

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ШИНГЕРА НАТАЛІЯ ЯРОСЛАВІВНА

УДК 519.856.3; 519.246

**СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТИПОВОЇ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ
ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Тернопіль – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
Щербак Леонід Миколайович,
Національний авіаційний університет,
Інститут інформаційно-діагностичних систем (м. Київ),
професор кафедри інформаційно-вимірювальних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Власюк Анатолій Павлович,
Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне),
завідувач кафедри прикладної математики;

кандидат технічних наук, доцент
Юзефович Роман Михайлович,
Фізико-механічний інститут імені Г. Карпенка НАН України (м. Львів), завідувач відділу відбору та обробки стохастичних сигналів

Захист відбудеться «_____» лютого 2012 р. о _____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

Автореферат розісланий «_____» січня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Б. Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зварні фермові конструкції на сучасному етапі знаходять широке застосування в техніці і будівництві. Їх використовують для дахового перекриття будівель, металоконструкцій мостів, підймальних кранів, опор ліній електропередач, підвісних конвеєрів тощо. Порушення їх цілісності, як правило, зумовлює значні руйнування з важкими наслідками. Враховуючи значний обсяг використання зварних ферм, їх роль в конструкції, високу матеріаломісткість і вартість, розв'язання наукового завдання, яке полягає у визначенні їх залишкового ресурсу, на сьогодні є важливим і актуальним.

Результати розрахунків залишкового ресурсу зварних ферм за існуючими методиками дають низький рівень збіжності з експлуатаційними даними. Зумовлюється це неврахуванням комплексного впливу таких стохастичних факторів, як навантаження, характеристики основного матеріалу, ділянки зварного шва і наколошовної області, температурні деформації, вітрові навантаження, корозійне пошкодження, аварійні перевантаження тощо.

Сучасні науково-технічні підходи дають можливість отримати точніші значення залишкового ресурсу зварних ферм з урахуванням багатофакторного впливу стохастичних чинників шляхом побудови та дослідження статистичних моделей, а отже, звести до мінімуму вплив інженерних необґрунтованих рішень і отримати вищу збіжність розрахункових результатів з фактичними, визначеними за наслідками експлуатації конструкції чи її натурних випробувань.

Імовірнісні аспекти росту втомних тріщин у суцільних ізотропних матеріалах наведено у працях Яреми С.Я., Красовського А.Я., Ориняка І.В., Бородія М.В., Махутова Н.А., Сосновського Л.А., Когаєва В.П., Афанасьєва Н.Н., Lin Y., Ditlevsen O., Toyoda-Makino M., Tanaka H. та ін. Статистичний підхід до оцінювання пошкоджуваності зварних з'єднань та елементів конструкцій описано в роботах Патона Б.Є., Лобанова Л.М., Махненка В.І., Лепіхіна А.М., Голубєвої О.В., Плотнікової О.С., Кіма І.В., Тімофєєва Б.Г., Hobbacher A., Kirkner D., Bastenire F. та ін.

За результатами аналізу наукових публікацій щодо визначення залишкового ресурсу зварних ферм під впливом циклічних навантажень із використанням статистичної моделі комп'ютерним імітаційним експериментом виявлено відсутність:

- багатофакторних статистичних моделей, які б враховували комплексний вплив багатьох стохастичних чинників на залишковий ресурс конструкції;
- систематизованих баз даних про механічні характеристики конструкційних матеріалів, ділянок зварних швів і областей термічного впливу, отриманих як зі стандартів та сертифікатів якості, так і за результатами натурних досліджень за стандартизованими методиками;
- інформаційного забезпечення про динаміку формування залишкового ресурсу повномасштабних зварних ферм чи їх фізичних моделей, отриманого за результатами натурних досліджень конструкцій.

Розроблення статистичної моделі для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях та використання для неї вхідного інформаційного забезпечення, сформованого за наслідками натурних досліджень матеріалів та конструкцій, забезпечує виконання комп'ютерного імітаційного моделювання за методом Монте-Карло і отримання значень залишкового ресурсу конструкції з вищою достовірністю, ніж за існуючими методиками.

Отримані в роботі результати досліджень розв'язують конкретне наукове завдання, що має істотне значення для техніки, а саме, дають можливість визначити залишковий ресурс типової зварної ферми під дією циклічних навантажень з високою достовірністю, забезпечивши безаварійне функціонування конструкції до повного вичерпування її ресурсу.

Наведене вище свідчить, що тема дисертації є актуальною і має важливе наукове і прикладне значення, оскільки орієнтована на розв'язання конкретного наукового завдання шляхом розроблення і дослідження статистичної моделі, що є основою для створення методу визначення залишкового ресурсу зварних ферм при циклічних навантаженнях на стадії поширення втомних тріщин з урахуванням комплексного багатofакторного впливу стохастичних чинників з вищою достовірністю, ніж за існуючими методиками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з науково-дослідними темами, які виконувалися в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя в рамках державної бюджетної теми Міністерства освіти і науки України ДІ 172-10 «Інформаційно-обчислювальна система обліку, аналізу та прогнозу енергоносіїв в задачах підвищення ефективності енергозбереження» (номер державної реєстрації 0110U022262) та теми ВК 21-06 «Математичне моделювання, методи обробки та імітації циклічних сигналів в інформаційних системах» (номер державної реєстрації 0106U009380).

Особистий внесок автора в перерахованих НДР як виконавця полягає у визначенні ймовірнісних закономірностей і статистичних характеристик інформаційних масивів, отриманих за результатами натурних досліджень, формуванні статистичної моделі, її дослідженні, розробленні алгоритму та програмного забезпечення для практичного застосування результатів в інженерній практиці.

Мета дослідження – розроблення статистичної моделі для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми під дією циклічних навантажень з урахуванням комплексного впливу стохастичних чинників і визначення залишкового ресурсу досліджуваної конструкції на стадії поширення втомної тріщини з використанням цієї моделі методом комп'ютерного моделюючого експерименту.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати відомі ймовірнісні підходи до визначення залишкового ресурсу зварних ферм на стадії поширення втомних тріщин та виявити причини неузгодженості розрахункових і фактичних результатів;

2) розробити фізичну модель типової зварної ферми та отримати базу даних кінетики її втомної пошкоджуваності при комплексному впливі стохастичних чинників за результатами натурних досліджень конструкції, обчислити геометричні та силові константи подібності розробленої фізичної моделі;

3) запропонувати багатофакторну статистичну модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми на стадії поширення втомних тріщин під дією циклічних навантажень з урахуванням комплексного впливу стохастичних чинників;

4) сформувані базу даних стохастичних чинників для запропонованої статистичної моделі за результатами власних натурних досліджень і досліджень інших авторів для використання її в якості вхідного інформаційного забезпечення при імітаційному моделюванні;

5) порівняти вхідні бази даних статистичної моделі для стохастичних чинників, зокрема механічних характеристик сталі ВСтЗпс, отримані за результатами натурних досліджень, сертифікатами якості й стандартами, та визначити рівень їх збіжності;

6) розробити алгоритм і програмне забезпечення для комп'ютерного імітаційного моделювання за методом Монте-Карло на основі запропонованої статистичної моделі, виконати комп'ютерне імітаційне моделювання з використанням цієї статистичної моделі і сформованого вхідного інформаційного забезпечення, обчислити залишковий ресурс типової зварної ферми під дією циклічних навантажень з врахуванням комплексного багатофакторного впливу стохастичних чинників;

7) виконати верифікацію значень залишкового ресурсу типової зварної ферми, отриманих імітаційним моделюванням за методом Монте-Карло, та визначити рівень їх узгодженості з результатами натурального дослідження конструкції;

8) навести приклади практичної реалізації статистичних підходів для оцінювання залишкового ресурсу реальних зварних фермових конструкцій при експлуатації їх під дією циклічних навантажень.

