

УДК 620.191.33

**Я. Ковальчук, канд. техн. наук; Н. Шингера**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ОСОБЛИВОСТІ СТАТИСТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРНИХ НАВАНТАЖЕНИХ ФЕРМ**

*Фактичний ресурс зварних ферм залежить від комплексу металургійних, конструкторсько-технологічних та експлуатаційних чинників. Існуючі розрахункові залежності є багатопараметричними, а результати їх застосування мають низьку збіжність з реальними показниками, тому передбачають високі коефіцієнти запасу міцності. З метою зменшення матеріаломісткості, а отже, і собівартості зварних навантажених конструкцій без зниження надійності та довговічності виробів, застосовують методи статистичного дослідження. У статті розглядаються особливості статистичного дослідження зварних навантажених ферм, які сприймають статичні та циклічні навантаження. Економічна доцільність таких досліджень особливо виражена для умов масового виробництва.*

**Ключові слова:** зварні конструкції, циклічні навантаження, статистичні показники, надійність.

**Y. Kovalchuk, N. Shynhera**

## **PECULIARITIES OF STATISTICAL ANALYSIS OF LOADED WELDED GIRDERS**

*Observed life of a welded girder depends on the combination of metallurgical, engineering and design and operational factors. The existing calculation dependences are multiparametric and application of them results in low coincidence with actual figures, so high coefficients of power reserve should be provided for. To decrease materials consumption and as a result the first cost of loaded welded constructions with no decrease in their reliability and durability methods of statistical analysis should be used. The author has covered some peculiarities of statistical analysis of the loaded welded girders that undergo static and cyclic loading. Economic expediency of the sort of analysis is obvious, especially for mass production.*

**Key words:** welded constructions, cyclic loading, statistical indicators, reliability.

### **Вступ**

При проведенні моніторингу технічного стану зварних навантажених конструкцій найскладнішим є об'єктивне встановлення фактичного ресурсу цих виробів з метою попередження її руйнування внаслідок появи і розвитку дефектів різного походження впродовж експлуатації. Зварні конструкції, які експлуатуються під дією циклічних навантажень, руйнуються раптово при експлуатаційних режимах, при яких зароджуються і розвиваються пошкодження. Передбачити цей процес складно через незнання повного спектру режимів експлуатаційних навантажень, змін фізико-механічних властивостей металу, механізмів виникнення і розвитку різних дефектів, порушень технологій на стадії виготовлення, експлуатації і ремонту об'єктів. Суттєвою перешкодою для отримання достовірних розрахункових результатів за класичними аналітичними методиками є варіативність характеристик зварного шва і навколошовної ділянки (зони термічного впливу) [1]. Порушення цілісності в зварних навантажених конструкціях, як правило, зумовлює значні руйнування з важкими наслідками (матеріальними втратами та людськими жертвами). Аналіз аварійності великогабаритних зварних металоконструкцій свідчить, що, зазвичай, кожна аварія є наслідком значної кількості чинників в найневдалішому для конструкції їх поєднанні. Такий багатопараметричний вплив на процеси зародження і розвитку дефектів зумовлює низьку збіжність фактичного значення ресурсу з розрахунковими результатами, отриманими за класичними аналітичними залежностями.

Виявлено, що значно об'єктивнішими є результати дослідження поведінки зварних навантажених конструкцій шляхом математичного моделювання експлуатаційного процесу. Сучасний розвиток обчислювальної техніки дає можливість використовувати при проектуванні типових зварних стержневих конструкцій різноманітні розрахункові методи, адаптуючи їх до конкретних конструктивних схем та умов експлуатації. Існуючі силові й амплітудні параметри та характеристики зварних конструкцій дають можливість створювати відповідні математичні моделі. Часто застосовують для цього метод граничних елементів. Для будівельних зварних металоконструкцій така методика описана в роботах Баженова В.А., Дашенка О.Ф., Коломійця Л.В., Оробея В.Ф. [2,3].

Значно вищу збіжність фактичних і розрахункових результатів для зварних навантажених конструкцій отримують при стохастичному моделюванні в порівнянні з детермінованим. Параметри статистичного розподілу отримують за результатами експериментальних досліджень [4]. Після статистичної обробки експериментальних результатів проводиться побудова графічних залежностей і розробка аналітичної моделі, яка береться за основу в інженерних розрахунках. Важливі дослідження в цьому напрямку виконали R.L.Kashyap, A.Ramachandra Rao [5], Лейфер Л.А. [6, 7], Разживіна В.С. [7], Болотін В.В. [8], Anston Marson, Robley Winfrey, Jean C.Hempstead [9].

