

**СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ**

Я. О. Ковальчук, Ю. І. Пиндус, Н. Я. Шингера

*Розроблена фізична модель зварної ферми, залишковий ресурс якої при циклічних навантаженнях досліджений як натурним експериментом, так і комп'ютерним імітаційним моделюванням за методом Монте-Карло з використанням запропонованої статистичної моделі. Отримано високий рівень їх достовірності (0,927), що свідчить про адекватне підборі аналітичної основи статистичної моделі у вигляді залежності для опису кінетики втомного пошкодження та використання вхідних інформаційних масивів моделі, отриманих за результатами натурних досліджень.*

*Разработана физическая модель сварной фермы, остаточный ресурс которой при циклических нагрузках исследован как натурным экспериментом, так и компьютерным имитационным моделированием за методом Монте-Карло с использованием предложенной статистической модели. Получено высокий уровень их достоверности (0,927), что свидетельствует об адекватном подборе аналитической основы статистической модели в виде зависимости для описания кинетики усталостного повреждения и использования входных информационных массивов модели, полученных по результатам натурных исследований.*

*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 (0,927) 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.*

**Вступ**

Експлуатаційне пошкодження суцільності зварних ферм під дією циклічних навантажень відбувається при комплексному впливі багатьох стохастичних чинників (конструктивних, технологічних, експлуатаційних). Деградація конструкцій відбувається поступово, а руйнування наступають при експлуатаційних режимах навантажування. За таких умов проблемним є виявлення кінетики втомного пошкодження зварних ферм для передбачення моменту настання граничного стану і виведення їх з експлуатації.

Класичні методи оцінювання пошкоджуваності зварних ферм [1] не враховують комплексний вплив стохастичних чинників і тому дають результати, які мають низький збіг з експлуатаційними показниками. Існуюча нормативна база [2] передбачає імовірнісний підхід до пошкодження зварних конструкцій, однак включає ряд емпіричних коефіцієнтів, які суб'єктивно вибирає проєктувальник, знижуючи цим вірогідність розрахункових результатів.

Статистичний підхід до розв'язання цієї задачі частково втілено в роботах R. L. Kashyap, A. P. Rao [3], Л. А. Лейфера [4], В. В. Болотіна [5], Anston Marson [6] та ін., однак узагальнена інформація для оцінювання кінетики втомного пошкодження і визначення залишкового ресурсу зварних ферм з врахуванням комплексного впливу стохастичних чинників відсутня.

**Формування задач дослідження**

*Метою роботи є оцінювання кінетики втомного пошкодження і визначення залишкового ресурсу зварної будівельної ферми при дії циклічних навантажень з врахуванням багатопараметричного комплексного впливу стохастичних чинників і отримання результатів з вищою вірогідністю, ніж при розрахунках за існуючими методиками.*

Для досягнення цієї мети вирішено задачі збору і систематизації результатів натурних експериментів, на їх основі сформовано вхідне інформаційне забезпечення запропонованої статистичної моделі, виконано комп'ютерний моделюючий експеримент за методом Монте-Карло і отримано інформацію про кінетику втомного пошкодження зварної ферми і її залишковий ресурс з врахуванням впливу як детермінованих, так і стохастичних чинників.

**Експериментальні дослідження фізичної моделі зварної ферми**

Досліджено фізичну модель підкрів'яної зварної ферми з трикутною решіткою (рис. 1) за схемою навантажування, поданою на рис. 2.

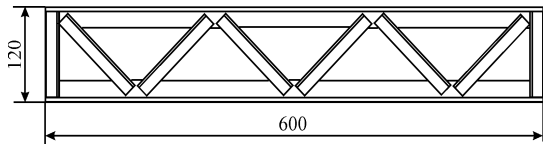


Рис. 1. Конструкція фізичної моделі зварної ферми

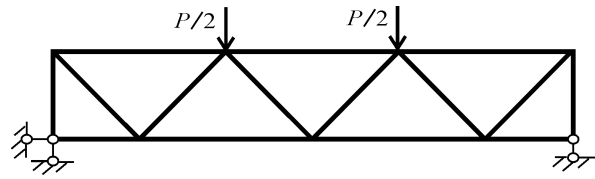


Рис. 2. Схема навантажування фізичної моделі

Експериментальні дослідження виконано під дією двочастотних циклічних навантажень (рис. 3) для 15 зразків, що задовольняє умови отримання граничної відносної похибки  $\delta=0,1$  при довірчій імовірності  $\gamma=0,9$ .