Об'єкт дослідження – процес пошкодження типової зварної ферми під дією циклічних навантажень.

Предмет дослідження – багатофакторна статистична модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми на стадії поширення втомної тріщини, фізична модель зварної ферми, бази даних пошкоджуваності матеріалів і зварних конструкцій та їх статистичні характеристики.

Методи дослідження: фізичне моделювання для розроблення дослідного зразка ферми, натурний експеримент для дослідження властивостей матеріалів та фізичних моделей, математична статистика для статистичного оброблювання результатів натурних експериментів, теорія випадкових процесів для визначення статистичних закономірностей розподілу результатів експериментів, метод Монте-Карло для виконання комп'ютерного моделюючого експерименту і визначення залишкового ресурсу.

Наукова новизна одержаних результатів роботи:

1) вперше одержано статистичну модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях, яка, на відміну від існуючих, враховує багатофакторний комплексний вплив стохастичних чинників і базується на експериментально отриманих вхідних базах даних, що забезпечує вищу узгодженість показників залишкового ресурсу, визначених імітаційним моделюванням, з результатами натурних досліджень, ніж за існуючими методиками;

2) удосконалено методику статистичного моделювання для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми шляхом розроблювання й дослідження фізичної моделі конструкції, що дає можливість виявити поведінку ферми за результатами напівнатурного експерименту й виконати верифікацію результатів імітаційного моделювання;

3) дістало подальший розвиток інформаційне забезпечення статистичної моделі для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми, отримане за результатами натурних досліджень механічних властивостей сталі ВСтЗпс, ділянок зварного шва й термічного впливу, фізичної моделі зварної ферми, що дає можливість досягти вищої точності й мінімальної дисперсії розрахункового значення залишкового ресурсу типової зварної ферми при виконанні комп'ютерного моделюючого експерименту.

Практичне значення одержаних результатів

Отримані автором теоретичні результати доведено до конкретної інженерної методики. Розроблено алгоритм імітаційного моделювання за методом Монте-Карло для визначення залишкового ресурсу зварної ферми при дії циклічних навантажень та програмне забезпечення для його реалізації комп'ютерним моделюючим експериментом. Вказані методики, алгоритм і програмне забезпечення дають можливість на їх основі створювати прикладні програмні модулі для застосування в системі автоматизованого проектування зварних фермових конструкцій. Використання результатів роботи є доцільним для розрахунку періодичності обстеження й ремонту зварних ферм у процесі їх експлуатації.

Теоретичні та практичні результати, отримані у дисертаційній роботі, впроваджені:

– ТОВ «Агата Стальконструкція» для визначення залишкового ресурсу зварних ферм будівельного призначення, які підприємство виготовляє і обслуговує впродовж їх експлуатації (довідка № 314 від 01.09.2011 р.);

– ПМП «РОСТ» для визначення залишкового ресурсу, термінів технічних оглядів та ремонтів фермової конструкції козлового підйимального крана (довідка № 91 від 20.09.2011 р.);

– ТОВ «Електропром» для планування періодичності перевірки технічного стану й ремонту фермових конструкцій (довідка № 37 від 06.09.2011 р.);

– Тернопільським національним технічним університетом імені Івана Пулюя в навчальному процесі з курсу «Будівельні металоконструкції» як один з

методів оцінювання залишкового ресурсу металевих зварних ферм на стадії поширення втомної тріщини (довідка № 2087 від 20.09.2011 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: розроблено статистичну модель зварної ферми, проаналізовано методи дослідження залишкового ресурсу конструкції, виявлено їх переваги і недоліки [1], вибрано об'єкт досліджень – зварні фермові конструкції опор ЛЕП, виявлено закон розподілу залишкового ресурсу, виконано комп'ютерне імітаційне моделювання втомного пошкодження ферми [2], опрацьовано експериментально отримані інформаційні масиви, визначено їх статистичні характеристики [3], вибрано конструкцію типової зварної ферми, обґрунтовано завдання дослідження, проаналізовано стохастичні чинники [4], виконано статистичне опрацювання експериментальних результатів, побудовано та проаналізовано діаграму деформування та зведений графік результатів натурного й комп'ютерного моделюючого експериментів [6], розроблено формулу корисної моделі та реферат до заявки на корисну модель [7], виконано аналіз експериментальних результатів, визначено статистичні характеристики отриманих баз даних [12], визначено геометричні та силові коефіцієнти фізичного моделювання, застосовано теорію подібності фізичного моделювання зварних ферм [13], виявлено і сформульовано статистичні особливості втомного пошкодження зварних ферм [15], визначено мету досліджень, зроблено висновок за результатами досліджень [1-4, 6, 12, 13, 15].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційних досліджень доповідались і обговорювались на Всеукраїнській студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопіль, 2008), Всеукраїнській науковій конференції в Тернопільському державному технічному університеті імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2009), щорічній науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів із застосування інформаційних технологій в енергетиці в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Київ, 2009), І науково-технічній конференції в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології» (Тернопіль, 2011), науково-технічній конференції в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» (Тернопіль, 2011), II Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль, 2011), XV науковій конференції в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, 14–15 грудня 2011р.

Наукові результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових семінарах факультету комп'ютерно-інформаційних систем (2008-2011), а також на розширеному міжкафедральному семінарі у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (2011).

Публікації. Результати дисертації відображені у 15 публікаціях: 6 статей у провідних фахових журналах (з них 1 – без співавторів), 1 патент, 8 тез доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів оригінальних досліджень, висновків, списку використаних джерел та додатків. Вона містить 165 сторінок, із них 124 сторінки основного тексту, 57 рисунків, 3 таблиці на окремих аркушах, список використаних джерел зі 139 найменувань на 16 сторінках, 5 додатків на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, показано зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, впровадження та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** обґрунтовано ймовірнісну природу формування ресурсу зварних ферм. Проаналізовано обчислювальні методи та моделі для визначення їх залишкового ресурсу за умов циклічних навантажень з урахуванням імовірнісної природи втомного пошкодження.

У механіці за умови дії на елементи зварної конструкції циклічних навантажень залишковий ресурс за напрацюванням $N_{\Delta l}$ визначається як кількість циклів навантажування від моменту виявлення початкової тріщини довжиною l_0 до моменту досягнення нею критичної довжини l_c , що відповідає настанню граничного стану конструкції і є функцією багатьох аргументів, у т.ч. і стохастичних:

$$N_{\Delta l} = f(l_0, l_c, \sigma_{\max}, \sigma_T, K_{fc}, K_{th}, \dots),$$

де $\sigma_{\max}$ – максимальні напруження в циклі; σ_T – межа текучості матеріалу; K_{fc} – циклічна в'язкість руйнування матеріалу; K_{th} – пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) при циклічному навантаженні.

Ці аргументи в комплексному поєднанні формують певну кінетику втомного пошкодження, яка характеризується швидкістю поширення тріщини впродовж циклічного навантаження $V = f_1(l_0, l_c, \sigma_{\max}, \sigma_T, K_{fc}, K_{th}, \dots)$, (мм/цикл). Під циклом розуміють неперервну функцію часу, яка описує періодичність зміни навантаження. Отже, залишковий ресурс визначається за формулою

$$N_{\Delta l} = \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{f_1(l_0, l_c, \sigma_{\max}, \sigma_T, K_{fc}, K_{th}, \dots)}. \quad (1)$$

Дослідження залишкового ресурсу статистичним моделюванням на основі відомих кінетичних рівнянь росту втомних тріщин для зварних підкранових балок, які експлуатуються при циклічних навантаженнях, виконані в роботах Кіма І.В. (рис. 1). В залежності (1) використано відомі формули для визначення швидкості поширення втомної тріщини. Очевидною є неоднозначність результатів моделювання і низька достовірність розрахунків. Збіжність

результатів моделювання при порівнянні математичних сподівань за формулою Періса-Ердогана (лінія 2) і результатів експлуатації підкранових балок (лінія 6) становить усього 0,45.