Хороші результати отримані при статистичному дослідженні зварних труб у магістральних нафто- і газопроводах [7] з врахуванням впливу корозійної деградації матеріалу, зварних конструкцій коксохімічного виробництва [8].

Однак отримання стохастичної моделі повинно бути технічно і економічно обґрунтованим, оскільки є досить трудомістким процесом в експериментальній частині досліджень. Використання сучасних технічних засобів обробки результатів експериментів потребує спеціального програмного забезпечення.

### **Постановка задачі**

Згадані статистичні дослідження виконані на натурних конструкціях шляхом спостереження за їх роботою впродовж експлуатації. Недоліком таких досліджень є їх низька проектна цінність через складність узагальнення результатів для інших геометричних чи силових параметрів.

Особливістю аварій зварних стержневих металоконструкцій є наявність двох етапів. Спочатку відбувається локальне руйнування в одному елементі або вузлі (місці з'єднання стержнів у фермі). Потім внаслідок втрати тримкої здатності в місці локального руйнування конструкція руйнується в цілому. Тому сформувався наукова проблема індивідуального прогнозування і оцінки показників ресурсу зварних металоконструкцій. Існуючі моделі і методи прогнозування ресурсу є узагальненими і не дають можливості врахувати історію навантажування конкретного об'єкта. Тому задача індивідуальної оцінки скачкоподібного зменшення ресурсу зварних тримких металоконструкцій є досить актуальною.

Метою описаних у статті досліджень є розробка методичних основ побудови стохастичних математичних моделей для зварних стержневих конструкцій шляхом планування експерименту, спостереження за поведінкою конструкцій під впливом зовнішніх навантажень, визначення статистичних характеристик отриманих експериментальних результатів.

### **Основні результати**

Найбільшу складність при проектуванні зварних навантажених ферм становлять умови циклічних навантажень (мостові перекриття, опори високовольтних ліній електропередач, баштові підймальні крани, антенні башти мобільного зв'язку). Особливість такого силового режиму полягає в тому, що пошкодження накопичуються поступово (зародження й ріст тріщини), а руйнування може наступити раптово під дією експлуатаційних навантажень, коли тріщина досягне критичного розміру. Термін

експлуатації виробу обмежується настанням граничного стану – такого стану об'єкта, коли його подальша експлуатація недопустима чи недоцільна, або відновлення його функціональної здатності неможливе або недоцільне. Фактичні моменти досягнення об'єктами граничного стану можуть суттєво відрізнятися в залежності від індивідуальних особливостей і умов експлуатації об'єктів.

Структурно зварні тримкі металокопструкції можна розглядати як систему з  $n$  з'єднаних між собою елементів (зокрема, стержнів для ферм). Надійність такої системи обмежена певним ресурсом (напрацюванням). Чим більше в конструкції з'єднаних елементів  $n$ , тим вищою є ймовірність появи критичних дефектів і пошкоджень, здатних привести до катастрофічних руйнувань. Обмеження в часі зумовлені неминучим накопиченням пошкоджень у матеріалі елементів конструкції та в місцях їх з'єднань. Тому термін експлуатації об'єкта  $T$  є випадковою величиною і може бути описаний імовірнісними моделями.

Як випадкова величина залишковий ресурс характеризується двома чисельними параметрами: напрацюванням  $t$  і ймовірністю  $\gamma\%$  того, що впродовж цього напрацювання граничний стан не наступить.

Проведемо аналіз можливостей підвищення надійності зварних фермових конструкцій за рахунок конструктивно-технологічних чинників. Теоретична надійність ферм  $R_{\Sigma}$  визначається як добуток надійностей елементів  $R_i(t)$  [8]

$$R_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^t \mu_i(t) dt\right). \quad (1)$$

Міра інтенсивності руйнувань  $\mu(t)$  визначається через параметри дефектності елементів: середнє число дефектів на одиницю довжини ферми, щільність ймовірностей розподілу фактичних  $f(l)$  і критичних  $f(l_c)$  розмірів дефектів

$$\mu_i(t) = \mu_0 \int_0^{l_c} \int_0^{l_c} f_t(l) f_t(l_c) dl dl_c. \quad (2)$$

Якщо припустити, що критичні розміри дефектів обмежені товщиною стінки в матеріалі ферми  $\delta$  (катет зварного шва), то, враховуючи вейбулловський характер щільності розподілу  $f(l)$  з параметрами  $\theta$  і  $\beta$ , отримуємо

$$\mu_i(t) = \mu_0 \int_0^{\infty} f_t(l) dl = \mu_0 \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{\delta}{\theta}\right)^{\beta}\right)\right). \quad (3)$$

Для встановлення закономірностей розподілу випадкових величин та визначення параметрів розподілу в кожному конкретному випадку як конструкції зварної ферми, так і режиму навантаження необхідно виконати моделюючий експеримент. Авторами статті розроблена конструкція і отриманий патент на пристрій для базування зварних ферм при випробуваннях на статичну та циклічну міцність [10] (рис.1).

