

УДК 620.191.33

**Н.Шингера; Л.Щербак, докт. техн. наук***Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя***ОЦІНКА РЕСУРСУ ТИПОВИХ  
ЗВАРНИХ ФЕРМ СТАТИСТИЧНИМИ МЕТОДАМИ**

*Визначення фактичного ресурсу типових зварних ферм можливе лише після повного його вичерпування, тобто руйнування конструкції. Класичні методи розрахунку фактичного ресурсу зварних ферм є досить наближеними, оскільки не враховують всіх технологічних та експлуатаційних факторів. Такими методами визначають лише прогнозований нормативний ресурс. У статті розглядається статистичний підхід для визначення фактичного ресурсу зварних навантажених ферм. За основу взятий логарифмічно-нормальний закон щільності розподілу ймовірностей часових термінів експлуатації. Використавши аналітичні залежності для цього закону розподілу, побудовано криву живучості, на основі якої можна визначити ймовірність використання ресурсу в будь-який період експлуатації виробу. Отримані результати можна застосовувати як в інженерній практиці, так і в економічних розрахунках для визначення залишкової вартості зварних конструкцій.*

**N.Shynera, L.Scherbak****EVALUATION OF STANDARD WELDED FRAMEWORK  
RESOURCE BY STATISTICAL METHODS**

*It is only possible to determine the observed life of a standard welded framework when it is exhausted completely, in other words after the framework fracture. Classical approaches to calculation of welded framework observed life are quite approximate because they do not take into account every technological or operational factor. The methods can only be used to determine predicted rated resource. The author of the article has considered a statistical approach to determine the observed life of a loaded welded framework. The logarithmic-normal law of density of life distribution has been assumed as a basis. Having applied the analytic dependence to the distribution law the author has constructed a life curve that can help to determine probability of resource usage at any time of an article operation. The obtained results can be used both in engineering practice and in economic calculations to determine a framework residual value.*

**Вступ**

Зварні стержневі металоконструкції використовуються в багатьох областях сучасної техніки (будівельні ферми дахового перекриття, металоконструкції мостів, рамні металоконструкції транспортних засобів, тримкі балки підвісних конвеєрів, фермові конструкції підймальних кранів, опор ліній електропередач тощо). Порушення цілісності в цих конструкціях, як правило, зумовлює значні руйнування з важкими наслідками (матеріальними втратами та людськими жертвами).

Результати розрахунків за класичними інженерними методами для навантажених зварних стержневих конструкцій є у певній мірі умовними [1]. Складність полягає в статичній невизначеності системи, широкому діапазоні режимів робочих навантажень, впливі побічних чинників (температурні деформації, вітрові навантаження, корозійне пошкодження, аварійні перевантаження). Суттєвою перешкодою для отримання достовірних розрахункових результатів за класичними методиками є варіативність характеристик зварного шва і навколошовної ділянки (зони термічного впливу) [2].

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. [3,4].

Значно вищу збіжність проектних і експлуатаційних результатів для зварних навантажених конструкцій виявляють за залежностями, отриманими на підставі їх експериментальних досліджень [5]. 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 [6], Лейфер Л.А. [7, 8], Разживіна В.С. [8], Болотін В.В. [9], Anston Marson, Robley Winfrey, Jean C.Hempstead [10].

### Постановка задачі

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. Це є характерним, зокрема, і для типової зварної ферми (рис. 1).

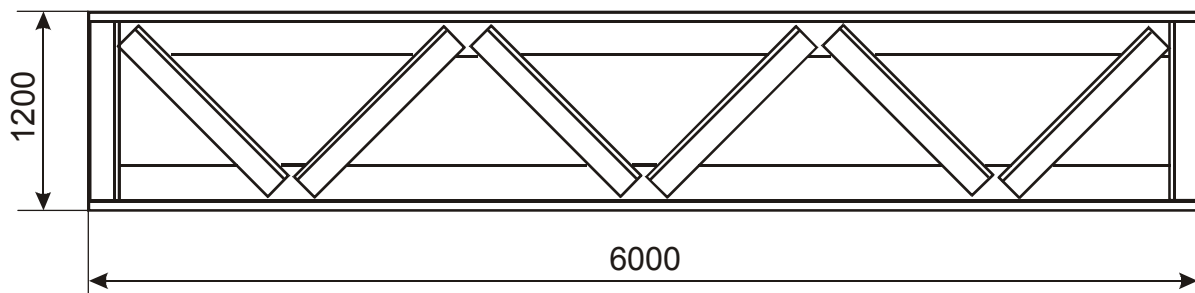


Рисунок 1 - Конструкція типової зварної ферми

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, необхідно враховувати правила масштабування, описані в роботах Седова Л.І. [10], Венікова В.А. [11] та класичні положення [5].