За результатами аналізу відомих досліджень виявлено низький рівень збіжності розрахункових значень залишкового ресурсу зварних ферм у порівнянні з результатами натурних експериментів або їх фактичної експлуатації. Основними причинами малої точності обчисленого значення залишкового ресурсу є невідповідність розрахункових формул, які описують кінетику втомного пошкодження для умов досліджуваних зварних конструкцій, використаних для залежності (1), та неврахування в існуючих розрахункових методиках комплексного впливу багатьох стохастичних чинників.

На основі проведеного аналізу сформульовано завдання дисертаційної роботи. Основним заданням роботи є визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми комп'ютерним імітаційним моделюванням із використанням розробленої статистичної моделі і вхідного інформаційного забезпечення для неї, отриманого за результатами натурних досліджень матеріалу ферми та розробленої фізичної моделі конструкції (рис. 2).

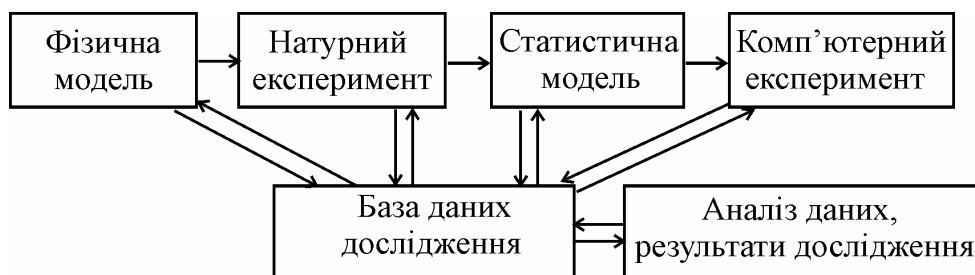


Рис. 2. Структурна схема дослідження залишкового ресурсу зварних ферм

У другому розділі розглянуто базові положення для розроблення фізичної моделі типової зварної ферми, а саме, принципи ідентифікації й подібності та особливості статистичної теорії подібності втомного пошкодження.

Наведено теоретичні основи досліджень залишкового ресурсу типової зварної ферми статистичним моделюванням. Запропоновано структурну схему статистичної моделі (рис. 3).

Проаналізовано відомі аналітичні залежності, які описують кінетику втомного пошкодження матеріалів та елементів конструкцій, умови їх

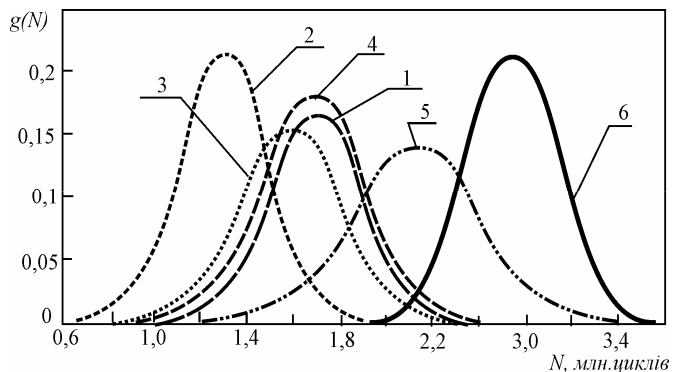


Рис. 1. Щільність розподілу ресурсу зварних підкранових балок:

- за результатами статистичного моделювання з використанням різних розрахункових залежностей (1 – формула Періса; 2 – формула Періса-Ердогана; 3 – формула Періса-Елбера; 4 – формула Іванової; 5 – формула Шанявського-Орлова-Караєва);
- за результатами експлуатації підкранових балок (лінія 6)

отримання та застосування (Forman R., Воробйов А.З., Ярема С.Я., Erdogan E., Mc. Evily A., Freudental A., Chu H., Branco C., Лепіхін А.М., Колесніков В.А.).

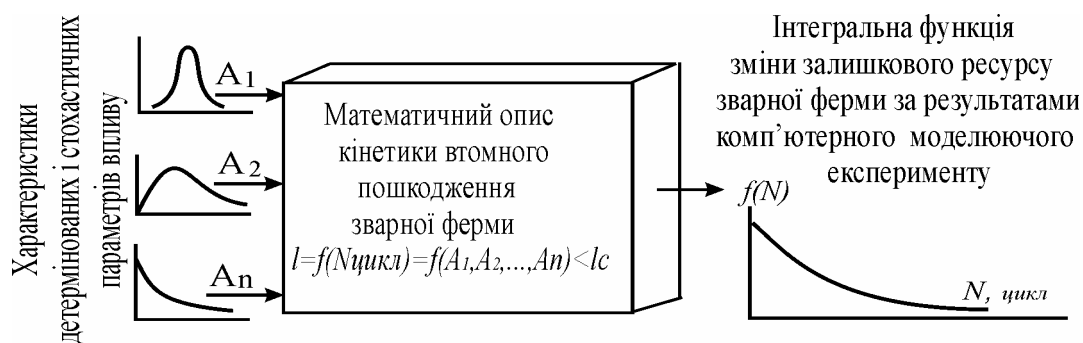


Рис. 3. Структурна схема статистичної моделі для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми

За результатами проведених досліджень обґрунтовано доцільність використання для визначення залишкового ресурсу за формулою (1) кінетичного рівняння, розробленого та перевіреного для поширення втомної тріщини в елементах зварних конструкцій при дії двочастотних циклічних навантажень (Лепіхін А.М., 2002 р.), у вигляді (2).

$$V(l) = \frac{dl}{dN} = \frac{q\pi}{8} \left(\frac{K_{th}}{\sigma_T} \right)^2 \left[1 + (1-\beta) \frac{\left(1 - \overline{K}_{th}^2\right)^2 - \left(\overline{K}_{max}^2(l) - \overline{K}_{th}^2\right)^2 \omega \mu^4}{\left(\overline{K}_{max}^2(l) - \overline{K}_{th}^2\right)^2 \omega \mu^4} \right]^{1/(\beta-1)}, \quad (2)$$

де $\overline{K}_{max} = K_{max} / K_{fc}$; $\overline{K}_{th} = K_{th} / K_{fc}$; K_{max} – максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) при поточній довжині тріщини $l_i < l_c$, $K_{max} = f(l_i)$; q – коефіцієнт, що враховує, яку частину пластичного ядра становить циклічна пластична зона для втомної тріщини; β – параметр циклічного зміцнення матеріалу; μ – коефіцієнт впливу виду напруженого стану конструкції; ω – коефіцієнт впливу високочастотного навантаження (при двочастотному спектрі).

Перевагою цієї залежності в порівнянні з іншими відомими є відсутність емпіричних складових і можливість застосування при двочастотному навантаженні досліджуваної конструкції. Саме за умов двочастотних циклічних навантажень працюють більшість зварних ферм. До експлуатаційних циклічних навантажень додаються власні коливання конструкції, вітрові навантаження, температурні деформації тощо.

Максимальне значення КІН у перерізі, ослабленому тріщиною довжиною l , визначають за класичною залежністю

$$K_{max}(l) = \sigma_{max} \sqrt{\pi \cdot l} f_{\kappa}(l), \quad (3)$$

де $f_{\kappa}(l)$ – поправкова функція, яка враховує геометричні особливості зварної конструкції.