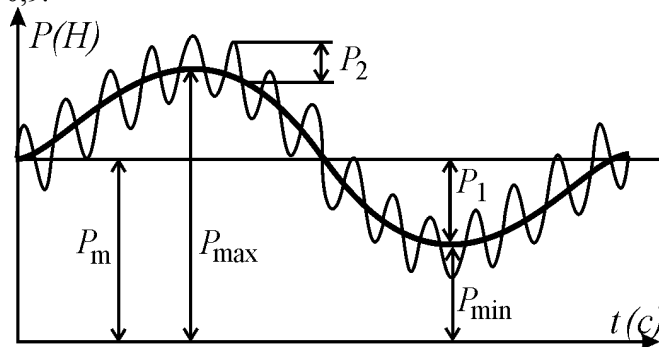


Рис. 3. Режими двочастотних циклічних навантажень при натурних випробуваннях зварних ферм ( $P_m = 10$  кН;  $P_{max} = 15$  кН;  $P_{min} = 5$  кН;  $R = P_{min}/P_{max} = 0,3$ ;  $2P_1 = 10$  кН;  $\omega_1 = 1$  Гц;  $2P_2 = 4$  кН;  $\omega_2 = 30$  Гц)

За результатами експериментального циклічного навантажування дослідних зразків виявлено кількість високочастотних циклів навантажування  $N_1$  до появи на поверхні зразка пошкоджень, які можна виявити візуально (тріщини довжиною 2 мм) та кількість високочастотних циклів навантажування  $N_2$  до втрати конструкцією тримкості.

Результати статистичного опрацювання експериментальних даних візуалізовано на рис. 4.

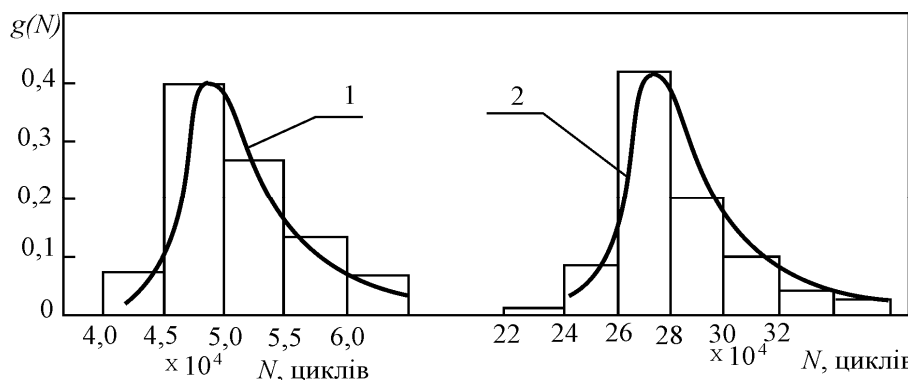


Рис. 4. Гістограми та щільності пошкодження (1) і руйнування (2) зварних ферм за результатами натурального дослідження

Згідно з рекомендаціями [7] виявлено розподіл отриманих результатів за логарифмічно-нормальним законом.

**Статистичне моделювання втомного пошкодження**

Для оцінювання кінетики втомного пошкодження і визначення залишкового ресурсу зварної ферми з врахуванням як детермінованих, так і стохастичних чинників, розроблено багатопараметричну статистичну модель кінетики втомного пошкодження ферми (рис. 5).

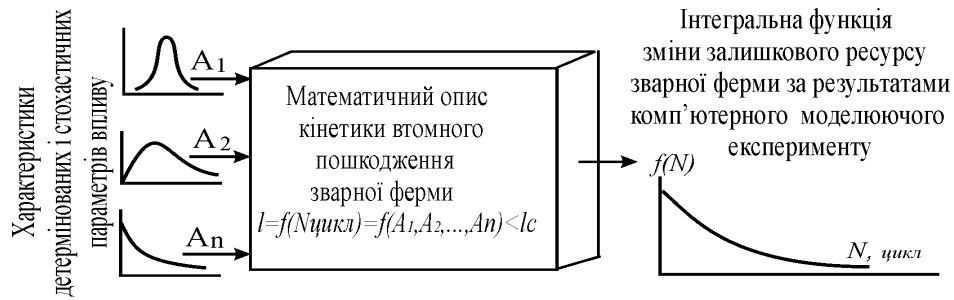


Рис. 5. Розрахункова схема для визначення залишкового ресурсу зварних ферм комп'ютерним моделюючим експериментом

Математичний опис кінетики втомного пошкодження реалізовано рівнянням, розробленим проф. А. М. Лепіхіним [8] та перевіреном для умов поширення тріщин в елементах зварних конструкцій. Після інтегрування цього рівняння отримано вираз (1) для визначення залишкового ресурсу зварної ферми, який виражається через кількість циклів навантажування  $N$  від моменту виявлення втомної тріщини довжиною  $l_0$  до моменту втрати конструкцією тримкості (досягнення тріщиною критичної довжини  $l_c$ ).