Для отримання необхідної збіжності експериментальних і експлуатаційних показників потрібно випробувати значну кількість масштабних зразків та розрахувати статистичні показники результатів досліджень. Для типових зварних ферм та їх масштабних моделей різними дослідниками виконано багато експериментів для виявлення їх поведінки під дією зовнішніх навантажень і визначення фактичного ресурсу. Однак не зроблені узагальнення результатів експериментальних досліджень та результатів наукових спостережень за поведінкою навантажених зварних ферм в експлуатаційному режимі.

Метою роботи є збір, систематизація та статистичний аналіз виявлених закономірностей пошкоджуваності типових зварних навантажених ферм під впливом експериментальних та експлуатаційних чинників з врахуванням максимальної кількості реальних критеріїв впливу (конструктивних, технологічних, кліматичних, аварійних, корозійних, втомних, деградаційних, кваліфікаційних, металургійних тощо). За результатами статистичного аналізу встановлюються параметри закономірностей пошкоджуваності типових зварних ферм. Отримана інформація забезпечить можливість з високим рівнем достовірності прогнозувати фактичний ресурс роботи зварних ферм під дією різних експлуатаційних навантажень, включаючи циклічні, аж до настання граничного стану, а отже, максимально використати ресурс конструкції.

### Основні результати

Типові зварні навантажені ферми експлуатуються в різноманітних умовах. Найбільшу складність для інженерних розрахунків становлять умови циклічних навантажень. Особливість такого силового режиму полягає в тому, що пошкодження накопичуються поступово (зародження і ріст тріщини), а руйнування може наступити раптово під дією експлуатаційних навантажень, коли тріщина досягне критичного розміру. Інженерна задача полягає у прогнозуванні такого руйнування шляхом встановлення прогнозованого терміну експлуатації конструкції. Термін експлуатації виробу обмежується настанням граничного стану.

Граничний стан – це такий стан об'єкта, коли його подальша експлуатація недопустима чи недоцільна, або відновлення його функціональної здатності неможливе або недоцільне [13]. Перехід об'єкта в граничний стан може бути зумовлений не лише втратою функціональних можливостей, але й на підставі вимог безпечності, економічності, морального старіння. Фактичні моменти досягнення об'єктами граничного стану можуть суттєво відрізнятись в залежності від індивідуальних особливостей і умов експлуатації об'єктів. Тому термін експлуатації об'єкта є випадковою величиною і може бути описаний імовірнісними моделями.

Нормативний ресурс (нормативний термін експлуатації) – термін експлуатації, встановлений в технічній документації на виріб (конструкцію) виготовлювачем [13]. Нормативний термін експлуатації характеризує довговічність об'єкту, його здатність впродовж встановленого часу зберігати експлуатаційні характеристики. Досягнення об'єктом нормативного терміну не є свідченням того, що об'єкт досягнув граничного стану і повинен бути виведеним з експлуатації. Точно визначити цю різницю (залишковий строк служби) можна лише після реального настання граничного стану конструкції. Доки граничний стан не наступив, це можна лише прогнозувати за ймовірнісними моделями.

В якості такої моделі може бути використана «крива живучості» (survivor curve) [10]. Крива живучості – це графік, який характеризує процес вибуття з експлуатації об'єктів при досягненні ними граничного стану.

Ймовірність того, що об'єкт за період експлуатації не досягне граничного стану визначається як

$$P(x) = P \{ \tau \geq x \}.$$

Функція  $P(x)$  характеризує, скільки в середньому об'єктів «доживає» до часу  $\tau$ . Задана таким чином крива живучості зв'язана з функцією розподілу ймовірностей  $F(x)$  співвідношенням

$$F(x) = 1 - P(x).$$

Щільність розподілу часу до настання граничного стану  $f(x)$  є похідною від функції розподілу

$$f(x) = dF(x)/dx = -dP(x)/dx.$$

Якщо відлік часу ведеться від поточного моменту  $\tau$ , що враховує реальний час експлуатації об'єкту, то  $P(x/\tau)$  характеризує розподіл ймовірностей залишкового строку служби ( $P(x/\tau)$ ) – умовна ймовірність того, що залишковий строк служби буде не меншим за умови, що об'єкт справно функціонував до поточного моменту  $\tau$ .

Крива живучості може бути побудована на підставі теоретичних розрахунків і експериментальних даних. Для практичного отримання експериментальних кривих живучості необхідно мати значну кількість дослідних результатів і виконати їх статистичну обробку. На підставі цієї інформації визначають параметри кривої живучості, а за кривою живучості – час до досягнення об'єктом граничного стану. Узагальнення отриманих експериментальних результатів для інших технічних систем будуть настільки коректними, наскільки ці системи будуть подібними до досліджуваної конструктивно, технологічно та експлуатаційно.