Проведені дослідження дали можливість обґрунтувати аналітичну залежність для статистичної моделі, що визначатиме залишковий ресурс типової зварної ферми за напрацюванням, у вигляді (4).

$$N_{\Delta} = \int_{l_0}^{l_c} \frac{8}{\pi q} \left(\frac{\sigma_T}{K_{th}} \right)^2 \left\{ 1 + (1-\beta) \frac{\left[1 - \left(\frac{K_{th}}{K_{fc}} \right)^2 \right]^2 - \left[\left(\frac{\sigma_{\max} \sqrt{\pi l f_{\kappa}(l)}}{K_{fc}} \right)^2 - \left(\frac{K_{th}}{K_{fc}} \right)^2 \right]^2 \omega \mu^4}{\left[\left(\frac{\sigma_{\max} \sqrt{\pi l f_{\kappa}(l)}}{K_{fc}} \right)^2 - \left(\frac{K_{th}}{K_{fc}} \right)^2 \right]^2 \omega \mu^4} \right\}^{-1/(\beta-1)} dl, \quad (4)$$

де межі інтегрування l_0 і l_c – відповідно початкова та кінцева довжини тріщини (від моменту появи втомної тріщини до досягнення нею критичного розміру, що характеризує настання граничного стану).

Залежність для визначення поправкової функції для зварних балкових конструкцій розроблено в роботі Кіма І.В. –

$$f_{\kappa}(l) = 1,514 \cdot l^{-0,381} \exp(1,847 h_1 - 142,429 h_1^2 - 0,0964 l n^2 - 0,013 l n^3), \quad (5)$$

де h_1 – відстань від тріщини до верхнього пояса балки, мм; n – параметр, який залежить від умов навантажень ($n=0,3$).

Критичне значення довжини тріщини l_c можна визначити за допомогою одного з відомих програмних пакетів, наприклад ANSYS, який алгоритмічно базується на методі скінчених елементів.

Методично залишковий ресурс типової зварної ферми з урахуванням комплексного багатофакторного впливу стохастичних чинників визначається шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання за методом Монте-Карло з використанням розробленої статистичної моделі та сформованого вхідного інформаційного забезпечення для стохастичних чинників. Для виконаного в дисертації дослідження враховано стохастичну природу таких величин, що входять у залежність (4): початкова довжина тріщини l_0 ; межа текучості матеріалу σ_T ; критичний КІН матеріалу при циклічному навантаженні K_c , який визначає l_c ; максимальні напруження в циклі $\sigma_{\max}$.

Для формування інформаційного забезпечення комп'ютерного моделюючого експерименту розроблено оригінальну методику натурного дослідження фізичної моделі типової зварної ферми з використанням запатентованого здобувачем пристосування для сертифікованого сервогідравлічного технічно-програмного комплексу СТМ-100 виробництва АНТК «Антонов» (м. Київ). Комп'ютерне програмне керування ходом натурних досліджень та оброблювання отриманих баз даних на випробувальному комплексі реалізується за допомогою прикладного пакета «ПОИСК».

У третьому розділі розроблено конструкцію фізичної моделі типової зварної ферми (рис. 4) та схему її навантажування для досліджень (рис. 5).

За розробленими статистичними планами натурних випробувань визначено мінімально допустиму кількість зразків $N=15$ штук, які забезпечують отримання результатів з граничною відносною похибкою $\delta=0,1$ при довірчій імовірності $\gamma=0,9$.

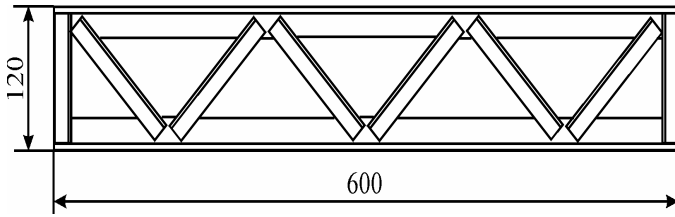


Рис. 4. Конструкція фізичної моделі зварної ферми

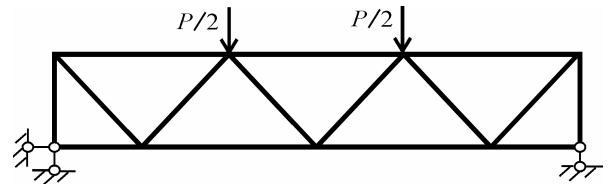


Рис. 5. Схема навантажування фізичної моделі зварної ферми

Проаналізовано відомі експериментальні результати пошкоджуваності повномасштабних зварних ферм різної конфігурації та довжини (18...24 м). Виявлено їх суттєву неузгодженість (0,61...0,77) із розрахунковими даними. Порівнюючи повномасштабні зварні ферми і розроблену фізичну модель, визначено геометричні й силові константи подібності фізичного моделювання.

Виконано серію натурних досліджень зразків фізичної моделі типової зварної ферми (рис. 4) за розробленою схемою навантажування (рис. 5), яку реалізовано на випробувальному комплексі СТМ-100 зі вказаними в табл. 1 та на рис. 6 режимами випробувань.

Таблиця 1

Режими циклічного навантажування фізичної моделі типової зварної ферми при натурному дослідженні її ресурсу

Параметри	Значення
Середнє навантаження низькочастотного циклу	$P_m = 10$ кН
Максимальне навантаження низькочастотного циклу	$P_{max} = 15$ кН
Мінімальне навантаження низькочастотного циклу	$P_{min} = 5$ кН
Амплітуда навантаження низькочастотного циклу	$2P_1 = 10$ кН
Частота низькочастотного циклу навантажування	$\omega_1 = 1$ Гц
Амплітуда накладеного високочастотного навантаження	$2P_2 = 4$ кН
Частота накладеного високочастотного навантажування	$\omega_2 = 30$ Гц

За результатами цих досліджень отримано бази даних, визначено їх статистичні характеристики та побудовано гістограми пошкодження до появи візуально помітної тріщини (рис. 7, лінія 1) та руйнування (рис. 7, лінія 2) дослідного зразка зварної ферми.

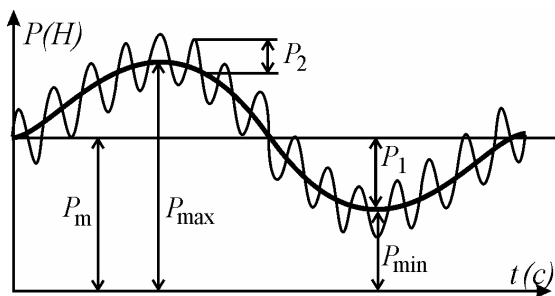


Рис. 6. Графік двочастотних (високо- і низькочастотних) циклічних навантажень при натурних випробуваннях зварних ферм

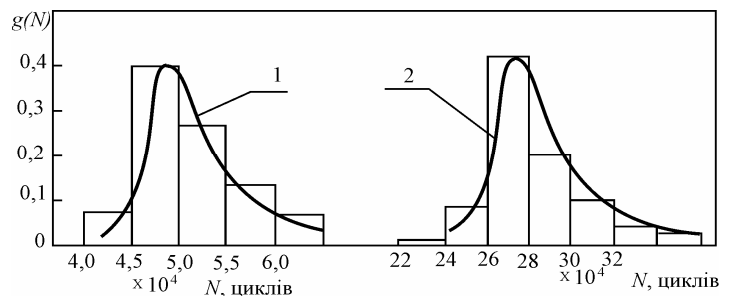


Рис. 7. Гістограми та щільності пошкодження (1) і руйнування (2) зварних ферм за результатами натурного дослідження

Отримані бази даних використано в якості інформаційного забезпечення для статистичної моделі при реалізації комп'ютерного моделюючого експерименту та при виконанні верифікації результатів моделювання.

Натурним експериментом за стандартизованими методиками визначено механічні характеристики сталі ВСт3пс при статичному розтягуванні 21 стандартного суцільного та 21 зварного зразка, вирізаних з кутникового металопрокату 25x25x4 мм. Виконано статистичне оброблювання отриманих результатів (табл. 2) та перевірку узгодженості дослідного і теоретичного закону розподілу випадкової величини межі текучості за критерієм Пірсона χ^2 .

