,  $9 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> та  $7 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>. Анодні криві мають ділянки пасивності: у гноївці ВРХ -480..-530 мВ (сталь 20), -480..-540 мВ (сталь Ст 3) у змішаній -250..-320 мВ (сталь 20), -350..-420 мВ (сталь Ст 3). Чітко простежується область гальмування анодної реакції в гноївках при зсуві потенціалу від -250 мВ в бік менш від'ємних потенціалів при високих значеннях струмів (біля 10 А/см<sup>2</sup>). Струми корозії двох груп сталей у органічних добривах у 4 – 5 разів нижчі, ніж у дистильованій воді (табл. 4). Значення струмових показників швидкостей корозії задовільно узгоджуються із величинами швидкостей, отриманими масометрично за першу добу. Низька корозійна активність гноївок встановлена аналізом поляризаційних кривих: константи Тафеля катодних і анодних реакцій сталі 20 і

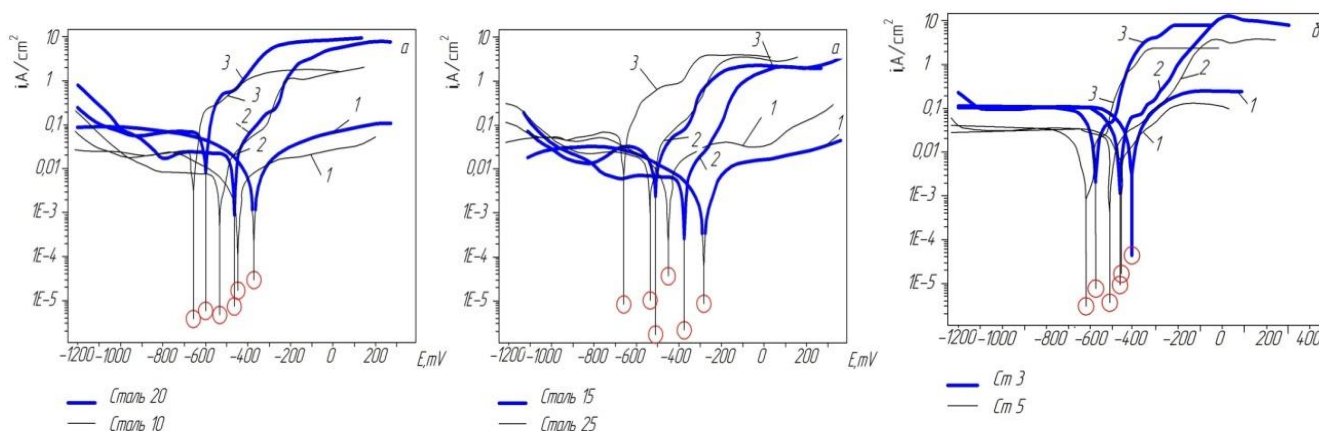


Рис. 4. Поляризаційні криві матеріалів металоконструкцій розкидачів: 1– дистильована вода; 2 – гноївка ВРХ; 3 – гноївка змішана.

Ст 3 вищі, ніж у дистильованій воді (табл. 4), що вказує на більше перенапруження обох електродних реакцій в органічних добривах порівняно з

перенапруженням у воді, наслідком чого є низькі значення швидкостей електрохімічної корозії.

Таблиця 4

Електрохімічні характеристики конструкційних сталей в середовищах добрив

Середовище, х-ки	Гноївка ВРХ				Гноївка змішана				Вода дистильована			
	-Ест, мВ	$i_{кор} \cdot 10^5$ , А/см <sup>2</sup>	бк, мВ	ба, мВ	-Ест, мВ	$i_{кор} \cdot 10^5$ , А/см <sup>2</sup>	бк, мВ	ба, мВ	-Ест, мВ	$i_{кор} \cdot 10^5$ , А/см <sup>2</sup>	бк, мВ	ба, мВ
Сталь 20	610	0,7	33,3	30,0	460	0,6	38,5	460	372	3,0	25,0	22,3
Ст 3	590	0,9	30,2	28,1	450	0,8	35,0	27,9	401	4,1	21,3	18,3

У третьому розділі обґрунтовано методики і режими досліджень процесів корозійного поширення тріщин в елементах металокопункцій, експериментально визначено вплив робочих середовищ на характеристики втомного руйнування і циклічної тріщиностійкості матеріалів несучих систем причіпних розкидачів добрив при характерних експлуатаційних навантаженнях.

Аналізом експлуатаційних даних, зокрема функцій розподілу амплітуд напружень металокопункцій сільськогосподарських причепів і розкидачів добрив встановлено значення: амплітуд максимальних 103 МПа – 190 МПа та мінімальних 30 МПа – 39 МПа напружень, максимальні нормальні напруження 105 МПа – 141 МПа при середньому квадратичному відхиленні, відповідно, 34 МПа – 49 МПа, коефіцієнти нерегулярності процесів навантаженості 0,5 – 0,9, коефіцієнти варіації 0,7–0,98; приведений фіксований коефіцієнт асиметрії циклу  $R = 0,17–0,35$ . 80% енергії випадкових процесів несучих систем розкидачів і с/г причепів зосереджено при  $\omega = 1 \dots 3,5$  Гц. Матеріали досліджень – Ст 3 і сталь 20; середовища – змішана гноївка, сульфат амонію, нітрофоска, повітря, модель дощівки. Дослідження опору втомі проводились відповідно ГОСТ 25.502-79, ТУ 6-15-1129-78. Установки для визначення опору втомі на повітрі додатково обладнувались спеціальними пристосуваннями для підведення корозійного середовища і керування його взаємодією з металом. Для реалізації програми експериментальних досліджень матеріалів на циклічну корозійну тріщиностійкість використано методологічні підходи і дослідне устаткування, які дали змогу проводити випробування при контрольованих електрохімічних умовах. Зразок з крайовою тріщиною навантажувався за схемою чистого згину, постійність складу та показник рН середовищ в околі вершини тріщини забезпечувались неперервною їх циркуляцією в дефекті, необхідне значення електродного потенціалу у вершині тріщини підтримувалось потенціостатом, що забезпечило отримання даних при заданих електрохімічних умовах незалежно від початкових довжини дефекту, КІН, часу дії середовища. Для опису діаграм застосовано степеневу залежність Паріса.

Встановлено, у всьому діапазоні прикладених навантажень опір корозійно - втомному руйнуванню сталей 20 і Ст 3 в середовищах мінеральних добрив, порівняно з повітрям і моделлю дощівки, знижується: у розчині сульфату амонію умовна границя корозійної втомі знизилася в 2,2, а в розчині нітрофоски – в 2,5 раз у порівнянні з повітрям, в 1,9 раз по відношенню до дощової води (рис. 5, табл. 5). Мінімальний негативний вплив на опір корозійній втомі сталі 20 виявила гноївка змішана: умовна границя втомі підвищилася на 8% порівняно з дистильованою

водою, виявивши властивості інгібітору. Відзначено значно менший вплив на границю витривалості органіки порівняно з мінеральними добривами. Встановлено відсутність негативного впливу гноївки на умовну границю втоми конструкційних сталей порівняно з дистильованою водою.

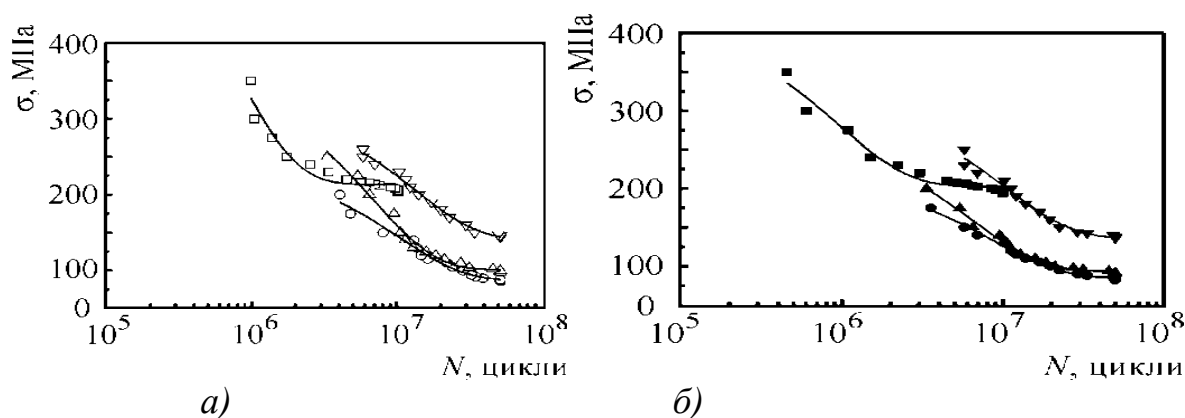


Рис. 5. Криві втоми сталей 20 (а) та Ст 3 (б): на повітрі – □, ■; у середовищах насичених розчинів нітрофоски ○, ● і сульфату амонію △, ▲; у гноївці змішаній ▽, ▼.

Визначено, діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості Ст 3 мають стрімкий характер – швидкість росту тріщини  $da/dN$  відчутно збільшується з незначними змінами  $\Delta K$  (рис. 6).

Таблиця 5

Границі витривалості типових матеріалів металоконструкцій розкидачів у робочих середовищах

Сталь	Повітря, МПа	Органічне добриво, МПа	Модель дощівки, МПа	Мінеральні добрива, МПа	
				Сульфат амонію	Нітрофоска
Сталь 20	207	147	135	104	90
Ст 3	197	139	121	93	85

Для порівняння впливів корозійних середовищ на швидкість росту втомних тріщин у досліджуваних сталях вибрано характеристичний КІН  $\Delta K = 25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = \text{const}$  при якому визначено величини швидкостей росту втомних тріщин у заданих умовах (табл. 6), а також виконане їх порівняння з швидкістю росту тріщин на повітрі (табл. 7, рис. 6).

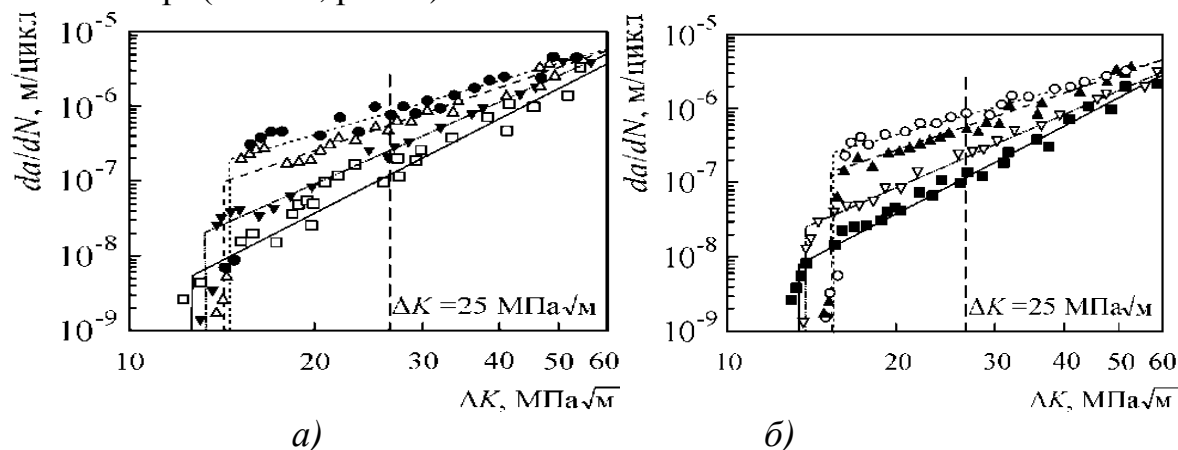


Рис. 6. Вплив середовища на швидкість поширення корозійно - втомних тріщин в Ст 3 (а) і сталі 20 (б) при  $R = 0,32$ ,  $f = 3,0$  Гц: повітря □, ■; насичені розчини нітрофоски ●, ○ і сульфату амонію △, ▲; гноївка змішана ▼, ▽.