Конструктивно пристрій виконаний у вигляді верхнього рухомого натискача 1 та підставки 2 з високою жорсткістю. Між ними встановлено досліджувану зварну ферму 3, причому натискач 1 виконаний у формі рівноплечого важеля з півциліндричними жорсткими контактними опорами 4, віддаль між якими рівна віддалі між верхніми вузлами ферми 3. На підставці 2 встановлено дві нижні півциліндричні опори 5 з міжосьовою віддаллю рівною монтажній довжині ферми 3, та дві торцових опори, одна з яких нерухома півциліндрична 6, друга – рухома півсферична 7 встановлена через пружний елемент 8. Пристрій жорстко закріплюється підставкою 2 на випробувальній машині (розривна машина, пульсатор, електрогідрравлічний випробувальний комплекс тощо) до базової поверхні 9 та шарнірно до робочого штока 10.

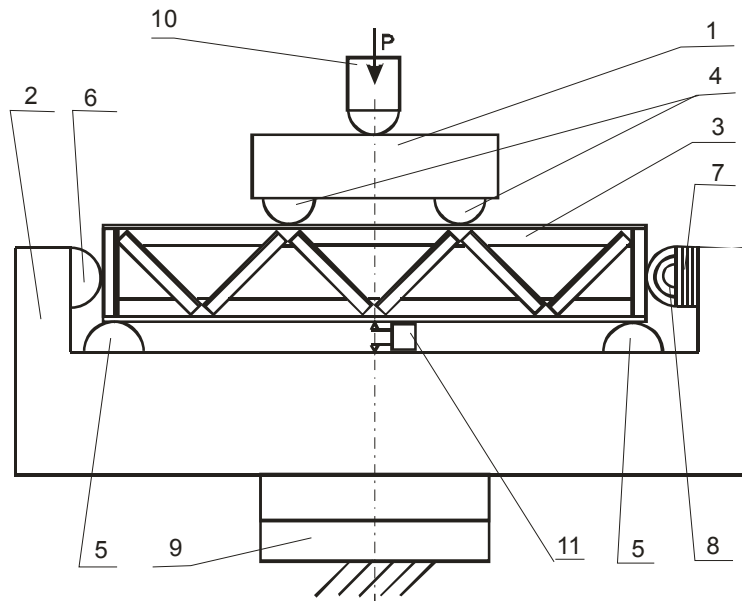


Рисунок 1 – Пристрій для базування зварних ферм при випробуваннях на статичну та циклічну міцність

Тензометричний давач 11 для контролю деформації встановлено між поверхнею досліджуваної ферми 3 і підставкою 2 вздовж осі робочого штока 10.

Запропонована в пристрої конструктивна схема максимально ідентифікує фактичну силову схему навантаження зварних фермових конструкцій.

Експериментальні дослідження виконані в лабораторії тріщиностійкості матеріалів на сервогідрравлічній випробувальній машині СТМ-100. Достовірність експериментальних результатів підтверджується Свідомством державної метрологічної повірки Тернопільського ДЦСМС.

Проблемним питанням експериментальних досліджень типових навантажених зварних конструкцій, як правило, є значні розміри та маса натурних зразків, їх здатність витримувати значні експлуатаційні навантаження впродовж тривалого часу. Саме тому натурні випробування для типових зварних ферм виконують дуже рідко, оскільки це зумовлює значні матеріальні витрати й трудомісткість експерименту, необхідність застосування високопотужного енергозатратного випробувального обладнання. В таких випадках часто застосовують випробування масштабних зразків через меншу вартість експерименту. Для того, щоб результати випробувань, отримані на масштабних зразках ферм, можна було ідентифікувати до реальних ферм, враховані правила масштабування, описані в роботі Седова Л.І. [10], та класичні положення [4]. Такий підхід дає можливість використати типові випробувальні комплекси, зменшити матеріало-, енерго- і трудомісткість випробувань та ідентифікувати експериментальні результати для всього розмірного ряду однотипних конструкцій ферм.