Таблиця 2

**Статистичні характеристики механічних властивостей
сталі ВСт3пс за ДСТУ 380-2005 (1), сертифікатами якості виробника (2),
результатами прямого натурного експерименту розтягом (3) та
експериментально визначеними значеннями твердості НВ (4)**

Дослід- жувана ділянка	Механічні властивості	Дже- рело інфор- мації	Статистичні характеристики		
			Вибіркове середнє значення	Вибіркове середнє квадр. відхилення	Дисперсія
Основний матеріал	Межа текучості	1	240 МПа	1,67 МПа	2,79 МПа ²
		2	313 МПа	9,27 МПа	85,9 МПа ²
		3	273 МПа	8,45 МПа	71,4 МПа ²
		4	270 МПа	6,54 МПа	42,8 МПа ²
	Тимчасовий опір	1	425 МПа	18,3 МПа	135,5 МПа ²
		2	427 МПа	10,12 МПа	102,4 МПа ²
		3	380 МПа	8,16 МПа	66,6 МПа ²
	Відносне видовження	1	0,38	0,11	1,21x10 ⁻²
		2	0,37	0,087	7,60x10 ⁻³
		3	0,36	0,012	1,44x10 ⁻⁴
Зварний шов	Тимчасовий опір	3	283 МПа	14,2 МПа	202 МПа ²

Перевіркою підтверджено задовільне узгодження дослідного і теоретичного розподілу згідно з нормальним законом (рис. 8).

Виконано формування баз даних для межі текучості сталі ВСт3пс неруйнівним методом через значення твердості за Бріннелем. Значення межі текучості матеріалу отримано перерахунком за відомою залежністю $\bar{\sigma}_T = 0,2\bar{HB}$. Результати таких досліджень наведено в табл. 2 і на рис. 8.

Визначено статистичні характеристики механічних властивостей сталі ВСт3пс за сертифікатами якості заводу-виробника кутникового металопрокату ВАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» та ДСТУ 380-2005 (табл. 2, рис. 8).

За результатами натурного експерименту отримано показники міцності сталі ВСт3пс нижчі, ніж за інформацією з сертифікатів якості. Це свідчить про те, що високу достовірність показників міцності матеріалів і статистичні

закономірності їх розсіювання можна отримати лише на підставі натурального експерименту.

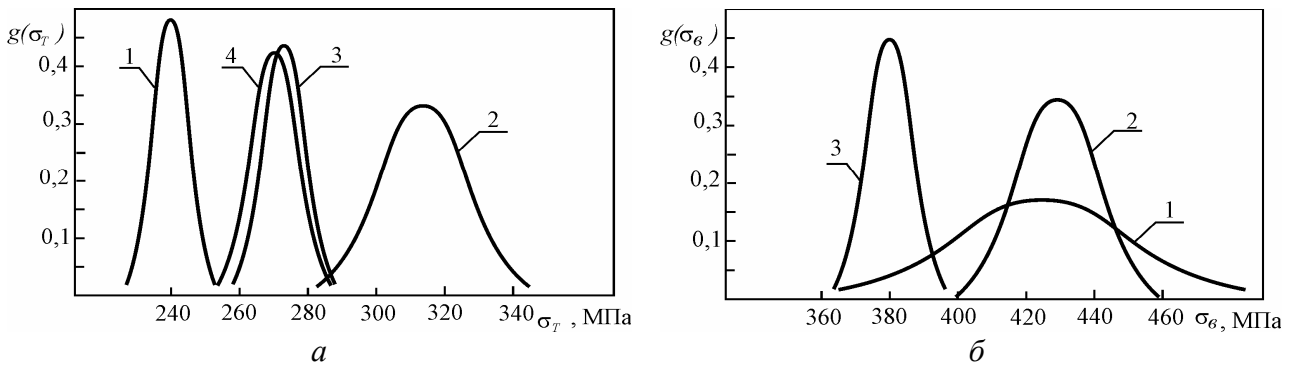


Рис. 8. Щільність розподілу значень межі текучості σ_T (а) й тимчасового опору σ_b (б) для сталі ВСт3пс: 1 – за ДСТУ 380-2005; 2 – за сертифікатами якості виробника; 3 – за результатами прямого натурального експерименту розтягом; 4 – за значеннями твердості НВ

Саме точність вхідного інформаційного забезпечення є одним із визначальних чинників для забезпечення високої достовірності результатів обчислення залишкового ресурсу типової зварної ферми статистичним моделюванням.

У четвертому розділі виконано комп'ютерне імітаційне моделювання за методом Монте-Карло для обчислення залишкового ресурсу типової зварної ферми з використанням запропонованої статистичної моделі й сформованого інформаційного забезпечення. Для вхідних стохастичних параметрів моделі прийняті такі закономірності розподілу випадкових величин: початкова довжина тріщини й технологічні дефекти – закон Вейбулла; критичний КІН та границя текучості матеріалу – нормальний закон; амплітудні напруження в циклі – закон Релея.

Згенеровано чисельні масиви (рис. 9) згідно з цими законами і визначеними їх параметрами, які використано в якості вхідного інформаційного забезпечення для багаторазової прогонки розрахунків згідно з методикою імітаційного моделювання за методом Монте-Карло.

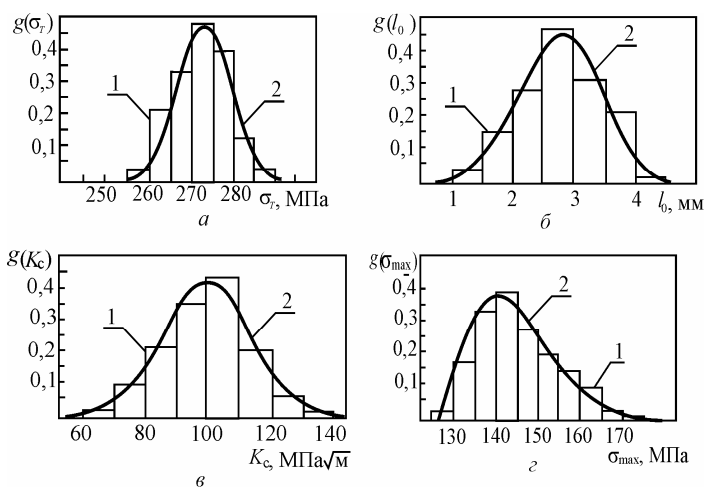


Рис. 9. Гістограма (1) та щільність розподілу (2) значень стохастичних вхідних параметрів запропонованої статистичної моделі, отримані з використанням генератора випадкових чисел, для: а – межі текучості сталі ВСт3пс σ_T за нормальним законом; б – початкових довжин тріщини l_0 за законом Вейбулла; в – критичного КІН K_c за нормальним законом; г – максимальних напружень в циклі σ_{max} за законом Релея

Розроблено алгоритм і комп'ютерне програмне забезпечення для розрахунку вихідних параметрів моделі при реалізації імітаційного моделювання.

Визначено статистичні закономірності залишкового ресурсу зварної ферми (вихідних параметрів моделі) комп'ютерним моделюючим експериментом за характером розсіювання випадкових величин l_0 , σ_T , σ_{max} , K_{max} (вхідні стохастичні параметри).

Отримано серію графічних залежностей за результатами комп'ютерного моделювання процесу формування залишкового ресурсу зварної ферми при комплексному впливі стохастичних чинників (рис. 10 – 19). Вони ілюструють варіативність залишкового ресурсу типової зварної ферми при зміні вхідних параметрів моделі.