Одержані результати (табл. 6, табл. 7) доводять, середовища добрив суттєво впливають на величину швидкості поширення корозійно - втомних тріщин у сталях, яка зростає у 5 - 25 раз у порівнянні з повітрям. Негативний вплив середовища збільшується за алгоритмом: повітря – гноївка – сульфат амонію – нітрофоска.

Таблиця 6

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

Сталь / Середовище	Швидкість росту втомних тріщин $da/dN$ , м/цикл			
	Повітря	Гноївка	Мінеральні добрива	
			Сульфат амонію	Нітрофоска
Ст 3	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$
Сталь 20	$0,3 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 7

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

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

На підставі одержаних експериментальних даних встановлено особливості впливу середовища, визначено порогові значення КІН  $\Delta K_{th}$  в характерних для розкидачів добрив агресивно - експлуатаційних умовах (табл. 8, 9).

Таблиця 8

Порогові значення  $\Delta K_{th}$  у робочих середовищах,  $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$

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

Таблиця 9

Вплив виду середовища на константи залежності для досліджуваних матеріалів несучих систем розкидачів добрив

Середовище	Ст 3		Сталь 20	
	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	$n$	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^n}$	$n$
Повітря	$1,6 \cdot 10^{-11}$	4,08	$3,7 \cdot 10^{-11}$	3,87
Гноївка змішана	$1,5 \cdot 10^{-10}$	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

Величина КІН  $\Delta K_{th}$  зростає з збільшенням степені агресивності добрив, що спричинено домінуванням в припорогових областях діаграм циклічної



тріщиностійкості корозійних процесів анодного типу, які змінюють геометрію вершини тріщини, зменшуючи ефективну концентрацію напружень в її околі.

**У четвертому розділі** на основі положень термодинаміки і механіки втомного поширення тріщин розроблено розрахункові моделі докритичного поширення тріщин у залежності від механізму впливу експлуатаційних середовищ при довготривалих статичних та нерегулярних динамічних навантаженнях. Розроблено аналітичну модель для визначення залишкового ресурсу елементів несучих систем розкидачів з поверхневими дефектами при циклічних навантаженнях в корозійних середовищах у вигляді нелінійного диференціального рівняння у часткових похідних з обґрунтованими початковими і кінцевими умовами, запропоновано новий ефективний метод розв'язку даної задачі.

Оцінка залишкового ресурсу тонкостінних елементів несучих конструкцій в агресивних сільськогосподарських середовищах при тривалому статичному навантаженні поводить на базі запропонованої нової електрохімічної моделі процесів корозії у тріщині, що описує нестационарний потік водню в метал як адитивну функцію концентрації іонів в електроліті, навантаженості, стандартного електродного потенціалу металу. Вперше для визначення кінетики наводнення зони передруйнування враховано тип пасивувального шару і закономірності його утворення, а також електрохімічні реакції між вершиною і берегами тріщини на відстанях, співрозмірних з величиною розкриття вершини. В основу моделі покладено, що анодний процес відбувається виключно в межах свіжо утвореної поверхні (СУП), конкуруючими анодними реакціями є розчинення металу і виникнення пасиваційної плівки, в момент виникнення свіжої поверхні катодний процес локалізується на прилеглий до СУП ділянці стінок тріщини. Максимальне значення концентрації водню біля вершини корозійної тріщини  $C_0(t)$ , визначається класично

$$C_0(t) = B\sqrt{it} \quad (1)$$

де  $B$  – емпірична константа системи метал - середовище;  $i$  – густина катодного струму на острівках пасиваційної плівки.

В околі СУП переважаючим катодним процесом є воднева деполяризація, параметри якої визначаються експериментально, з урахуванням чого (1) запишеться

$$C_0(t) = B\{t i_{\max} [1 + k_1 R_0^{-1} i_{a\max} (1 - \exp(-\xi m t F^{-1}))]^{-1}\}^{0.25}. \quad (2)$$

де  $F$  – число Фарадея;  $m$  – грам-еквівалентна вага металу;  $i_{a\max}$  – анодний струм в початковий момент;  $R_0$  – омичний опір середовища;  $k_1, \xi$  – постійні, що залежать від  $pH$ , визначаються експериментально.

*Пластина з прямолінійною наскрізною тріщиною довжиною  $2l_0$  знаходиться під дією симетричного відносно лінії розміщення тріщини довготривалого статичного навантаження амплітудою  $\sigma$  у агресивному середовищі. Для визначення часу  $t = t_*$  росту корозійно-механічної тріщини до критичного розміру  $l_*$  використано енергетичний підхід на основі I закону термодинаміки для випадку елементарного просування тріщини  $\Delta l_c$*

$$A = W + \Gamma + Q + K. \quad (3)$$

де  $A$  – робота зовнішніх сил;  $W$  – енергія деформування тіла після просування тріщини на величину  $\Delta l_c$  за час  $\Delta t$ , яка записується у вигляді

$$W = W_s + W_p^{(1)}(l), \quad (4)$$

де  $W_s$  – пружна складова;  $W_p^{(1)}(l)$  – частина роботи пластичних деформацій, яка залежить винятково від довжини тріщини  $l$ ;  $\Gamma$  – енергія руйнування тіла, що залежить від довжини тріщини  $l$ , характеристик середовища та часу  $t$ ;  $Q$  – виділена при руйнуванні теплова енергія, мала величина;  $K$  – кінетична енергія, мала величина.

При виконанні балансу енергії (4), відповідно, виконується баланс швидкостей зміни складових енергій

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t}. \quad (5)$$

Враховуючи (3), (4), (5) одержується

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[ \Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right] \frac{dl}{dt} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

На основі (6), швидкість поширення тріщини

$$V = \frac{dl}{dt} = - \frac{\partial \Gamma}{\partial t} / \frac{\partial}{\partial l} \left[ \Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[ \Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right] = \gamma_c - \gamma_t, \quad (8)$$

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.

Відомо, шукана величина енергії руйнування тіла  $\Gamma$  записується формулою

$$\Gamma = \Delta l_c \sigma_0 \delta_{CC}, \quad (9)$$

де  $\delta_t$  – розкриття вершини тріщини;  $\delta_{CC}$  – критичне значення розкриття тріщини при корозійному руйнуванні;  $\sigma_0$  – середні напруження в зоні передруйнування.

Довжина елементарного стрибка тріщини

$$\Delta l_c = l_a + l_m. \quad (10)$$

де  $l_a$  і  $l_m$  – відповідно, елементарні поширення тріщини за рахунок анодного розчинення і механічного навантаження та наводнення при корозії

$$l_m = \beta(\delta_t - \xi), \quad l_a = F m^{-1} n^{-1} \int_0^{\Delta t} i(t) dt, \quad \delta_{CC} = \delta_c - A C_H (\Delta t) \quad (11)$$

де  $F$  – число Фарадея;  $m$  – грам-еквівалентна вага металу;  $n$  – валентність металу;  $\xi, \beta, A$  – константи, що визначаються експериментально.

При поширенні корозійно - механічної тріщини з великою швидкістю (анодні процеси незначні) домінуючу роль має механічно - воднева складова стрибка,  $l_m \gg l_a$ . Підставляючи (8)-(11) в (7), період докритичного росту тріщини  $t=t^*$  і визначається з рівняння

$$\frac{dl}{dt} = - \frac{[\partial(\delta_{CC} l_m) / \partial t]_{t=\Delta t}}{\sigma_0(\delta_{CC} - \delta_t)}. \quad (12)$$

Початкова і кінцева умови математичної моделі (12)

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad (13)$$

$$t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad (14)$$

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_C. \quad (15)$$

На основі (10), (11), вираз (9) запишеться

$$\Gamma(t) = \sigma_0[\delta_C - AC_H(t)][\beta(\delta_t - \xi) + Fm^{-1}n^{-1} \int_0^t i(t)dt] \quad (16)$$

Для малих проміжків часу залежність (1) набуває вигляду

$$C_H(\Delta t) \approx B\sqrt[4]{\Delta t i_{\max}}. \quad (17)$$

Враховуючи (16) і (17), з (12)

$$\partial(\delta_{CC} \Delta l_C) / \partial t \approx -\eta \sigma_0(\delta_t - \xi). \quad (18)$$

де  $\eta = 0,25\beta AB\sqrt[4]{(\Delta t)^{-3} i_{\max}}$ . Час  $\Delta t$  підготовки елементарного стрибка тріщини

$$\Delta t \approx V^{-1} \Delta l_C. \quad (19)$$

Вважаючи, що  $\delta_C \gg AC_H(t)$  і позначаючи  $\xi = \delta_{scc}$ , на основі (10), (11), (18) і (19), вираз (12) запишеться

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1(\delta_t - \delta_{scc})}{(\delta_C - \delta_t)^4}, \quad \eta_1 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot i_{\max} (\beta AB)^4 \quad (20)$$

Отже, з (20), при  $\delta_t = \delta_{scc}$ , де  $\delta_{scc}$  – порогове значення  $\delta_t$ , коли швидкість дорівнює нулю, а при  $\delta_t < \delta_{scc}$  швидкість від'ємна, тріщина не поширюється.

Для випадку макроскопічної тріщини справедливі формули

$$\frac{\delta_t(l)}{\delta_{CC}} = \frac{K_I^2(l)}{K_{IC}^2}, \quad \delta_{scc} = \frac{K_{scc}^2}{\sigma_0 E}, \quad \delta_t(l) = \frac{K_I^2(l)}{\sigma_0 E} \quad (21)$$

Підставляючи (21) в (20) одержується

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1[K_I^2(l) - K_{scc}^2]}{[K_{IC}^2 - K_I^2(l)]^4}. \quad (22)$$

де  $K_I$  – КІН;  $K_{IC}$ ,  $K_{scc}$  – відповідно, верхнє і нижнє порогові КІН. До (22), на основі (13) – (15) і (21) записуються початкова і кінцева умови

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC} \quad (23)$$

Таким чином, при експериментально визначених  $K_{IC}$ ,  $K_{scc}$ ,  $\eta$ , і обчисленому  $K_I$ , математична модель запишеться співвідношеннями (21)–(23) з якої визначається залишкова довговічність тонкостінного несучого елемента  $t_* = V_c^{-1}(l_* - l_0)$  (24)

Аналітична модель поширення корозійно - механічної тріщини початкового розміру  $l_0$  при дії агресивного середовища і розтягу постійними зусиллями інтенсивності  $\sigma$ . Підставляючи  $K_I = \sigma\sqrt{\pi l}$  (22), записується залежність для визначення періоду докритичного росту тріщини  $t = t_*$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1 [\pi l \sigma^2 - K_{scc}^2]}{[K_{IC}^2 - \pi l \sigma^2]^4}, \quad (25)$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (26)$$

Інтегруючи (25) при умовах (26) одержується

$$t_* = \eta^{-1} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[K_{IC}^2 - \pi l \sigma^2]^4}{\pi l \sigma^2 - K_{scc}^2} dl, \quad (27)$$

$$\text{де з (23) і (26) визначається величина } l_* = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma^2} \quad (28)$$

Визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів несучих конструкцій з тріщиною  $2l_0$  при циклічних навантаженнях у корозійно - агресивних середовищах. З урахуванням (3), при значенні  $\Delta l_c$  яка визначається з (10) і (11)

$$W = W_s + W_p^{(1)}(l) + W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t), \quad (29)$$

де  $W_s$  – пружна складова;  $W_p^{(1)}(l)$  – частина роботи пластичних деформацій в зоні передруйнування, залежить винятково від  $l$ ;  $W_p^{(2)}(t)$  – частина роботи пластичних деформацій від зовнішніх зусиль, яка виділяється при постійній довжині тріщини під час інкубаційного періоду підготовки  $\Delta l_c$  і залежить винятково від часу  $t$  і кількості циклів навантаження  $N = tT^{-1}$ , при  $T$  – періоді циклу;  $W_p^{(3)}(t)$  – роботі пластичних деформацій під час розвантаження тіла і стискання зони передруйнування, залежить тільки від  $t$  та генерується безпосередньо тілом.