Проаналізувавши роботи з оцінки пошкоджуваності зварних навантажених металоконструкцій [2, 5, 7-10, 14, 15], можна зробити висновок, що найчастіше

дослідники отримують логарифмічно-нормальний імовірнісний розподіл живучості для типових зварних ферм. Такий розподіл характерний для процесів накопичення втомних пошкоджень в зварних вузлах ферм. Така статистична модель характерна для випадкової величини, значення якої отримують перемноженням значної кількості випадкових чинників.

Для оцінки залишкового ресурсу зварних ферм доцільно ввести величину відносного часу експлуатації  $x$ , яка визначається відношенням фактичного терміну експлуатації  $\tau$  до нормативного строку служби  $\tau_x$  і є випадковою величиною та функцією елементарної події  $\omega$  з простору елементарних подій  $\Omega$ .

$$x = \tau / \tau_x$$

$$x = \xi(\omega)$$

Тоді, згідно з прийнятою логарифмічно-нормальною моделлю накопичення пошкоджень у зварній фермі, щільність розподілу ймовірностей для випадкової величини  $x$  матиме вигляд як на рис. 2 і опишеться залежністю:

$$f_{\mu,\sigma}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

$$x > 0, \quad 0 < \mu < \infty, \quad \sigma > 0.$$

Щільність розподілу ймовірностей містить всю інформацію відносно прогнозованого строку служби. Однак для отримання кількісного значення залишкового ресурсу необхідно знати основні характеристики такого розподілу, а саме  $\mu$  і  $\sigma$ . Математичне очікування  $M$ , дисперсія  $D$  і коефіцієнт варіації  $\rho$  відносного часу експлуатації (випадкової величини)  $x$  визначаються через параметри розподілу  $\mu$  і  $\sigma$  за залежностями (2), (3), (4) [15].

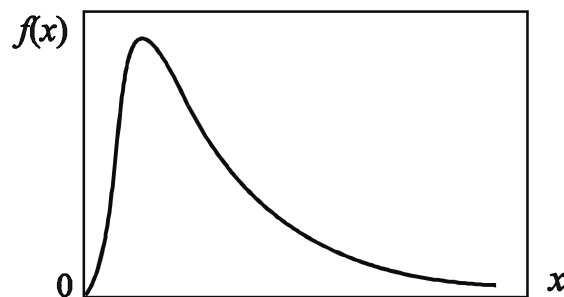


Рисунок 2 - Щільність розподілу ймовірностей відносного часу експлуатації  $x$

$$M = e^{\mu + \sigma^2/2}; \quad (2)$$

$$D = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1); \quad (3)$$

$$\rho = \sqrt{D}/M. \quad (4)$$

Найобґрунтованішим варіантом отримання показників статистичної оцінки є випробування реальної зварної ферми. Достатню для практичних задач збіжність моделюючих і фактичних результатів отримують при випробуваннях геометричних моделей зварних конструкцій. Таким чином, реальніше отримати нормовану вибірку даних експериментів для повноцінної їх статистичної обробки. Однак, через громіздкість або неможливість виконання випробувань, на практиці часто використовують усереднені результати статистичної оцінки близьких за конструкцією та умовами експлуатації виробів. Такий варіант, звичайно, децю програє за рівнем

збіжності прогнозованих і фактичних результатів експлуатації через складність врахування масштабного чинника.

Прогнозовані результати для розглядуваної конструкції в першому наближенні можна отримати на підставі аналізу уже досліджених конструкцій, враховуючи їх геометричну подібність та наближеність умов експлуатації з розглядуваною конструкцією.

Узагальнюючи літературні дані з результатами досліджень надійності і довговічності машин та обладнання [2, 5, 7-10, 14, 15], можна зробити висновок, що для зварних стержневих конструкцій типу ферм коефіцієнт варіації  $\rho$  знаходиться в межах 0,3 – 0,4. За цими даними можна визначити дисперсію  $D$ . Для визначення параметрів розподілу необхідно знати нормативний строк служби, який отримують за аналізом роботи аналогічних конструкцій або із паспортних даних конструкції. Припускають, що впродовж цього часу виріб з високою ймовірністю (0,9) повинен прослужити без настання граничного стану при відсутності нештатних ситуацій (аварії, стихійні лиха тощо).