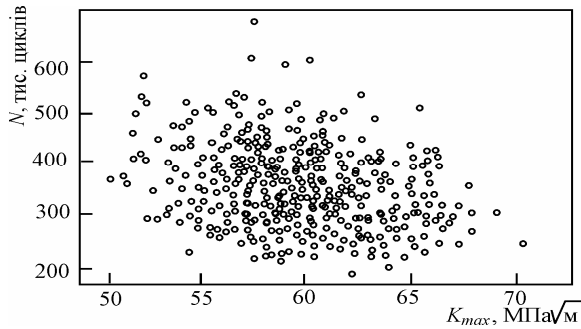


Рис. 10. Залежність залишкового ресурсу зварної ферми від значень K_{max} з врахуванням стохастичності значень l_0 , K_c та σ_T

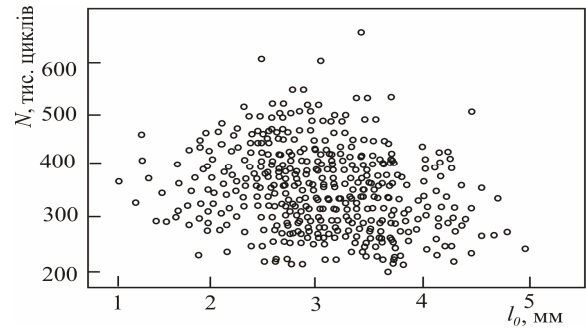


Рис. 11. Залежність залишкового ресурсу зварної ферми від значень l_0 з врахуванням стохастичності значень K_{max} , K_c та σ_T

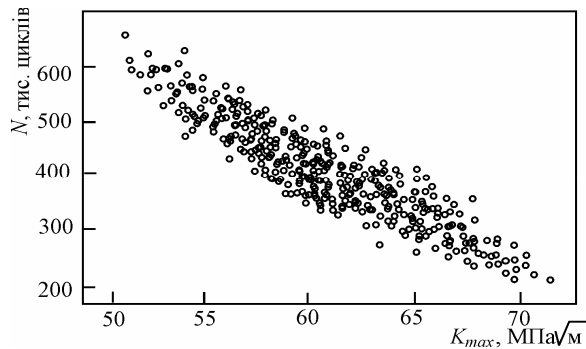


Рис. 12. Залежність залишкового ресурсу зварної ферми від значень K_{max} з врахуванням стохастичності значень K_c та σ_T і фіксованих значеннях l_0

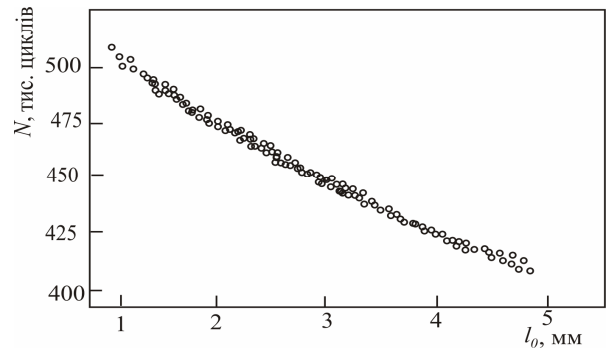


Рис. 13. Залежність залишкового ресурсу зварної ферми від значень l_0 з врахуванням стохастичності значень K_c та σ_T і фіксованих значеннях K_{max}

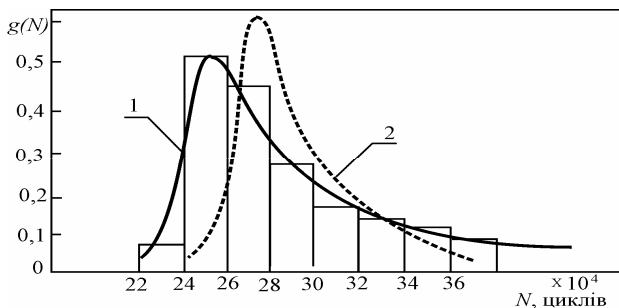


Рис. 14. Гістограма і щільності розподілу залишкового ресурсу зварної ферми для умов навантажування $\sigma_m = 0,5\sigma_T$; $\sigma_1 = 0,2\sigma_T$; $\sigma_2 = 0,1\sigma_T$: 1 – за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту; 2 – за результатами натурного експерименту

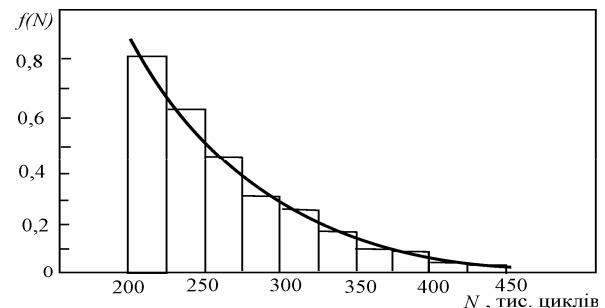


Рис. 15. Інтегральна залежність зміни залишкового ресурсу типової зварної ферми за результатами імітаційного моделювання для умов циклічного двочастотного навантажування зі співвідношеннями напружень у циклах $\sigma_m = 0,5\sigma_T$; $\sigma_1 = 0,2\sigma_T$; $\sigma_2 = 0,1\sigma_T$

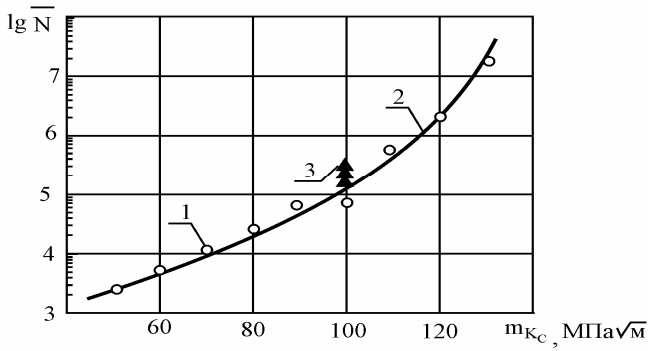


Рис. 16. Залежність статистичної оцінки математичного сподівання залишкового ресурсу зварної ферми $\bar{N}$ від математичного сподівання K_c при постійному середньому квадратичному відхиленні $K_c = 3,9$ МПа√м:
1 – результати імітаційного моделювання;
2 – результати апроксимації експериментальних даних; 3 – результати натурного експерименту

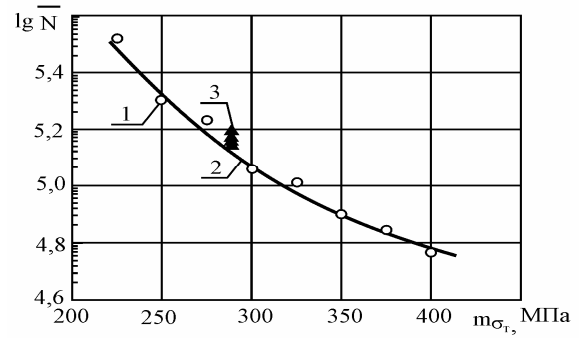


Рис. 17. Залежність статистичної оцінки математичного сподівання залишкового ресурсу зварної ферми $\bar{N}$ від математичного сподівання межі текучості матеріалу σ_T при постійному середньому квадратичному відхиленні $\sigma_T = 8,45$ МПа√м (позначення див. на рис. 16)

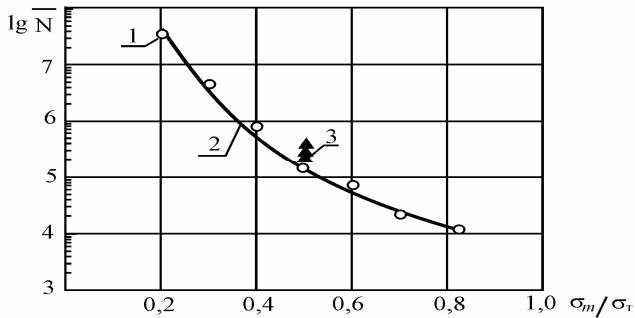


Рис. 18. Залежність статистичної оцінки математичного сподівання залишкового ресурсу зварної ферми $\bar{N}$ від співвідношення між середнім діючим напруженням і межею текучості матеріалу σ_m/σ_T (позначення див. на рис. 16)