З урахуванням виконання залежності (3) отримуємо

$$\frac{\partial A}{\partial N} = \frac{\partial W}{\partial N} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N}. \quad (30)$$

Підставляючи (29) у (30)

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[ \Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] \frac{dl}{dN} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N} - \frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} = 0 \quad (31)$$

З (31), швидкість поширення тріщини

$$V = \frac{dl}{dN} = \left[ \frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} - \frac{\partial \Gamma}{\partial N} \right] / \frac{\partial}{\partial l} \left[ \Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)}) \right] \quad (32)$$

Об'єднавши (8) і (32), приходимо до залежності

$$\frac{dl}{dN} = \left[ \frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} - \frac{\partial \Gamma}{\partial N} \right] / \sigma_0 (\delta_{fc} - \delta_t). \quad (33)$$

причому  $\partial W_p^{(3)}/\partial N$ ,  $\partial \Gamma/\partial N$  визначаються на основі формул (9) – (11) і (18)

$$\begin{aligned} \partial W_p^{(3)}/\partial N &= \beta \sigma_0 [(\delta_{t \max} - \delta_{t \min})^2 - (\delta_{sc}^{(\max)} - \delta_{sc}^{(\min)})^2], \eta_2 = 0,25 \beta A B^4 \sqrt{Ti_{\max}}, \\ \partial \Gamma/\partial N &= -\eta_2 \sigma_0 T (\delta_{t \max} - \delta_{sc}^{(\max)}) + \sigma_0 F T n^{-1} m^{-1} i(T) [\delta_{fc} - AC_H(T)], \end{aligned} \quad (34)$$

де  $\delta_{t \max}, \delta_{t \min}, \delta_{sc}^{(\max)}, \delta_{sc}^{(\min)}$  – відповідно, максимальні і мінімальні розкриття вершини тріщини протягом зміни навантаження за цикл,  $\delta_{fc}$  - критичне розкриття.

Враховуючи (34), залежність (33) запишеться

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\beta [(\delta_{t \max} - \delta_{t \min})^2 - (\delta_{sc}^{(\max)} - \delta_{sc}^{(\min)})^2] + \eta_2 (\delta_{t \max} - \delta_{sc}^{(\max)})}{\delta_{fc} - \delta_{t \max}}. \quad (35)$$

При макроскопічній тріщині, вираз (35) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\beta_1 (1-R)^4 (K_{I \max}^4 - K_{sc \max}^4) + \eta_2 (K_{I \max}^2 - K_{sc \max}^2)}{K_{fc}^2 - K_{I \max}^2}, \quad \beta_1 = 0,25 \beta E^{-1} \sigma_0^{-1}, \quad (36)$$

де  $K_{I \max}$  – максимальне значення КІН циклу;  $K_{fc}, K_{sc \max}$  – відповідно, верхнє і нижнє порогові КІН;  $R = K_{I \min}/K_{I \max}$  - асиметрія циклу навантаження.

На основі (13)–(15) і (21), визначаються постійні інтегрування залежності (36)

$$N = 0, \quad l(0) = l_0; \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (37)$$

Поширення корозійно-втомної тріщини у припороговій ділянці КДВР ( $K_{fc} \gg K_I \rightarrow K_{sc}$ ) при великій активності анодних процесів,  $l_a > l_m$ , буде відбуватися з однаковою швидкістю, кінетична діаграма має плато і описується виразами

на ділянці  $K_{sc} < K_{I \max} \leq K_{li}, V = V_c;$

$$\text{на ділянці } K_{li} < K_{I \max} < K_{fc}, \quad V = \frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I \max}^4 - K_{sc \max}^4) (K_{fc}^2 - K_{I \max}^2)^{-1} \quad (38)$$

Модель визначення періоду докритичного росту даної тріщини

$$V = V_c, K_{sc} < K_{I \max} \leq K_{li}; \quad \frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I \max}^4 - K_{sc \max}^4) (K_{fc}^2 - K_{I \max}^2)^{-1}, \quad (39)$$

$$K_{li} < K_{I \max} < K_{fc}, \quad N = 0, \quad l(0) = l_0; \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*, \quad K_I(l_*) = K_{fc}$$

*Математична модель поширення поверхневих корозійно - втомних тріщин в елементах конструкцій значних перетинів.* Аналогічно попередньому, застосовуючи викладений вище енергетичний підхід, для визначення періоду докритичного росту корозійно - втомних тріщин в елементах конструкцій значних перетинів отримано наступну математичну модель

$$\frac{dS}{dN} = \frac{\partial (W_p^{(3)} - \Gamma)}{\partial N} / (\gamma_{fc} - \gamma_t). \quad (40)$$

$$\text{Початкова і кінцева умови } N = 0, \quad S(0) = S_0; \quad N = N_*(T), \quad S(N_*) = S_*, \quad (41)$$

де критичне значення площі тріщини  $S_*$ ,  $\gamma_{fc}$ ,  $\gamma_t$  визначають з відомих формул

$$\gamma_t(S_*) = \gamma_{fc}, \quad \gamma_{fc} = \sigma_0 \delta_{fc}, \quad \gamma_t = \sigma_0 \int_L \delta_{t_{\max}}^2(s) ds \left[ \int_L \delta_{t_{\max}}(s) ds \right]^{-1} \quad (42)$$

де  $L$  – довжина контуру дефекту,  $S_0$  – початкова площа тріщини,  $\sigma$  – амплітуда навантаження.

Реалізація (40) – (42) викликає значні математичні труднощі, у зв'язку з цим застосовано відомі наближені методи розв'язання таких задач. На основі результатів праць О.Є. Андрейківа, зокрема його наближеного методу еквівалентних площ, 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 сталою в усіх точках, математична задача (40) – (42) зводиться до наступної

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta_1(1-R)^4 [K_{I_{\max}}^4(a) - K_{sc_{\max}}^4] + \eta_2 [K_{I_{\max}}^2(a) - K_{sc_{\max}}^2]}{K_{fc}^2 - K_{I_{\max}}^2(a)} \quad (43)$$

$$N = 0, \quad \sqrt{2\pi^{-1}S_0} = a_0; \quad N = N_*, \quad a(N_*) = a_*$$

Максимальне значення  $K_{I_{\max}}$  для напівпростору з поверхневою півкруговою тріщиною при деформаціях розтягу визначається за довідником Ю. Мураками

$$K_{I_{\max}} = 1.17\sigma\sqrt{a} \quad (44)$$

Підставивши (44) в (43) і інтегруючи, для визначення  $N = N_*$  при  $a_0 = \sqrt{2\pi^{-1}S_0}$ ,  $a_* = 0,73K_{fc}^2\sigma^{-2}$  отримується

$$N_* = \int_{a_0}^{a_*} \frac{K_{fc}^2 - 1,37a\sigma^2}{\beta_1(1-R)^4 [1,87a^2\sigma^4 - K_{sc_{\max}}^4] + \eta_2 [1,37a\sigma^2 - K_{sc_{\max}}^2]} da, \quad (45)$$

Одержаний комплекс аналітичних залежностей є розрахунковими моделями для визначення довговічності несучих систем, робочих органів розкидачів з поверхневими пошкодженнями в корозійно - експлуатаційних середовищах.

**У п'ятому розділі** сформульовано базові положення методики оцінки ресурсу елементів несучих систем розкидачів добрив при комплексній дії агресивно - експлуатаційних чинників. Розроблено ефективний метод наближеного обчислення КІН при довільному навантаженні поверхневих корозійно - втомних тріщин. Виконано адаптацію моделей для визначення залишкового ресурсу при циклічних навантаженнях тримких елементів відкритих і замкнутих профілів в середовищах мінеральних і органічних добрив.

Ресурс роботи несучої металоконструкції розкидача добрив в цілому можна представити так

$$N_p = N_3 + N_d. \quad (46)$$

де  $N_3$ ,  $N_d$  – відповідно, періоди зародження і докритичного розвитку корозійної тріщини.

При цьому встановлено, що період зародження втомної тріщини  $N_3$  в елементі несучої системи розкидача добрив при амплітуді змінних в часі експлуатаційних напружень  $\sigma$  визначається наступною формулою

$$N_3 = N_0 10^{-\sigma \sigma_0^{-1}} \quad (47)$$

де  $\sigma_0$ ,  $N_0$  – характеристики втомного руйнування матеріалів в межах області обмеженої довговічності ( $10^4 \leq N \leq 10^7$ ).

Період докритичного росту корозійно - втомної тріщини визначається з встановленої в роботі наступної математичної задачі

$$V = V_c, K_{scc} < K_{I \max} \leq K_{Ii}; \frac{dl}{dN} = \beta_1 (1-R)^4 (K_{I \max}^4 - K_{scc \max}^4) (K_{fc}^2 - K_{I \max}^2)^{-1}; \quad (48)$$

$$K_{Ii} < K_{I \max} < K_{fc}$$

при початковій і кінцевій умовах  $N = 0, l(0) = l_0; N = N_D, l(N_D) = l_*, K_I(l_*) = K_{fc}$ ,

де  $K_{I \max}$  – максимальний КІН циклу;  $K_{fc}, K_{scc \max}$  – відповідно, верхнє і нижнє порогові значення КІН;  $R = K_{I \min} / K_{I \max}$  – асиметрія циклу навантаження;  $V_c$  – постійна швидкість припорогового росту тріщини (38) при  $K_{I \max} = K_{Ii}$ ;  $\beta_1$  – характеристика корозійно - втомного руйнування матеріалу (36).