Якщо вважати, що зварна конструкція досягне граничного стану до закінчення нормативного строку експлуатації, то ймовірність цього характеризується рівнем  $\alpha$ , який визначається інтегралом

$$\int_0^1 f(x, \mu, \sigma) dx = \alpha. \tag{5}$$

Використовуючи залежність (5) і співвідношення (2), (3), (4), можна розрахувати значення відносного середнього терміну експлуатації  $\bar{t}$  за заданими значеннями  $\alpha$  і  $\rho$ . Відносний середній термін експлуатації  $\bar{t}$  визначається як відношення середнього значення фактичного строку служби до нормативного строку служби. В таблиці 1 подані результати таких розрахунків для різних значень  $\alpha$  і  $\rho$ .

Таблиця 1 - Розрахункові значення відносного середнього строку служби  $\bar{t}$

Аргументи	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,2$
$\rho = 0,2$	1,419068	1,320486	1,20925
$\rho = 0,3$	1,419068	1,540335	1,349859
$\rho = 0,4$	1,419068	1,814845	1,521962
$\rho = 0,5$	1,419068	2,159766	1,733253

Нижче подані графічні залежності щільності розподілу ймовірності строків служби типових зварних ферм (рис. 3) і крива живучості для них (рис. 4), отримані на підставі статистичної обробки та аналізу результатів експлуатації зварних фермових конструкцій, які працювали під дією циклічних навантажень. Вони ілюструють процес вибуття об'єктів з експлуатації.

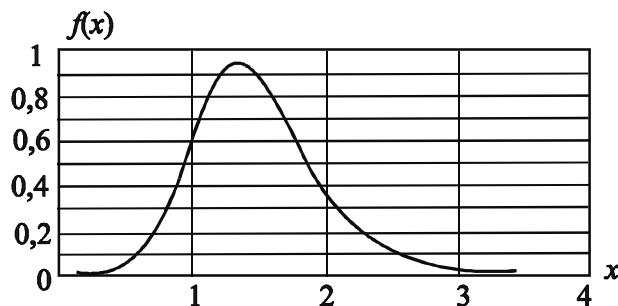


Рисунок 3 - Щільність розподілу ймовірності терміну експлуатації зварної ферми під дією циклічних навантажень ( $\rho = 0,3$ ,  $\alpha = 0,1$ )

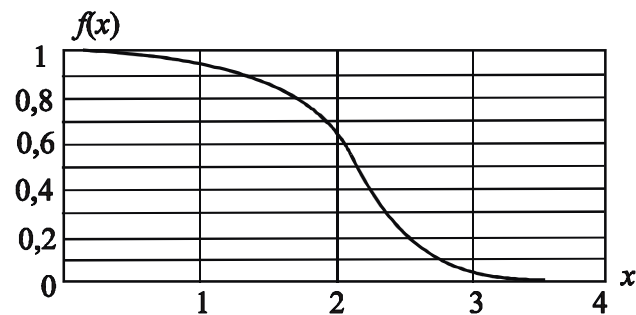


Рисунок 4 - Кривая живучості типових зварних ферм під дією циклічних навантажень ( $\rho=0,3$ ,  $\alpha=0,1$ )

Обидві залежності побудовані для умов  $\rho=0,3$ ,  $\alpha=0,1$ . Вибір таких параметрів обґрунтований вище. Цінність кривої живучості в тому, що вона дає можливість проілюструвати поведінку конструкції після вичерпування нормативного ресурсу ( $x>1$ ) для прогнозування процесу її деградації, встановлення її споживчої вартості, доцільності технічного огляду чи ремонту.

### Висновки

У роботі отримано статистичні закономірності пошкоджуваності типових зварних ферм, які працюють в умовах циклічних навантажень, встановлено параметри цих закономірностей. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні зварних фермових металоконструкцій та для аналізу технічного стану конструкцій, які знаходяться в експлуатації. Перспективним є виконання власних експериментальних досліджень на геометричних моделях ферм для виявлення збіжності розрахункових і експериментальних результатів.

### Література

1. Металлические конструкции: Спец. курс/ Е.И.Беленя, Н.Н.Стрелецкий, Г.С.Ведеников и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 472 с
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие. Под ред. Б. С. Касаткина. — К.: Наукова думка, 1981. – 420 с.
6. Постороение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. Кашьяп Р.П., Рао А.П. Пер. с англ. –М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1993. – 384с.
7. Лейфер Л.А. Методы прогнозирования остаточного ресурса машин и их программное обеспечение – М.: Знание, 1988. — 60 с.
8. 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
9. Болотин В.В., Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
10. Anston Marson, Robley Winfrey, Jean C.Hempstead. Engineering Valuation and Depreciation. Iowa State University Press, 1982.
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. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1976. — 479 с.
13. ГОСТ 27. 002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Москва: Госстандарт СССР, 1989. – 48 с.
14. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин, М., Изд – во «Высшая школа» 1988, - 238 с.
15. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. - М.: Машиностроение, 1987. – 351с.

Одержано 24.04.2008 р.