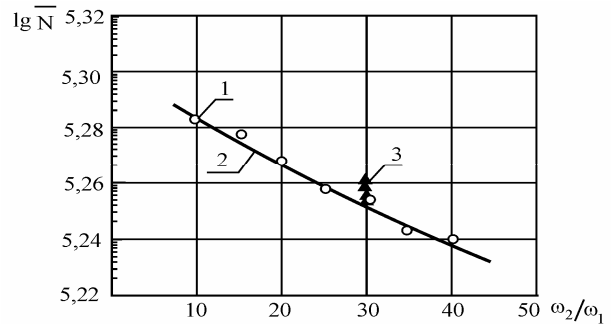


Рис. 19. Залежність статистичної оцінки математичного сподівання залишкового ресурсу зварної ферми $\bar{N}$ від співвідношення частот навантажування ω_1/ω_2 (позначення див. на рис. 16)

Виконано верифікацію результатів дослідження залишкового ресурсу типової зварної ферми комп'ютерним моделюючим експериментом, за результатами якої виявлено точність статистичного моделювання на рівні 0,904...0,941 для різних вхідних стохастичних параметрів, що задовольняє умови статистичних планів випробувань (гранична похибка не повинна перевищувати 10%).

Запропоновано методику визначення залишкового ресурсу зварних фермових конструкцій за ймовірнісними підходами шляхом побудови інтегральної залежності зміни залишкового ресурсу, зокрема для фермових опор ліній електропередач.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі розробленої статистичної моделі методом комп'ютерного імітаційного експерименту розв'язано науково-технічну задачу з визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми під дією циклічних навантажень з урахуванням комплексного багатofакторного впливу стохастичних чинників з достовірністю результатів вищою, ніж за існуючими методиками.

Отримано основні результати досліджень:

1. За результатами аналізу наукових публікацій виявлено низький рівень збіжності розрахункових і фактичних значень залишкового ресурсу зварних ферм, зумовлений повним або частковим неврахуванням в існуючих розрахункових методиках комплексного впливу багатьох стохастичних чинників.

2. Розроблено фізичну модель типової зварної ферми та оригінальну методику її натурних досліджень із використанням запатентованого пристрою, що дозволило за результатами натурних експериментів отримати інформаційні бази даних пошкоджуваності конструкції при комплексному впливі стохастичних чинників, визначити статистичні характеристики цих даних, розрахувати геометричні та силові константи подібності фізичної моделі.

3. Запропоновано багатofакторну статистичну модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми під дією циклічних навантажень з урахуванням комплексного впливу стохастичних чинників, що дозволило на її основі виконати комп'ютерне імітаційне моделювання і визначити залишковий ресурс досліджуваної конструкції з вищою достовірністю, ніж за існуючими методиками.

4. Сформовано інформаційні масиви варіативності стохастичних чинників для запропонованої статистичної моделі за результатами власних натурних досліджень та досліджень інших авторів, а саме, межі текучості σ_T сталі ВСт3пс, початкової довжини тріщини l_0 , максимального коефіцієнта інтенсивності напружень K_c і максимальних напружень у циклі $\sigma_{\max}$, що дозволило використати їх в якості вхідного інформаційного забезпечення при комп'ютерному імітаційному моделюванні.

5. Виконано порівняння вхідного інформаційного забезпечення статистичної моделі для стохастичних чинників, зокрема межі текучості й тимчасового опору сталі ВСт3пс, отриманих за результатами натурних досліджень, сертифікатами якості та стандартами, що дозволило виявити низький рівень їх збіжності – 0,82...0,84. Тому для досягнення високої достовірності результатів комп'ютерного імітаційного моделювання слід використовувати інформаційне забезпечення, сформоване внаслідок натурних досліджень.

6. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для комп'ютерного імітаційного моделювання за методом Монте-Карло на основі запропонованої статистичної моделі. Виконано комп'ютерне імітаційне моделювання з використанням цієї статистичної моделі й сформованого вхідного інформаційного забезпечення, що дозволило обчислити залишковий ресурс

типової зварної ферми при циклічних навантаженнях з урахуванням комплексного багатofакторного впливу стохастичних чинників.

7. Виконано верифікацію значень залишкового ресурсу типової зварної ферми, отриманих комп'ютерним імітаційним моделюванням за методом Монте-Карло, що дозволило виявити високий рівень їх збіжності з результатами натурного дослідження конструкції, а саме 0,904...0,941.

8. Наведено приклади практичного застосування статистичного моделювання для визначення залишкового ресурсу реальних зварних фермових конструкцій, які експлуатуються під дією циклічних навантажень, що дозволило визначити допустимі терміни експлуатації зварних фермових опор магістральних ліній електропередач до повного вичерпування їх ресурсу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шингера Н. Я. Оцінка ресурсу типових зварних ферм статистичними методами / Н. Я. Шингера, Л. М. Щербак // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 2008. – №2. – С. 147 – 152.

2. Шингера Н. Я. Статистична оцінка прогнозованого залишкового ресурсу зварних конструкцій / Н. Я. Шингера, Л. М. Щербак // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 2008. – №3. – С. 196–200.

3. Шингера Н. Я. Статистичний аналіз роботи зварних конструкцій при навантаженнях / Н. Я. Шингера, Л. М. Щербак // Вісн. ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2009. – Випуск 51. – С. 51 – 57.

4. Ковальчук Я. О. Особливості статистичного дослідження зварних навантажених ферм / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя – 2009. – №1. – С. 23 – 27.

5. Шингера Н. Я. Імовірнісний аналіз поведінки зварних з'єднань в навантажених конструкціях / Н. Я. Шингера // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 2009. – №4. – С. 74–78.

6. Шингера Н. Я. Моделювання пошкодження зварних будівельних ферм / Н. Я. Шингера, Я. О. Ковальчук, І. Б. Окіпний // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 2011. – Спец. вип., част. 2 – С. 112–117.

7. Пат. №40196 Україна, МПК G01N 3/00. Пристрій для базування зварних ферм при випробуваннях на статичну та циклічну міцність / Шингера Н. Я., Ковальчук Я. О.; заявник і патентовласник Тернопіль. держ. техніч. ун-т. – №40196 ; заявл.13.11.08 ; опубл. 25.03.09, Бюл. №6.

8. Шингера Н. Математичне моделювання експлуатаційних пошкоджень зварних ферм / Н. Шингера // Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання : Всеукр. студ. наук.-техн. конф., 17–18 квіт. 2008 р. : тези доп. – Тернопіль, 2008. – С. 88.

9. Шингера Н. Статистична оцінка пошкоджуваності зварних фермових опор ліній електропередач / Н. Шингера // Наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є.Пухова НАН України, 16–17 січ. 2009 р. : тези доп. – К., 2009. – С. 118.