*Визначення довговічності профілів П - подібного типу висотою і шириною, відповідно,  $H$  і  $h$ , товщиною стінки  $t$ , які циклічно навантажені згинальним моментом відносно горизонтальної нейтральної осі  $X-X$  в середовищах органічних і мінеральних добрив, крайова тріщина росте знизу стінки.*

На основі (47), 
$$N_3 = N_0 10^{-M W_x^{-1} \sigma_0^{-1}} \quad (49)$$

Шляхом інтегрування (48) визначається період докритичного росту тріщини

$$N_D = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{1}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{l_i}^{l_*} \frac{K_{fc}^2 - K_{I \max}^2}{K_{I \max}^4 - K_{scc}^4} dl \quad (50)$$

$$\text{де } K_I = \sigma_{ном} \sqrt{\pi l} (1,12 + F(\varepsilon)) \quad (51)$$

$\varepsilon = l_0 / D$ ,  $D$  – розмір поперечного перетину елемента конструкції за лінією розміщення тріщини;  $\sigma_{ном}$  – номінальне напруження у вершині тріщини;  $F(\varepsilon) \rightarrow 0$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$  – функція, яка для кожного заданого випадку визначається у залежності від геометрії елемента конструкції і тріщини. Моделюючи, що  $K_I$  визначається аналогічно випадку згину смуги з поверхневою тріщиною  $l_0$  моментом  $M$  при однакових значеннях  $t$  і  $W_x$ , записуючи  $F(\varepsilon)$  поліномом з степенями  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = l_0 / (2H + h)$ ) і застосувавши (51) для згину смуги з тріщиною  $l_0$  при  $\varepsilon \approx 0,5$ , обчислюється  $K_I$

$$K_I = \frac{\sqrt{2H + hM}}{W_x} \sqrt{\pi \varepsilon} [1,12 + F(\varepsilon)], \quad F(\varepsilon) = 0,52 \sqrt{\varepsilon} (1 + 6,42 \varepsilon^2 - 6,53 \varepsilon^3 + 5,86 \varepsilon^4) \quad (52)$$

Підставляючи (52) в (50) визначається залишковий ресурс  $N = N_D^{(1)}$

$$N_D^{(1)} = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fc}^2(2H+h)}{\beta_1 K_{sc}^4(1-R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_* = \frac{l_*}{h+2H}, \quad \varepsilon_i = \frac{l_i}{h+2H}, \quad (53)$$

$$f_1(\varepsilon) = \frac{\pi M^2 \varepsilon (h+2H)}{W_x^2 K_{fc}^2} [1,12 + F(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2 M^4 \varepsilon^2 (h+2H)^2}{W_x^4 K_{sc}^4} [1,12 + F(\varepsilon)]^4$$

З (46), (49), (50) ресурс досліджуваної несучої балки розкидача добрив  $N_P$  визначається так

$$N_P = N_0 10^{-M W_x^{-1} \sigma_0^{-1}} + \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fc}^2(2H+h)}{\beta_1 K_{sc}^4(1-R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon \quad (54)$$

Для обчислень за (54) експериментально визначаються характеристики матеріалу  $N_0, \sigma_0, V_c, K_{sc}, K_{fc}, K_{li}, \beta_1$ , а  $l_0$  приймається більше 2 мм. У результаті  $N_P$  зменшиться на похибку в запас довговічності. Для П – подібного елемента 180×80×5 (Ст 3) металокопструкції розкидача, при визначених для повітря  $N_0 = 1,51 \cdot 10^8$  цикли,

$$\beta_1 = 4,51 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}, \quad K_{fc} = 102 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}},$$

$$\sigma_0 = 120,18 \text{ МПа}, \quad K_{li} = 12,81 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, \quad R = 0,1;$$

для нітрофоски

$$N_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ цикли}; \quad \sigma_0 = 95,63 \text{ МПа}; \quad K_{li} = 50 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}; \quad V_c = 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ м / цикли}.$$

Ресурс роботи, повітря

$$N_P^{(П)} = 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/120,18} + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon \quad (55)$$

Ресурс роботи, розчин нітрофоски

$$N_P^{(К)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/95,63} 4,31 \cdot 10^5 (558,43\sigma^{-2} - 0,002) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad (56)$$

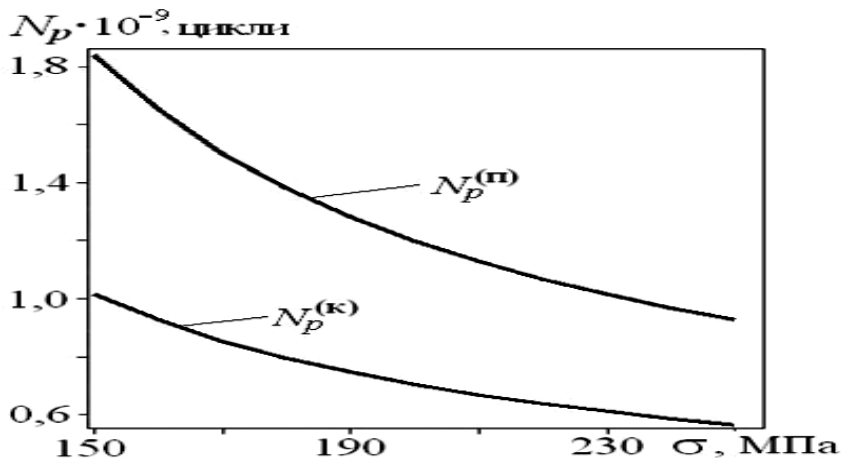


Рис. 7. Залежність довговічності від НДС елемента П – подібного перетину несучої системи розкидача:  $N_P^{(П)}$  – повітря;  $N_P^{(К)}$  – розчин нітрофоски

$$\text{де } \varepsilon_i = 1745,09 \sigma^{-2},$$

$$\varepsilon_* = 5513,66 \sigma^{-2};$$

$$\text{причому } l_i \approx 558,43 \sigma^{-2}$$

знайдена з

$$K_l(\varepsilon_i) = K_{li}, \quad l_i = H \varepsilon_i.$$

На основі (55) і (56) побудовано графічні залежності довговічності від НДС елемента зварної несучої металокопструкції розкидача добрив (рис. 7).



Визначення періоду докритичного росту крайових тріщин в елементах відкритих профілів тримких структур причіпних розкидачів добрив. При виготовленні зварних несучих систем причіпних розкидачів добрив стандартизовано застосовуються швелери, Z – подібні і Ω- подібні профілі. Довговічність тримкої системи в цілому лімітується ресурсом найбільш навантажених елементів, які працюють в складних експлуатаційних умовах. При дослідженні балки Z - подібного профілю, висотою H, шириною полиці h, товщиною стінки t, циклічно навантаженої згинальним моментом амплітудою M відносно X-X у середовищах органічних і мінеральних добрив, де тріщина росте з полиці, для одержання значення КІН застосовано формулу (51). Значення КІН запишеться

$$K_I = \sigma \sqrt{2h} \sqrt{\pi \varepsilon_2} [1,12 + F_2(\varepsilon_2)], \quad (57)$$

$$F_2(\varepsilon_2) = 0,52 \sqrt{\varepsilon_2} (1 + 6,42 \varepsilon_2^2 - 6,53 \varepsilon_2^3 + 5,86 \varepsilon_2^4), \quad \varepsilon_2 = l(2h + H)^{-1}$$

Підставивши (57) в (50) і проінтегрувавши вираз, одержано

$$N_D^{(1)} = \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fc}^2 (H + 2h)}{\beta_1 K_{th}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_* = \frac{l_*}{2h + H}, \quad \varepsilon_i = \frac{l_i}{2h + H}, \quad (58)$$

$$f_1(\varepsilon) = \frac{\pi \sigma^2 \varepsilon (2h + H)}{K_{fc}^2} [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = \frac{\pi^2 \sigma^4 \varepsilon^2 (2h + H)^2}{K_{th}^4} [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$

Тоді ресурс тримкої системи розкидача згідно (46), (47) і (58) визначається формулою

$$N_P = N_0 10^{-\sigma/\sigma_0} + \frac{l_i - l_0}{V_c} + \frac{K_{fc}^2 (H + 2h)}{\beta_1 K_{th}^4 (1 - R)^4} \int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_*} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon. \quad (59)$$

Центральна балка несучих систем машин для внесення добрив типів РТД, ПРТ, ін. виготовляється з Ω - подібного профілю, звареного з двох Z – подібних профілів висотою H, шириною полиці h, товщиною стінки t. Після числа циклів навантажень  $N_p$  в експлуатаційних середовищах, при симетрично зароджених у нижніх полицях двох корозійно-втомних тріщини, що повністю перетинають полиці, довговічність обчислюється з урахуванням (46), (47), (48), (49), (58), (59). Залишковий ресурс  $N_D$ , обчислюється на основі експериментальних даних і реалізації аналітичної моделі (48) з урахуванням впливу середовищ:

повітря

$$N_D^{(II)} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (60)$$

розчин нітрофоски

$$N_D^{(H)} = 1,37 \cdot 10^5 (0,049 - \varepsilon_0) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,049}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad 0,056 > \varepsilon_0 > 0,00625,$$

$$N_D^{(H)} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1 - f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon) - 1} d\varepsilon \quad 0,23 > \varepsilon_0 > 0,049, \quad (61)$$

гноївка змішана

$$N_D^{(\Gamma)} = 6,5 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,141} \frac{1 - f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon, \quad (62)$$

$$f_1(\varepsilon) = 3,41\varepsilon[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_2(\varepsilon) = 4,68 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4,$$

$$f_3(\varepsilon) = 3,48\varepsilon[1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_4(\varepsilon) = 7,99 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4$$

Для лонжерона швелерного перетину висотою  $L$ , шириною полиці  $T$ , з товщиною стінки  $h$ , навантаженого в середовищах добрив, довговічність визначається із залежності

$$N_p = N_0 10^{-\sigma/\sigma_0} + V_c^{-1} (l_i - l_0) + \int_{l_i}^{l_*} \frac{(K_{fc}^2 - K_{l_{max}}^2) dl}{\beta_1 (1 - R)^4 (K_{l_{max}}^4 - K_{th_{max}}^4)}. \quad (63)$$

де  $K_l = \sigma \sqrt{2T + L} \sqrt{\pi \varepsilon_2 [1,12 + F_1(\varepsilon_2)]}$ ,  $\varepsilon_2 = l / (2T + L)$  знаходиться з (51).

Визначення ресурсу при поверхневих корозійних пошкодженнях несучих елементів замкнутих профілів. За (47), період зародження корозійних дефектів

$$N_3 = N_0 10^{-\beta_0 \sigma \sigma_0^{-1}} \quad (64)$$

де  $\beta_0$  – коефіцієнт концентрації напружень біля дефекту;  $\sigma_0, N_0$  – з кривих Велера.

Досліджується несуча балка металоконструкції машини для внесення добрив: прямокутна труба з корозійним пітінгом, на базі якого зародилася півкругова корозійно - втомна тріщина довжиною значно більшою від діаметра пітінгу, при цьому максимальний діаметр поверхневого півкульового пітінгу - до 1мм, діаметр півкругової тріщини  $2l = 2$ мм. Згідно експлуатаційних даних розкидачів добрив, найбільш поширеними дефектами в розглядуваних елементах є втомні тріщини трьох типів, відповідно, період вичерпання ресурсу складається з (рис. 8): зародження поверхневої тріщини  $N_3$ , проникнення  $N_D^{(1)}$  крізь стінку труби, поширення  $N_D^{(2)}$  до складної конфігурації, після чого тріщина за період  $N_D^{(3)}$  досягає критичного розміру, отже повний ресурс

$$N_p = N_3 + N_D^{(1)} + N_D^{(2)} + N_D^{(3)}. \quad (65)$$

де  $N_3$  визначається за (47).

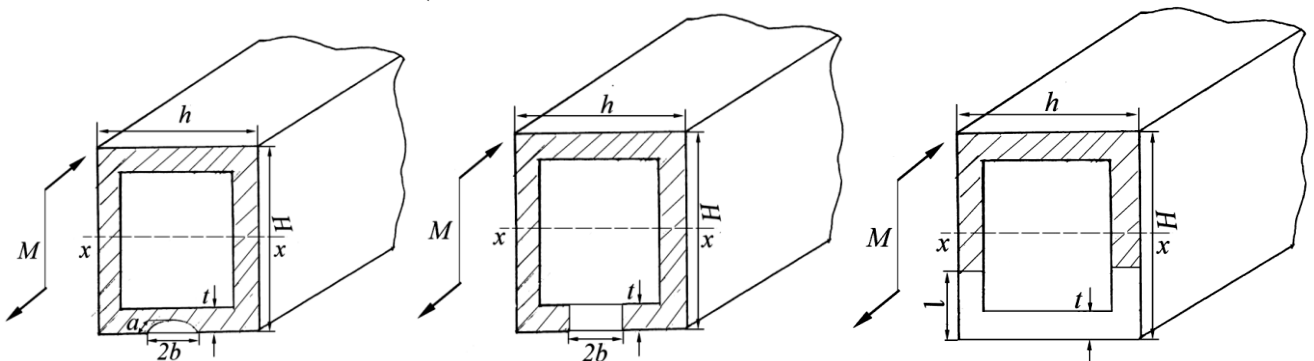


Рис. 8. Схематизація процесу поширення корозійної тріщини в несучій балці розкидача:  
а) півеліптична поверхнева; б) наскрізна; в) наскрізна в стінці.