Виконані експериментальні дослідження з використанням випробувального пристрою за рис.1 масштабних моделей зварних ферм довжиною 600 мм та висотою 120 мм, виготовлених зі сталюого гаряче вальцьованого кутника 25x25x3 мм. Згідно з [12] прийнята кількість зразків для дослідження  $N=5$  штук. Це відповідає граничній відносній похибці  $\delta = 0,1$ , довірчій ймовірності  $\gamma = 0,8$ , з передбачуваним коефіцієнтом варіації  $\nu = 0,2$ . Використаний м'який режим навантажування (контрольований розмах зусилля) за синусоїдальним законом. Зразки доводилися до руйнування статично без попереднього циклічного навантажування ( $P_{ст\ max} = 26$  кН) та з попереднім циклічним навантаженням різної інтенсивності ( $P_{цик\ max.} = 0,1; 0,2; 0,3$  та  $0,4P_{ст\ max}$ ). При цьому коефіцієнт асиметрії циклу навантажування приймали  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0,1$ , частота  $f = 15$  Гц, базова кількість циклів  $N = 10^3$ . Після циклічного навантажування виконували

статичне руйнування. В процесі експерименту візуально спостерігали за зародженням і розвитком пошкоджень. Контролювали максимальний прогин посередині ферми за допомогою тензOMETричного давача в залежності від величини зусилля.

Проведена статистична обробка результатів експерименту за класичними методиками [8]. За результатами статистичного аналізу дефектності зварних з'єднань у досліджених фермах міра інтенсивності руйнувань  $\mu_0$  знаходиться в межах 0,08 ... 0,12 м<sup>-1</sup>. Параметр  $\theta$  прирівнюється до чутливості методів контролю, а саме тензOMETричного давача деформації і становить 0,1 мм. Параметр  $\beta$  змінюється в діапазоні 0,6 ... 1,6.

Враховуючи коефіцієнт масштабування з такими даними, розрахункова надійність зварної ферми з висотою 3,6 м і довжиною 18 м становить 0,87...0,98. При збільшенні розмірів тримкої ферми ці значення зменшуються. Підвищити надійність зварних ферм за рахунок конструкторсько-технологічних обмежень дефектів і пошкоджень надзвичайно важко. Враховуючи це, безпечність зварних ферм може бути підвищена шляхом обмеження масштабного чинника (зменшення розмірів ферми за рахунок розбивки міжопорної віддалі на декілька зі встановлення проміжних опор).

### Висновки

Проблема надійності і безпечності зварних тримких металокопструкцій має комплексний характер і зумовлює пошук оптимальних рішень інженерних і економічних задач. Отримані результати встановлюють співвідношення конструкторсько-технологічних і експлуатаційних аспектів та показників надійності й безпечності. Вони можуть служити методичною основою для дослідження показників міцності і надійності зварних стержневих навантажених копструкцій. Результати роботи можна використати при проектуванні зварних фермових металокопструкцій та для аналізу технічного стану копструкцій, які знаходяться в експлуатації.

### Література

1. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1992. – 272 с., ил.
2. Баженов В.А., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В., Оробей В.Ф. Будівельна механіка. Спеціальний курс: Застосування методу граничних елементів: Навчальний посібник. – Одеса: Астропринт, 2001. – 288с.
3. В.А.Баженов, Е.З.Криксунов, А.В.Перельмутер, О.В.Шишов. Информатика. Інформаційні технології в будівництві. Системи автоматичного проектування: – К.: Каравела, 2004. – 360 с.
4. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие. Под ред. Б. С. Касаткина. – К.: Наукова думка, 1981. – 420 с.
5. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. Кашьяп Р.П., Рао А.П. Пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1993. – 384с.
6. Лейфер Л.А. Методы прогнозирования остаточного ресурса машин и их программное обеспечение – М.: Знание, 1988. – 60 с.
7. Лейфер Л.А., Разживина В.С., Вероятностное описание характеристик усталости на основе распределения Кептейна, в кн.: Точность и надежность механических систем. Исследование деградации машин. Рига, 1988. – С.73- 91
8. Болотин В.В., Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312с.
9. Anston Marson, Robley Winfrey, Jean C.Hempstead. Engineering Valuation and Depreciation. Iowa State University Press, 1982.
10. Н.Я.Шингера, Я.О.Ковальчук, Пристрій для базування зварних ферм при випробуваннях на статичну та циклічну міцність. - Патент України на корисну модель №123324 UA від 22.01.2009.
11. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – 10-е изд., доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 432 с.
12. Надежность в технике. Методы определения показателей надежности по экспериментальными данным. – М.: Машиностроение, 1996. – 351с.

Одержано 02.02.2009 р.