10. Шингера Н. Статистична оцінка ресурсу навантажених зварних конструкцій / Н. Шингера // Всеукр. наук.-техн. конф. Тернопільського держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя, 13–14 трав. 2009 р. : тези доп. – Тернопіль, 2009. – С. 9.
11. Шингера Н. Імовірнісні підходи до оцінки ресурсу зварних конструкцій комп'ютерним моделюючим експериментом / Н.Шингера // Міжнар. наук.-тех. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 трав. 2010 р. : тези доп. – Тернопіль, 2010. – С. 328.
12. Шингера Н. Статистична оцінка властивостей сталі ВСтЗпс на ділянці термічного впливу від зварного шва / Н. Шингера, Я. Ковальчук // XIV наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 27–28 жовт. 2010р. : тези доп. – Тернопіль, 2010. – С. 59.
13. Шингера Н. Фізичне моделювання для оцінки залишкового ресурсу зварних фермових конструкцій / Н. Шингера, Я. Ковальчук // Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті : Наук. конф. мех.-технолог. фак. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 16 трав. 2011р. : тези доп. – Тернопіль, 2011. – С. 10.
14. Шингера Н. Особливості статистичного планування експерименту при розробці моделі пошкоджуваності зварних ферм. / Н.Шингера // I наук.-техн. конф. Тернопіль. нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології», 20 трав. 2011р. : тези доп. – Тернопіль, 2011. – С. 27.
15. Ковальчук Я. Статистичні особливості втомного пошкодження зварних будівельних ферм / Я. Ковальчук, Н. Шингера // XV наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 14–15 груд. 2011р. : тези доп. – Тернопіль, 2011. – С. 127.

АНОТАЦІЯ

Шингера Н. Я. Статистична модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2012.

За результатами аналізу деградації зварних ферм під дією циклічних навантажень зроблено висновки, що їх залишковий ресурс формується при комплексному впливі багатьох стохастичних чинників. Для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми запропоновано статистичну модель. При формуванні вхідних інформаційних масивів для цієї моделі виявлено суттєві розбіжності характеристик механічних властивостей сталі ВСтЗпс, отриманих за державними стандартами, сертифікатами якості виробника та натурними дослідженнями суцільних та зварних зразків.

Розроблено фізичну модель типової зварної ферми, залишковий ресурс якої за циклічних навантажень досліджено як натурним експериментом, так і комп'ютерним імітаційним моделюванням за методом Монте-Карло з використанням запропонованої статистичної моделі. Внаслідок верифікації

результатів моделювання отримано високий рівень їх вірогідності (0,91...0,94), що свідчить про адекватний підбір аналітичної основи статистичної моделі у вигляді залежності для опису кінетики втомного пошкодження та використання вхідних інформаційних масивів моделі, отриманих за результатами натурних досліджень.

Ключові слова: статистичні моделі, залишковий ресурс, типова зварна ферма, комп'ютерне імітаційне моделювання, метод Монте-Карло, вхідні інформаційні масиви.

АННОТАЦИЯ

Шингера Н. Я. Статистическая модель для определения остаточного ресурса типовой сварной фермы при циклических нагрузках. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2012.

На основании анализа деградации сварных ферм под действием циклических нагрузок сделаны выводы о формировании их остаточного ресурса под комплексным влиянием многочисленных стохастических факторов. Существующие инженерные методики не учитывают этот факт и потому не обеспечивают необходимой точности расчета остаточного ресурса. На основании этого принято решение о целесообразности разработки статистической модели усталостной деградации сварной фермы и определения ее остаточного ресурса компьютерным имитационным моделированием.

Для расчета остаточного ресурса типовой сварной фермы предложена статистическая модель усталостной повреждаемости конструкции, в основу которой положено одно из известных уравнений скорости роста усталостной трещины в элементах сварных конструкций при двухчастотных циклических нагрузках. Именно такой режим характерный для большинства сварных ферм, когда кроме эксплуатационных нагрузок конструкция испытывает собственные колебания, температурное, ветровое влияние и т.д.

Использование предложенной статистической модели для имитационного моделирования усталостного повреждения методом Монте-Карло обеспечивает учет комплексного влияния стохастических параметров, однако точность результатов зависит от адекватности исходных информационных массивов, характеризующих эти параметры модели. В работе рассмотрено комплексное влияние таких стохастических факторов: предел текучести материала, амплитудные напряжения в цикле, критический коэффициент интенсивности напряжений, начальная длина трещины.

Выполнена серия натурных исследований и сформирован массив предела текучести для стали ВСтЗпс, которая используется при изготовления сварных ферм. Исследования выполнены как на стандартных образцах статическим растяжением, так и неразрушающим методом по твердости материала методом Бринелля с последующим пересчетом результатов в значения предела

текучести. Определены вероятностные законы и статистические характеристики для этих массивов. При сравнении массивов оказалось, что предел текучести, определен натурным экспериментом, имеет низкий уровень соответствия с информацией из государственного стандарта и сертификатов качества завода-производителя металлопроката. Это одна из причин несоответствия расчетных и фактических значений остаточного ресурса. Сделан вывод, что для получения высокой точности расчетов имитационным моделированием целесообразно использовать информационные массивы, сформированные по результатам натурных испытаний.

Разработана физическая модель типовой сварной фермы. Определены константы физического моделирования. Учтены основные положения статистической теории подобия усталостного разрушения. Под действием циклических нагрузок испытано 15 образцов физической модели, что соответствует разработанным статистическим планами исследований для получения относительной погрешности до 10% при доверительной вероятности не менее 90%. Зафиксированы моменты появления усталостных повреждений и разрушения конструкций. Определены статистические показатели и вероятностные законы распределений экспериментально полученных информационных массивов остаточного ресурса. Достоверность результатов, полученных натурным экспериментом, обеспечена использованием испытательного оборудования, прошедшим государственную метрологическую поверку, и применением стандартизированных методик испытаний.

Выполнен расчет остаточного ресурса (количества циклов от момента появления начальной трещины до момента разрушения конструкции) под действием циклических нагрузок компьютерным имитационным моделированием методом Монте-Карло с использованием предложенной статистической модели и полученных исходных информационных массивов. В качестве исходной информации для статистической модели использованы описаны выше результаты собственных исследований, а также и результаты других авторов. Приняты такие вероятностные законы распределения исходных параметров: начальная длина трещины – по закону Вейбулла, предел текучести материала и критический коэффициент интенсивности напряжений – по нормальному закону, амплитудные напряжения в цикле – по закону Релея. Компьютерное имитационное моделирование реализовано с помощью разработанного алгоритма и программного обеспечения для расчета.

Выполнена верификация результатов имитационного моделирования. Точность определения количества циклов до наступления предельного состояния (остаточный ресурс), полученных имитационным моделированием, по сравнению с результатами натурных исследований составила 0,91...0,94.

Предложена инженерная методика определения остаточного ресурса эксплуатируемых сварных фермовых конструкций по кривой живучести и приведен пример ее практического использования для сварных опор магистральных линий электропередач.

Результаты работы могут быть использованы как при проектировании новых сварных фермовых конструкций, так и для проверки остаточного ресурса эксплуатируемых ферм.

Ключевые слова: статистические модели, остаточный ресурс, типовая сварная ферма, компьютерное имитационное моделирование, метод Монте-Карло, исходные информационные массивы.

ANNOTATION

Shinhera N. Ya. Statistical model for determination of the residual resource of a typical weld-fabricated farm at cyclic loading. – Submitted as a Manuscript.

The thesis for obtaining a scientific degree of the candidate of technical sciences by speciality 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University. – Ternopil, 2012.

The analysis of degradation of a weld-fabricated farms under cyclic loads allows to conclude that their residual resource is formed at the complex influence of many stochastic factors. To determine the residual resource of the typical weld-fabricated farm a statistical model is offered. At forming of input information arrays for this model the significant differences of characteristics of mechanical properties of the steel VSt3ps obtained according to the state standards, quality certificates of a manufacturer and full-scale researches of solid and welded samples are revealed.

A physical model of the typical weld-fabricated farm, residual resource of which under cyclic loads is investigated as a full-scale experiment as well as a computer simulation by the Monte Carlo method with the use of the offered statistical model is developed. As a result of verification of modeling results a high level of their probability (0,91...0,94) is obtained, indicating an adequate selection of an analytical basis of the statistical model in the form of dependence to describe the kinetics of fatigue damage and the use of the input information arrays of the model obtained from the results of full-scale researches.

Key words: statistical models, residual resource, the typical weld-fabricated farm, computer simulation, Monte Carlo method, input information arrays.