Для визначення  $N_D^{(1)}$  дослідження проводяться відповідно до схематизації процесу розвитку експлуатаційної дефектності (рис. 8а)

$$V = V_c, K_{scc} < K_{I_{max}} \leq K_{li};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial N} = \frac{\beta_1 (1-R)^4 \sqrt{1 + \rho^{-2} (\partial \rho / \partial \theta)^2} (K_{I_{max}}^4 - K_{th}^4)}{K_{fc}^2 - K_{I_{max}}^2}, K_{li} < K_{I_{max}} < K_{fc}, \quad (66)$$

при початкових і кінцевих умовах  $N = 0, \rho(0, \pi/2) = a_0; N = N_D^{(1)}, a(N_D^{(1)}) = t$ .

Коли критичний розмір  $a_* \gg t$ , розв'язування задачі (66) пов'язане із значними математичними труднощами, з цієї причини вона розв'язується наближено, використовуючи відомий інтегральний підхід, згідно якого зміна площі втомної тріщини при однорідному циклічному розтягу буде несуттєво залежати від конфігурації її контуру, отже на цій основі її можна розглядати як дефект півколової конфігурації при еквівалентній площі і постійному максимальному значенні коефіцієнта інтенсивності напружень, тобто складна математична задача (66) замінюється наступною

$$V = V_c, K_{scc} < K_{I_{max}} \leq K_{li};$$

$$d\rho / dN = \beta_1 (1-R)^4 [K_{I_{max}}^4 - K_{th}^4] / (K_{fc}^2 - K_{I_{max}}^2), K_{li} < K_{I_{max}} < K_{fc} \quad (67)$$

при початкових значеннях величин півосей еліптичної тріщини  $a_0$  і  $b_0$ , початкових і кінцевих умовах  $N = 0, \rho(0) = \rho_0 = \sqrt{a_0 b_0}; N = N_D^{(3)}, \rho(N_D^{(3)}) = t$  (68)

Знаходження значення  $K_I$  для тріщини довільної форми з розривним навантаженням на поверхні є складною проблемою, яка не може бути ефективно розв'язана прямими числовими методами. Запропоновано розглянути таку задачу в два етапи: перший полягає в знаходженні КІН тріщини вказаної конфігурації при відносно простому виді навантаження в тілі заданої геометрії; другим етапом знаходження КІН є розробка методів розрахунку  $K_I$  при складному навантаженні на тріщині, що базуються на відомому значенні  $K_I$  при простому навантаженні. При цьому запропоновано ефективний метод наближеного обчислення КІН при довільному навантаженні поверхні тріщини, точність підтверджено узгодженням з відомими результатами.

Для інженерних розрахунків ресурсу елементів несучих систем розкидачів вказані формули громіздкі. З метою спрощення вони розкладені в ряд за малим параметром  $\varepsilon_3 = \rho t^{-1}$  для  $\theta = 0$ , при якому досягається максимальне значення КІН. В результаті отримано

$$K_{I_{max}} = \sigma f_5(\varepsilon_3), \quad f_5(\varepsilon_3) = \sqrt{\pi t \varepsilon_3} \cdot [1 + 0,6 \exp(-0,21 \varepsilon_3^2)] \cdot (1,1 + 0,53 \varepsilon_3^2) \quad (69)$$

Підставляючи (69) в (48) і інтегруючи, одержано

$$N_D^{(1)} = V_c^{-1} (\rho_i - \rho_0) + \frac{t}{\beta_1 (1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fc}^2 - \sigma^2 f_5^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_5^4(\varepsilon_3) - K_{th}^4} d\varepsilon_3, \quad \varepsilon_{30} = \frac{\sqrt{a_0 b_0}}{t} \quad (70)$$

При розвитку поверхневої тріщини в наскрізну, КІН визначається з формули

$$K_I = \sigma f_6(\varepsilon_4), f_6(\varepsilon_4) = 1,67\sqrt{\pi(h+H)}\sqrt{\varepsilon_4}(1 - 0,1\varepsilon_4 + \varepsilon_4), \varepsilon_4 = \frac{b}{h+H}, \quad (71)$$

Підставляючи (71) в рівняння (48) і інтегруючи його при вказаних умовах, для визначення періоду росту тріщини  $N = N_D^{(2)}$  отримується вираз

$$N_D^{(2)} = V_c^{-1}(b_i - b_0) + \frac{h+H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{40}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_6^2(\varepsilon_4)}{\sigma^4 f_6^4(\varepsilon_4) - K_{scc}^4} d\varepsilon_4, \varepsilon_{40} = \frac{b_0}{h+H}. \quad (72)$$

При подальшому розвитку наскрізної тріщини у складну (рис. 8в)

$$K_I = \sigma_5 \sqrt{H} f_7(\varepsilon_5), f_7(\varepsilon_5) = \sqrt{\pi \varepsilon_5} [1,12 + 0,52\sqrt{\varepsilon_5} (1 + 6,42\varepsilon_5^2 - 6,53\varepsilon_5^3 + 5,86\varepsilon_5^4)] \quad (73)$$

де  $\sigma_5$  – номінальні напруження в ослабленому тріщиною перетині несучої металоконструкції розкидача добрив.

Використовуючи формули опору матеріалів, для нетто-перерізу рами

$$I_0 = \left\{ (c-h-l_1)^3 + 3(c-h-l_1-2y_0)^2(c-h-l_1) + 0,5dh^2 + 0,75(2c-2l_1-h-2y_0)^2 d \right\} h/6;$$

$$y_0 = c1 - (h/2c) - \varepsilon_5 + (1-h/c - \varepsilon_5)^2 (c/d) [1 + (1-h/c - \varepsilon_5)c/d], \sigma_{n5} = \frac{M}{I_0} y_0, \varepsilon_5 = \frac{l}{H} \quad (74)$$

$K_{I_{max}}$ , визначений з (73) і (74) підставляється в (48), після інтегрування записується вираз

$$N_D^{(3)} = V_c^{-1}(l_i - l_0) + \frac{H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{50}}^{\varepsilon_*} \frac{K_{fC}^2 - \sigma_5^2 f_7^2(\varepsilon_5)}{\sigma_5^4 f_7^4(\varepsilon_5) - K_{scc}^4} d\varepsilon_5, \varepsilon_{50} = \frac{l_0}{H}, \varepsilon_{5*} = \frac{l_*}{H}. \quad (75)$$

де  $l_0, l_*$  – відповідно, початкова і кінцева довжина тріщини  $l$ .

Таким чином, при  $l_i < t$ , для визначення ресурсу труби  $N_P$  одержано

$$N_P = N_0 10^{-\beta_0 \sigma \sigma_0^{-1}} + V_c^{-1}(\rho_i - \rho_0) + \frac{t}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{30}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_5^2(\varepsilon_3)}{\sigma^4 f_5^4(\varepsilon_3) - K_{scc}^4} d\varepsilon_3, +$$

$$+ \frac{h+H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{40}}^1 \frac{K_{fC}^2 - \sigma^2 f_4^2(\varepsilon_4)}{\sigma^4 f_4^4(\varepsilon_4) - K_{scc}^4} d\varepsilon_4 + \frac{H}{\beta_1(1-R)^4} \int_{\varepsilon_{50}}^{\varepsilon_*} \frac{K_{fC}^2 - \sigma_5^2 f_7^2(\varepsilon_5)}{\sigma_5^4 f_7^4(\varepsilon_5) - K_{scc}^4} d\varepsilon_5 \quad (76)$$

Металоконструкції легких навісних розкидачів добрив можуть виконуватись з трубчастих елементів. Тому в даній роботі розроблено методику для визначення ресурсу таких елементів в основу якої покладений аналогічний застосованому вище енергетичний підхід з адаптацією до кругових профілів.

**У шостому розділі** для ефективної оцінки фактичної навантаженості несучих металоконструкцій причіпних розкидачів добрив побудовано розрахункові моделі НДС, розроблено методику і проведено польові експериментальні дослідження причіпного розкидача добрив ПРТ – 10, встановлено частотний і компонентний склад напружень при експлуатаційних режимах роботи.

Експериментальні дослідження несучої системи причіпного розкидача твердих органічних добрив ПРТ – 10 проводились при внесенні змішаного підстилкового гною, маса робочого матеріалу 10т. Повторення дослідів

шестикратне, агрегування – трактор МТЗ – 1523. Відповідно до світових тенденцій розвитку експлуатаційних досліджень складних механічних структур в реальних умовах, на кафедрі технічної механіки, с/г машин і транспортних технологій ТНТУ ім. І. Пулюя проф. Рибакот Т.І., Підгурським М.І. розроблено універсальну вимірювальну систему, яка дозволяє на новому якісному рівні визначати характеристики динамічної навантаженості с/г машин. Для встановлення залежності характеристик навантаженості від режимів експлуатації випробування проведено при прямоочній технологічній схемі з причини поєднання операцій транспортування і розкидання. Довжини ділянок реєстрації: рух польовою дорогою порожній 0,3 км, рух полем навантаженой 0,5 км, внесення добрив 1,6 км, рух полем порожній 0,8 км. Тензорезистори встановлювались у зонах максимальних напружень, які визначені попереднім аналітичним моделюванням статичної навантаженості несучої металоконструкції, також як результат обробки статистичних даних про поломки досліджуваних елементів аналогічних машин при експлуатації. Комплексне моделювання фактичної навантаженості тримкої металоконструкції ПРТ – 10 виконане шляхом вдосконалення методу мінімуму потенціальної енергії деформації для використання при розрахунках несучих систем 3- го класу, застосуванням якого коректно розкрито статичну невизначеність, одержано числові значення перерізуючих зусиль, згинальних і крутних моментів. Доведено, що для досліджуваної плоскої просторово – навантаженої зусиллями перпендикулярними до площини системи, нівелювання енергій розтягу – стиску і зсуву суттєво не впливає на точність результатів. У кожному суміжному поперечному перетині елемента домінують внутрішні силові фактори:  $M_i$  – згинальні моменти,  $K_i$  – крутні моменти,  $Q_i$  – перерізуючі зусилля (рис. 9).

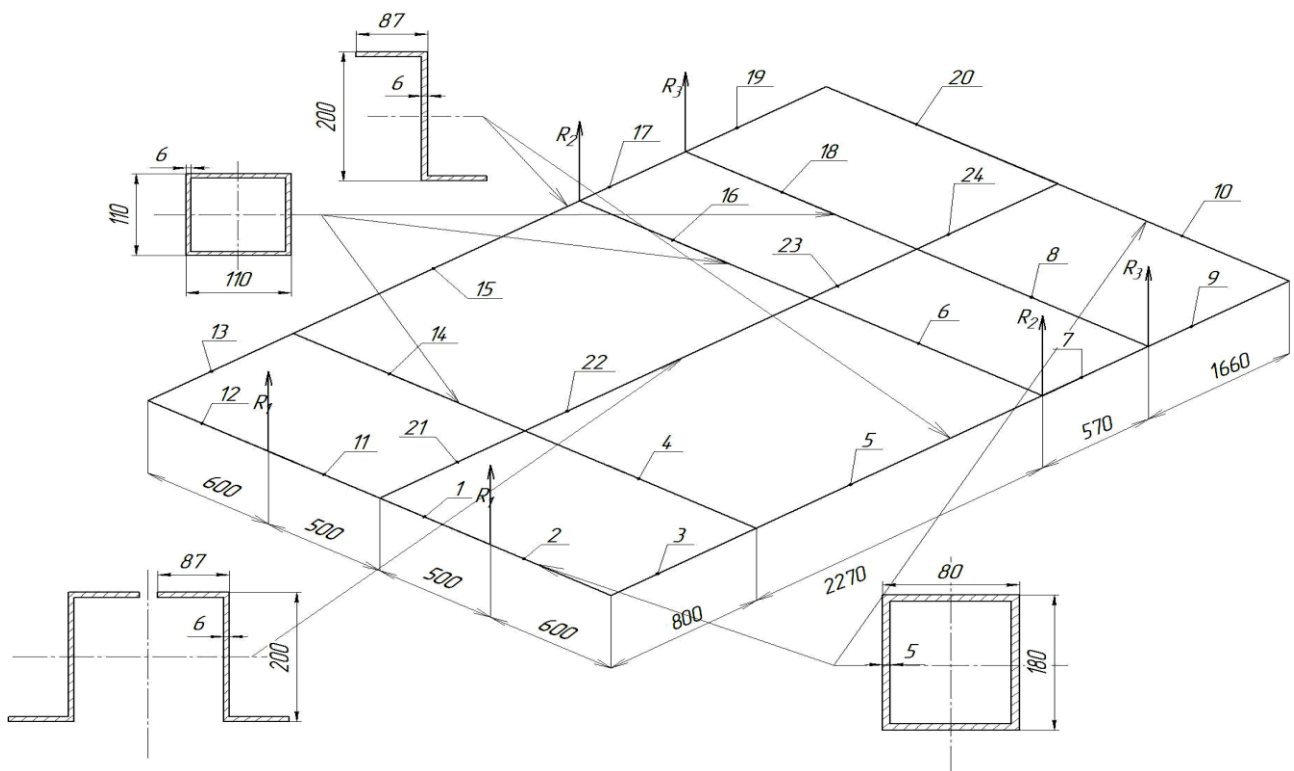


Рис. 9. Основна розрахункова конструктивно - несуча система причіпного розкидача ПРТ – 10

Внутрішні силові фактори за складеною аналітичною моделлю НДС обчислено в Matlab, для порівняння - в ППП Ліра - 9.2. Отримані числові значення приведено в табл. 10, кореляція результатів добра (похибка до 5%).

Таблиця 10

Результати обчислень внутрішніх силових факторів в перетинах несучої системи ПРТ – 10

Силовий фактор	$M_1, Нм$	$M_2, Нм$	$M_3, Нм$	$M_4, Нм$	$K_1, Нм$	$K_2, Нм$	$K_3, Нм$	$K_4, Нм$	$Q_1, Н$	$Q_2, Н$	$Q_3, Н$	$Q_4, Н$
Аналітичне моделювання	254	624	12334	13543	820	1076	863	108	9665	2334	8315	9422
Обчислення у ППП Ліра 9.2	241	598	12200	13010	790	1087	871	101	9600	2310	8298	9388

З урахуванням симетричності розкидача відносно поздовжньої осі тензорезистори розміщувалися на правій стороні несучої системи машини (рис. 10).



Рис. 10. Розміщення тензорезисторів при проведенні експлуатаційних польових досліджень НДС несучої системи причіпного розкидача ПРТ – 10

Результатами експериментальних досліджень НДС встановлено, що розрахункові і дослідні дані відрізняються у межах 10%. В табл. 11 приведено результати експериментальних випробувань несучої системи розкидача ПРТ – 10, які є характерними для машин даного класу. Спектр випадкових процесів в елементах несучої системи при виконанні технологічного процесу включає навантаження різної частоти і амплітуди. 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. Характеристики динамічної навантаженості несучої системи причіпного розкидача ПРТ – 10 приведено у табл. 11.



Амплітуди змінних напружень в перетинах несучої системи розкидача ПРТ – 10 при польових випробуваннях

№ з/п	Амплітуди напружень, МПа	Тип покриття, режим роботи	Рух польовою дорогою, порожній		Рух полем, навантажений		Розкидання		Рух полем, порожній	
			Вага в кузові, кг							
			0		10000		10000		0	
			15		10		7		10	
			0,3		0,5		1,6		0,8	
			0,4	Стандартне відхилення МПа Коефіцієнт варіації	0,4	Стандартне відхилення МПа Коефіцієнт варіації	1,6	Стандартне відхилення МПа Коефіцієнт варіації	2,0	Стандартне відхилення МПа Коефіцієнт варіації
1	$\sigma_{min}$	Поле/польова дорога	8,6	1,9	31,9	2,3	33	4,8	8,8	1,8
	$\sigma_{max}$		26,4		59,4		71,5		28,6	
	$\sigma_{cp}$		17,6	0,12	49,1	0,06	57,2	0,09	19,8	0,12
2	$\sigma_{min}$		4,4	7,4	72,6	4,4	38,5	7,5	1,0	7,9
	$\sigma_{max}$		35,2		111,1		73,7		41,5	
	$\sigma_{cp}$		18,5	0,44	94,6	0,05	58,3	0,08	17,7	0,44
3	$\sigma_{min}$		15,4	4,2	50,6	2,2	71,5	6,5	20,9	5,2
	$\sigma_{max}$		61,6		69,3		117,7		67,1	
	$\sigma_{cp}$		37,1	0,12	60,5	0,04	96,8	0,07	40,7	0,14
4	$\sigma_{min}$		14,3	4,5	57,2	2,8	107,8	4,7	19,8	4,9
	$\sigma_{max}$	52,8		75,9		138,6		59,4		
	$\sigma_{cp}$	31,9	0,16	67,1	0,04	124,3	0,04	35,2	0,18	
5	$\sigma_{min}$	28,6	4,1	36,3	3,1	63,8	4,8	35,2	4,2	
	$\sigma_{max}$	75,9		195,8		188		79,2		
	$\sigma_{cp}$	41,8	0,13	74,8	0,08	79,2	0,13	45,1	0,12	
6	$\sigma_{min}$	19,8	4,3	46,2	3,9	36,3	5,2	25,3	4,4	
	$\sigma_{max}$	67,1		166,1		188		72,6		
	$\sigma_{cp}$	39,6	0,14	105,6	0,09	74,8	0,08	45,1	0,16	
7	$\sigma_{min}$	23,1	4,6	48,4	4,2	40,7	3,9	27,5	4,8	
	$\sigma_{max}$	68,2		173,8		188,1		72,6		
	$\sigma_{cp}$	40,7	0,15	111,1	0,15	72,6	0,06	46,2	0,17	
8	$\sigma_{min}$	24,2	1,8	59,4	3,1	46,2	3,9	30,8	2,1	
	$\sigma_{max}$	67,1		90,2		105,6		73,7		
	$\sigma_{cp}$	37,4	0,12	74,8	0,08	75,9	0,11	44	0,14	
9	$\sigma_{min}$	27,5	4,2	37,4	3,2	36,3	4,9	31,9	4,4	
	$\sigma_{max}$	71,5		127,6		178		77		
	$\sigma_{cp}$	35,2	0,12	82,5	0,09	71,4	0,12	40,7	0,15	
10	$\sigma_{min}$	26,4	4,1	50,6	4,6	37,4	4,6	28,6	4,3	
	$\sigma_{max}$	63,8	0,13	95,7	0,05	107,8	0,4	66	0,15	

У цьому розділі сформульовано методику аналітично – експериментальної оцінки ресурсу несучих структур розкидачів добрив з врахуванням впливів агресивно - експлуатаційних середовищ.

Методику обґрунтовано при дослідженнях розкидача типу РТД. Аналітичне моделювання НДС несучих систем розкидачів добрив виконане з урахуванням одержаних в експлуатаційних умовах трьох компонентних динамічних навантажень. Модель НДС причіпного розкидача твердих органічних добрив РТД – 9 сформовано при використанні модифікації методу мінімуму потенціальної деформації конструктивних структур шляхом урахування домінуючих за впливом на несучу систему енергій деформації згину та кручення, що підтверджено кореляцією з експериментальними даними. Загальний вираз функції потенціальної енергії деформації системи записаний згідно складеної розрахункової схеми, після виконання обчислень одержано величини внутрішніх силових факторів, на цій основі визначено НДС у перетинах металоконструкції. Комплексна розрахунково - експериментальна оцінка ресурсу несучих структур причіпних розкидачів добрив з врахуванням впливів експлуатаційних середовищ базується на розроблених аналітичних моделях з урахуванням результатів експериментальних досліджень корозійної і корозійно - втомної поведінки машинобудівних сталей у робочих середовищах, кількісних і якісних характеристик фактичної експлуатаційної навантаженості. Розрахунково - аналітичним шляхом досліджено максимально навантажені елементи несучої системи розкидача. Для оцінки

ресурсу роботи  $N = N_p$  лонжерона,  $Z$  – подібного профілю  $200 \times 60 \times 5$  (Ст 3), циклічно навантаженого моментом амплітудою  $M$  у середовищах нітрофоски і змішаної гноївки необхідно з кінетичних діаграм корозійно - втомного руйнування визначити характеристики матеріалів: для нітрофоски  $\sigma_0 = 95,63 \text{ МПа}$ ,  $N_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ цикли}$ ,  $K_{ii} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $V_C = 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ м/цикл}$ ; для змішаної гноївки  $\sigma_0 = 121,56 \text{ МПа}$ ,  $N_0 = 1,44 \cdot 10^8 \text{ цикли}$ ,  $\beta_1 = 4,81 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}$ ,  $l_i = l_0$ ,  $V_C \approx 0$ ,  $K_{ih} = 11,21 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $R = 0,1$ ,  $K_{fc} = 101 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; для повітря  $N_0 = 1,51 \cdot 10^8 \text{ цикли}$ ,  $\beta_1 = 4,51 \cdot 10^{-9} (\text{цикл})^{-1} (\text{МПа})^{-2}$ ,  $K_{fc} = 102 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $\sigma_0 = 120,18 \text{ МПа}$ ,  $K_{ih} = 12,81 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $R = 0,1$ ;  $l_i \approx 558,43 \sigma^{-2}$ .

Ресурс лонжерона несучої системи причіпного розкидача у робочому середовищі нітрофоски визначається за залежністю

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/95,63} + 4,31 \cdot 10^5 (558,43 \sigma^{-2} - 0,002) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad \varepsilon_i = 1745,09 \sigma^{-2}, \quad \varepsilon_* = 5513,66 \sigma^{-2}.$$

У середовищі органічного добрива

$$N_p^{(\Gamma)} = 1,44 \cdot 10^{8-\sigma/121,56} + 6,5 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad f_2(\varepsilon) = 3,75 \cdot 10^{-5} \sigma^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4$$

$$f_1(\varepsilon) = 9,66 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_3(\varepsilon) = 9,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2, \quad f_4(\varepsilon) = 6,40 \cdot 10^{-5} \sigma^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$

На повітрі  $N_p^{(II)} = 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/120,18} + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,00625}^{\varepsilon_*} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon$

Після виконання обчислень побудовано графічні залежності ресурсу лонжерона несучої металоконструкції розкидача від рівня амплітуди напружень  $\sigma$  (рис. 11). За аналогічним алгоритмом визначається довговічність центральної балки причіпного розкидача добрив. В середовищі нітрофоски

$$N_D^{(H)} = 1,37 \cdot 10^5 (0,049 - \varepsilon_0) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{0,049}^{0,156} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad 0,056 > \varepsilon_0 > 0,00625, \text{ та}$$

$$N_D^{(H)} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon, \quad 0,23 > \varepsilon_0 > 0,049. \text{ На повітрі } N_D^{(II)} = 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,156} \frac{1-f_1(\varepsilon)}{f_2(\varepsilon)-1} d\varepsilon.$$

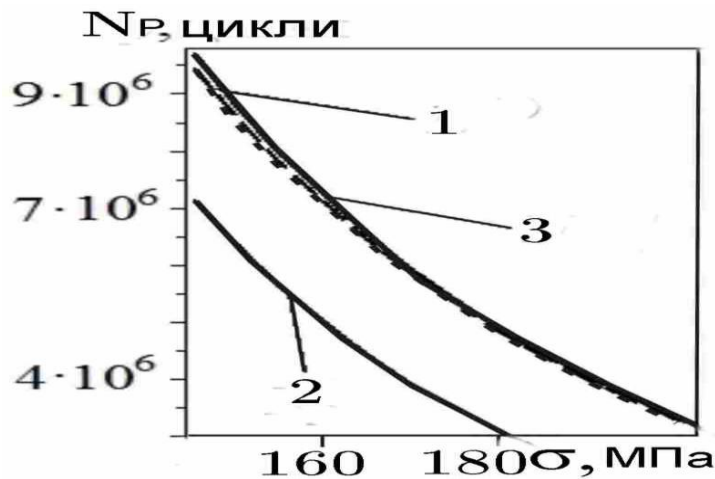


Рис. 11. Залежність ресурсу лонжерона несучої системи розкидача добрив від рівня напружень: 1 - повітря; 2 - нітрофоска; 3 - органічне добриво.

У середовищі органічного добрива

$$N_D^{(\Gamma)} = 6,5 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_0}^{0,141} \frac{1-f_3(\varepsilon)}{f_4(\varepsilon)-1} d\varepsilon$$

$$f_1(\varepsilon) = 3,41 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2$$

$$f_2(\varepsilon) = 4,68 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4$$

$$f_3(\varepsilon) = 3,48 \varepsilon [1,12 + F_1(\varepsilon)]^2$$

$$f_4(\varepsilon) = 7,99 \cdot 10^4 \varepsilon^2 [1,12 + F_1(\varepsilon)]^4.$$



Графічну залежність кінетики розвитку корозійно - втомної дефектності як функцію початкової довжини тріщини приведено на рис. 12. Розрахунки лонжеронів розкидача добрив виготовлених з холодногнутого швелера 180×80×5, Ст 3 виконано аналогічно до обчислень лонжерону Z – подібного перетину. Одержані результати і графічні залежності  $N_p \sim \sigma_3$  з похибкою 6 % співпадають з представленими на рис. 11, що пояснюється значеннями функції геометрії перерізу балок, включеної винятково у залежність з визначення  $\sigma$ . Ресурс  $N = N_p$  центральної балки несучої системи розкидача з перетином квадратна труба 180×180×5 (Ст 3) визначається за експериментально встановленими механічними і втомними характеристики матеріалу у заданих середовищах. Коефіцієнт концентрації напружень досліджується для випадку поверхневого корозійного пошкодження як найбільш вірогідного. При пітінговій корозії  $\beta_0 \approx 2$ , максимальне напруження в стінці труби  $100 < \sigma > 200$  МПа, як наслідок  $l_i > l_0$  для складної дефектності. Ресурс несучої системи розкидача на повітрі

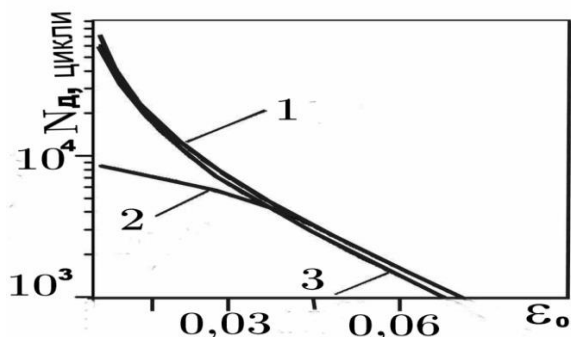


Рис. 12. Графічні залежності залишкової довговічності центральної балки причіпного розкидача  $\Omega$  - подібного профілю: 1- повітря; 2 - нітрофоска; 3 - змішана гноївка.

$$N_p^{(II)} = 6,53 \cdot 10^5 \int_{0,4}^1 \frac{1 - 1,51 \cdot 10^{-6} \sigma^2 f_{1,1}^2(\varepsilon)}{9,16 \cdot 10^{-9} \sigma^4 f_{1,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon +$$

$$4,70 \cdot 10^7 \int_{0,014}^{0,028} \frac{1 - 10,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{2,1}^2(\varepsilon)}{4,74 \cdot 10^{-5} \sigma^4 f_{2,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon +$$

$$+ 2,35 \cdot 10^7 \int_{0,03}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon +$$

$$+ 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/60,09}, \quad \varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}}$$

У розчині нітрофоски

$$N_p^{(K)} = 2,34 \cdot 10^{8-\sigma/47,81} + 7,76 \cdot 10^4 (\varepsilon_i + 0,93) + 4,18 \cdot 10^7 \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon,$$

$$\varepsilon_i = 2,21 - 2,06 \sqrt{1,15 + 127,86 \sigma^{-1} + 127,86 \sigma^{-1}}, \quad \varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}}$$

В органічному добриві

$$N_p^{(II)} = 6,12 \cdot 10^5 \int_{0,4}^1 \frac{1 - 1,51 \cdot 10^{-6} \sigma^2 f_{1,1}^2(\varepsilon)}{9,16 \cdot 10^{-9} \sigma^4 f_{1,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon +$$

$$+ 4,41 \cdot 10^7 \int_{0,014}^{0,028} \frac{1 - 10,86 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{2,1}^2(\varepsilon)}{4,74 \cdot 10^{-5} \sigma^4 f_{2,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 2,20 \cdot 10^7 \int_{0,03}^{\varepsilon_*} \frac{1 - 5,44 \cdot 10^{-5} \sigma^2 f_{3,1}^2(\varepsilon)}{3,79 \cdot 10^{-6} \sigma^4 f_{3,1}^4(\varepsilon) - 1} d\varepsilon + 1,51 \cdot 10^{8-\sigma/60,09},$$

$$\varepsilon_* = 2,33 - 2,32 \sqrt{1 + 225,38 \sigma^{-1} + 262 \sigma^{-1}},$$

$$f_{2,1}(\varepsilon_4) = 1,67 \sqrt{\varepsilon_4} (1 - 0,1 \varepsilon_4 + \varepsilon_4),$$

$$f_{1,1}(\varepsilon_3) = \sqrt{\varepsilon_3} [1 + 0,6 \exp(-0,21 \varepsilon_3^2)] (1,1 + 0,53 \varepsilon_3^2), \quad f_{3,1}(\varepsilon_5) = \sqrt{\varepsilon_5} [1,12 + 0,52 \sqrt{\varepsilon_5} (1 + 6,42 \varepsilon_5^2 - 6,53 \varepsilon_5^3 + 5,86 \varepsilon_5^4)].$$

За отриманими результатами побудовано графічні залежності ресурсу центральної балки тримкої системи від рівня напружень (рис. 13).

Використання розроблених моделей та методів, зокрема для оцінки ресурсу несучої системи РТД – 9 (виробництва ВАТ «Ковельсьільмаш»), забезпечило ряд

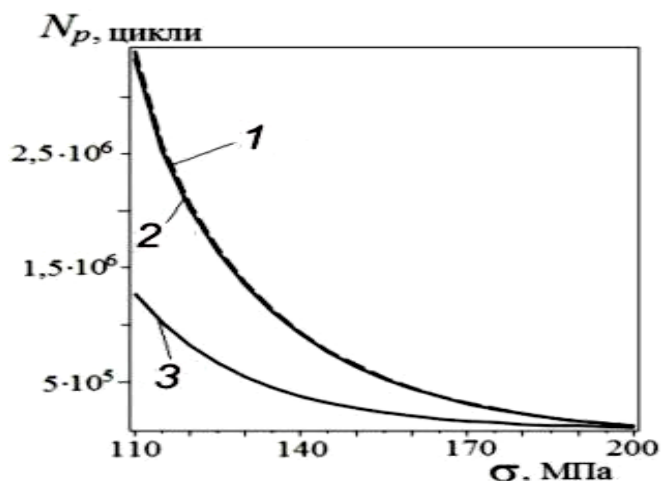


Рис. 13. Залежність ресурсу центральної балки металоконструкції розкидача добрив (квадратна труба) від рівня напружень: 1 - повітря; 2 - гноївка; 3 - нітрофоска

вдосконалень, що підтверджено актами впроваджень та патентами. Застосуванням запропонованої методики аналітично - експериментальної оцінки ресурсу несучих систем причіпних розкидачів добрив з урахуванням впливу агресивно - експлуатаційних середовищ проведено модернізацію розкидача РТД – 9 з встановленням рівномірного, без скачків за величиною зі зниженням до 25% розподілу напружень за периметром несучої системи з покращенням показників довговічності

і корозійно - втомної стійкості (рис. 11, рис. 12, рис. 13), зменшенням металоємності та підвищенням технологічності виготовлення тримкої металоконструкції машини для внесення добрив.

## 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  $\Omega$  – 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 втоми 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 металоемності на 62 кг. та значним підвищенням технологічності.

15. Результати теоретичних і експериментальних досліджень передано в ПАТ «Ковельсьільмаш» та впроваджено при удосконаленні розкидачів твердих добрив РТД – 9, рідких добрив РРД – 12. Розроблені методики впроваджено на ВАТ «Коломиясьільмаш» 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації у наукових фахових виданнях*

*Публікації у наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз*

1. Попович П. Особливості корозійної та корозійно-втомної поведінки сталі 20 у водних середовищах мінеральних та органічних добрив / П. Попович // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. № 10. – Т. 2. – С. 80 – 83. (Scopus).
2. 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. (Scopus).
3. 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. (Scopus).
4. 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. (Scopus).
5. R. A. Barna. The influence of Operating Environments on Fatigue Crack Grown 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. (Scopus).
6. Попович П.В. Розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії тривалого статичного навантаження і корозійного середовища / Попович П.В., Добровольська Л.Н. // Вісник ТНТУ. –2014. № 1(73). – С. 179-186. (Inspec).
7. Попович П.В. Вплив експлуатаційних середовищ на поширення поверхневих корозійно - втомних тріщин в елементах конструкцій сільськогосподарських машин / Попович П.В., Цьонь О., Довбуш Т. // Вісник ТНТУ.– 2014. № 3(75). – С. 157-166. (Inspec).

### *Публікації у наукових фахових виданнях України*

8. Попович П. Методика визначення ресурсу елементів металоконструкцій рам розкидачів добрив з врахуванням умов їх експлуатації / Попович П. // Вісник ЛНТУ.– Луцьк, 2014. – Вип. № 28. – С. 47-60.
9. Попович П.В. Напрямки досліджень корозійно - втомної довговічності металоконструкцій машин для внесення добрив / Попович П., Сташків М., Господарський Я. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2013.– Вип. № 134 .– С. 227-233.
10. Попович П.В. Підвищення корозійної стійкості металоконструкцій машин для рослинництва / Попович П., Рибак Т.І., Бортник І.М., ін. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2014. – Вип. № 145. – С. 46 - 55.
11. Попович П. Залишковий ресурс тонкостінних конструктивних елементів несучих систем сільськогосподарських машин при дії агресивних середовищ // Попович П., Хомик Н., Добровольська Л. / Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2014. – Вип. № 146.– С. 142 - 150.

12. Попович П.В. Комплексний аналіз надійності несучих систем тракторних причепів при їхній експлуатації / Попович П., Рибак Т. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2010. – Вип. № 93. – С. 411 - 414.
13. Попович П. Деформівно – напружений стан несучої системи розкидачів твердих органічних добрив РТД -14 / Попович П., Сікорський С. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2012. – Вип. № 128. – С. 304 - 309.
14. Попович П. Моделювання експлуатаційної навантаженості несучих систем розкидачів добрив типу ПРТ – 10 / Попович П., Сташків М.Я., Довбуш Т. // Вісник ХНТУСГ.– Харків, 2014. – Вип. № 151.– С. 367 - 372.
15. Рибак Т. Оцінка несучої здатності і залишкової довговічності мобільних с/г машин / Т. Рибак, П.Попович // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2008.– Вип. № 69. –С. 18 - 23.
16. 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».– Кіровоград, 2009. –Вип. № 39. – С. 40 – 47.
17. 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. – Київ, 2010. – Вип. № 144, частина 2. – С. 301 - 309.
18. Рибак Т. Аналітичні напрямки структуризації процесу циклічної навантаженості мобільних сільськогосподарських машин / Т. Рибак, В.Парацій, П.Попович // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2000. –Вип. № 7. – С.204 - 208.
19. Попович П. Дослідження НДС несучих систем важконавантажених мобільних с/г машин / Попович П., Сікорський С., Бабій А. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2012. – Вип. № 120. – С. 331 - 335.
20. Попович П. Імітаційне моделювання при розрахунках на квазістатичну міцність конструктивних структур важконавантажених сільськогосподарських машин / Попович П., Рибак Т., Довбуш Т., Цьонь Г., ін. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2013. –Вип. № 139. – С. 321 - 326.
21. Рибак Т.І. Оцінка надійності машин для хімічного захисту в рослинництві / Рибак Т.І., Попович П.В., Хомик Н.І., Бабій А.В. // Сільськогосподарські машини, збірник наукових статей ЛНТУ. – Луцьк, 2011. – Вип. № 21, Том 2.– С.31 - 36.
22. Т. Рибак. Використання кореляційних 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». – Кіровоград, 1999. Вип. № 28. – С. 158 - 164.
23. 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 ХНТУСГ. – Харків, 2009. – Вип. № 80. – С. 28 - 33.

24. Дівеев Б. Розрахунок та оптимізація одновісного причепа з підвіскою змінної жорсткості / Дівеев Б., Попович П., Керницький І. / Вісник ЛНТУ.– Луцьк, 2012. – Вип. № 37. – С. 86 - 91.
25. 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. – Харків, 2012. – Вип. № 121. – С. 251 - 256.
26. Рибак Т. Моделювання міцності елементів металоконструкцій с/г машин при стендових випробуваннях // Рибак Т., Попович П., Хомик Н., Цьонь О. / Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2012. – Вип. № 122. – С. 198 - 204.

### *Патенти*

27. 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.
28. Попович П. Пат. України на корисну модель 92328, 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 11.08.2014р. Заявл. 18.03.2014 р.; опубл. 11.08.2014 р. Бюл. №15 2014р.
29. 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.

### *Матеріали і тези наукових конференцій у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз*

30. P. Popovich. Remaining resource of bearings frames of machine-building constructions / P. Popovich, T. Rybak // Metalurgija. – Zagreb, 2010. Vol. 49 (2010), br. 3. – P. 237.
31. P. Popovich. Experimental kinetic investigation of the fatigue cracks development of steelwork in ammonia water / P. Popovich, S. Sikorskyi // Metalurgija. – Zagreb, 2012. –Vol. 51 (2012), br.3. – P. 411.

### *Матеріали і тези наукових конференцій*

32. Підгурський Н. Прогнозирование и обеспечение усталостной надежности несущих конструкций мобильных машин / Підгурський Н., Сташків Н., Попович П. // Международен конгрес «Машиностроителни технологии» International congress “Mechanical engineering technologies’04”.– Varna, 2004.– Vol. 6.– С.139 - 142.
33. 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 сільськогосподарських машин “DSR AM-I”. – Тернопіль, 2004. – С.636 - 642.

34. 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, 2011. – С. 137 - 140.
35. Попович П. Формирование расчетных оценок нагруженности машиностроительных металлоконструкций / Попович П., Сикорский С. Цьонь О. // Сборник материалов «Механические свойства современных конструкционных материалов». – Москва, 2012. – С. 195 - 197.
36. Попович П. Моделирование нагруженности машиностроительных металлоконструкций рабочей средой / Попович П., Сикорский С. // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-11. – Москва, 2011. – С. 787 - 789.
37. Рыбак Т. Определение характеристик усталостного разрушения при сложном напряженном состоянии / Рыбак Т. Попович П. Сташків М., и др. // Материалы третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-09. – Москва, 2009. – С. 95 - 96.
38. Попович П. Надійність несучих металоконструкцій розкидачів органічних добрив / Попович П., Рыбак Т., Бабий А., Цьонь О. // Праці «10 міжнародного симпозіуму українських інженерів - механіків у Львові». – Львів, 2011. – С. 360-361.
39. Попович П. Експериментальне забезпечення досліджень тріщиностійкості металоконструкцій несучих рам сільськогосподарських транспортних засобів / Попович П., Рыбак Т., Сташків М. // Праці «9 міжнародного симпозіуму українських інженерів - механіків у Львові». – Львів, 2009. – С. 95 - 97.
40. 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.
41. 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, 2010. – С. 107 - 112.
42. Попович П. Моделирование нагруженности винтовой поверхности вращающихся частей металлоконструкций / Попович П., Сикорский С. // Сборник материалов I всероссийской научно - технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы». – Рубцовск, 2011. – С. 298 - 302.
43. Рыбак Т. Оценка несущей способности и остаточной долговечности металлоконструкций в машиностроении / Рыбак Т., Попович П. Мотрук С. // Сборник материалов конференции «XIX Петербургские чтения по проблемам прочности». – Санкт-Петербург, 2010. – С. 330.
44. П. Попович. Особенности оценки несущей способности и долговечности машиностроительных конструкций / П. Попович, С. Сикорский, Р. Халилов. // Тезисы докладов VIII международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения». – Гомель, 2010. – С. 32.



## АНОТАЦІЯ

**Попович П.В. Методи оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивних середовищ.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2014.

У дисертаційній роботі на основі сукупності одержаних результатів вирішено актуальну науково – технічну проблему, яка полягає у розробці нової концепції аналітично – експериментальних методів оцінки і підвищення ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням впливів агресивно – експлуатаційних факторів. На основі підходів термодинаміки і механіки втомного поширення тріщин розроблено ефективні розрахункові моделі для визначення періоду докритичного росту корозійно - механічних пошкоджень в несучих елементах металоконструкцій причіпних розкидачів добрив при дії експлуатаційних навантажень і агресивних робочих середовищ. Розроблено ефективний метод наближеного обчислення КІН при довільному навантаженні поверхневих корозійних пошкоджень в замкнутих профілях несучих системах розкидачів добрив. Встановлено впливи робочих середовищ і експлуатаційної навантаженості на процеси і характеристики втомного руйнування, циклічної тріщиностійкості, корозійної та електрохімічної поведінки ряду матеріалів несучих металоконструкцій розкидачів добрив. Розроблено алгоритм комплексної розрахунково-експериментальної оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з урахуванням агресивно – експлуатаційних факторів.

Результати досліджень використовують проектно-конструкторські організації в процесі удосконалення існуючих і розробці нових причіпних розкидачів добрив і сільськогосподарських причепів.

**Ключові слова:** розкидачі добрив, несучі системи, експлуатаційне навантаження, математична модель, тріщини, ресурс конструкцій.

## АННОТАЦИЯ

**Попович П.В. Методы оценки ресурса несущих систем прицепных машин для внесения удобрений с учетом воздействия агрессивных сред.** - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2014.

В диссертационной работе на основе совокупности обобщенных результатов решена актуальная научно - техническая проблема, которая заключается в разработке новой концепции аналитически - экспериментальных методов оценки и повышения ресурса несущих систем прицепных машин для внесения удобрений с учетом воздействия агрессивно - эксплуатационных факторов. Разработаны методы расчета ресурса несущих систем мобильной сельскохозяйственной техники с

позиций механики разрушения, основанные на математическом моделировании явлений разрушения при зарождении и развитии трещин под влиянием коррозионно - эксплуатационных факторов. На основе термодинамики и механики усталостного распространения трещин разработаны эффективные расчетные модели для определения периода докритического роста коррозионно-механических повреждений в несущих элементах металлоконструкций прицепных разбрасывателей удобрений при воздействии эксплуатационных нагрузок и агрессивных рабочих сред. Разработана совокупность математических соотношений в виде нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с обоснованными начальными и конечными условиями для определения остаточной долговечности тонкостенных элементов конструкций разбрасывателей удобрений с поверхностными трещинами. Разработан эффективный метод вычисления КИН при произвольной нагрузке поверхностных трещин в замкнутых профилях несущих систем разбрасывателей удобрений. Разработана методика определения ресурса несущих систем металлоконструкций прицепных разбрасывателей удобрений в условиях эксплуатации, проведена адаптация данной методики для определения долговечности наиболее распространенных для машин указанного типа открытых и замкнутых профилей при совместных воздействиях сред органических и минеральных удобрений и циклических рабочих нагрузок. Определены влияния рабочих сред и эксплуатационной нагруженности на процессы и характеристики усталостного разрушения, также циклической трещиностойкости материалов несущих металлоконструкций разбрасывателей удобрений. Определено, что растворы минеральных удобрений уменьшают сопротивление усталости машиностроительных сталей для нагрузок всех уровней, при этом предел выносливости снижается по сравнению с воздухом в 2,2 (сульфат аммония) и в 2,5 (нитрофоска) раза, влияние органических удобрений на предел выносливости на 8% слабее по сравнению с дистиллированной водой.

Разработан алгоритм комплексной расчетно-экспериментальной оценки ресурса несущих систем прицепных разбрасывателей удобрений с учетом агрессивно - эксплуатационных факторов. На основе комплексных исследований предложена модернизация несущей системы разбрасывателя удобрений РТД - 9 при которой обеспечивается равномерное по величине, с уменьшением до 25% без сачков, распределение напряжений в сечениях по контуру несущей системы, улучшены показатели долговечности с одновременным уменьшением металлоемкости на 62 кг. и значительным повышением технологичности.

**Ключевые слова:** разбрасыватели удобрений, несущие системы, эксплуатационная нагрузка, математическая модель, трещины, ресурс конструкций.

### **Annotation**

***Popovich P.V. Methods of determining the operating-life of towed fertilizers' bearing systems under durable aggressive environments.*** – Manuscript.

Dissertation is submitted for the scientific degree of Doctor of Sciences (Engineering) in specialism 05.05.11 – machines and means of the agricultural production mechanization. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2014.

Based on the incorporated generalized results, the urgent scientific and technical problem of developing the new conception of analytical-experimental evaluating and improving the operating life of towed fertilizers' bearing systems subjected to corrosive - operational factors is solved .

Based on the approach of thermodynamics and mechanics of fatigue crack propagation, the efficient computational models for determining the period of subcritical growth of corrosion-mechanical damages in the bearing metal structures of towed fertilizers under the action of operating loads and harsh working environments are developed. The effective method of SIF approximate calculation for arbitrary loading of surface corrosion damage in closed profiles of fertilizer bearing systems is developed as well.

The influence of working environments and operating load on the processes and characteristics of fatigue, fatigue crack growth resistance, corrosion and electrochemical behavior of many materials of fertilizer bearing metal structures is substantiated. The algorithm of complex calculating and experimental evaluating the operating life of towed fertilizers' bearing systems subjected to corrosive - operational factors is developed.

The research results can be used by design organizations to improve the existing towed fertilizers and agricultural trailers as well as to develop the new ones.

**Keywords:** fertilizer, bearing systems, operational loading, mathematical model, cracks, resource of constructions.