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

де  $q$  – коефіцієнт, що враховує яку частину пластичного ядра становить циклічна пластична зона для втомної тріщини;

$\sigma_T$  – границя текучості матеріалу;

$K_{th}$  – пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН);

$\beta$  – параметр циклічного зміцнення матеріалу;

$K_{fc}$  – циклічна в'язкість руйнування матеріалу;

$\sigma_{max}$  – максимальне значення напружень в циклі при довжині тріщини  $l$ ;

$f_k(l)$  – поправкова функція, яка враховує форму зварної конструкції [9];

$\omega$  – коефіцієнт впливу високочастотного навантаження;

$\mu$  – коефіцієнт впливу виду напруженого стану конструкції.

Для дослідження залишкового ресурсу зварної ферми комп'ютерним імітаційним експериментом [3] враховано стохастичну природу вхідних параметрів моделі:

- початкова довжина тріщини  $l_0$  (розподіл Вейбулла);
- границя текучості матеріалу  $\sigma_T$  (нормальний розподіл);
- критичний КІН матеріалу при циклічному навантаженні  $K_c$  (нормальний розподіл), який визначає  $l_c$ ;
- максимальні напруження в циклі  $\sigma_{max}$  (розподіл Релея).

Решта величин, які входять у залежність (1), вважалися детермінованими.

Виконане комп'ютерне моделювання згенерованої вибірки 1000 зразків за методом Монте-Карло [3] для режимів навантажування  $\sigma_m = 0,5\sigma_T$ ;  $\sigma_1 = 0,2\sigma_T$ ;  $\sigma_2 = 0,1\sigma_T$ , де  $\sigma_m$  – середнє напруження низькочастотного циклу,  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  – розмах напружень відповідно низько- та високочастотного циклу від їх середніх значень.

Порівняльну картину результатів натурного і комп'ютерного моделюючого експериментів візуалізовано на рис. 6. Розподіл ресурсу за результатами моделювання подано на рис. 7

Виконано верифікацію результатів досліджень. При порівнянні чисельних значень залишкового ресурсу від моменту появи візуально помітної тріщини до моменту руйнування за результатами натурного і комп'ютерного імітаційного експерименту виявлено їх задовільний збіг, а саме 92,7 %. Цього цілком достатньо для застосування в інженерній практиці при розрахунках залишкового ресурсу зварних будівельних ферм.

**Висновки**

- Використовуючи інформаційний масив, отриманий за результатами власних експериментальних досліджень та результатами інших авторів, розроблено багатопараметричну статистичну модель, яка описує кінетику втомного пошкодження типової зварної будівельної ферми під дією циклічного навантаження з урахуванням як детермінованих, так і стохастичних вхідних параметрів моделі. Шляхом комп'ютерного моделюючого експерименту за методом Монте-Карло отримано імовірнісні закономірності залишкового ресурсу типової зварної ферми з врахуванням комплексного впливу стохастичних чинників.
- Виконано порівняння результатів натурного і комп'ютерного моделюючого експериментів, яке засвідчило про задовільний збіг отриманих показників залишкового ресурсу.
- Отримані результати можуть бути використані для оцінювання кінетики втомного пошкодження та визначення залишкового ресурсу зварних фермових конструкцій, які експлуатуються, на стадії поширення втомної тріщини.

**Використана література**

1. Беленя Е. И. Металлические конструкции. Специальный курс : [учеб. для вузов] / [Беленя Е. И., Стрелецкий Е. Н., Ведеников Г. С. и др.]. – М. : Стройиздат, 1982. – 472 с.
2. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. Методические указания. Надежность в технике. РД 50-694-90:1990. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 122 с.
3. Кашьяп Р. П. Постороение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным / Р. П. Кашьяп, А. П. Рао Пер. с англ. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1993. – 384 с.
4. Лейфер Л. А. Вероятностное описание характеристик усталости на основе распределения Кептейна / Л. А. Лейфер, В. С. Разживина // Точность и надежность механических систем. – Рига, 1988. – С. 73-91.
5. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
6. Anston Marson Engineering Valuation and Depreciation / Anston Marson, Robley Winfrey, Jean C. Hempstead. – Iowa State University Press, 1982. – 120 p.
7. Методы определения показателей надежности по экспериментальным данным : РД 50-690-89 Надежность в технике. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 95 с.
8. Лепихин А. М. Многопараметрическое вероятностное моделирование роста трещины в задачах оценки ресурса повреждаемых конструкций / А. М. Лепихин // Вычислительные технологии. – М. : 2002. – т.7, ч.3. – С. 216-219.
9. Ким И. В. Комплексная оценка долговечности сварных разрезных подкрановых балок стохастическими и нейросетевыми методами : дис. кандидата тех. наук :05.23.01 / Ким И. В. – Магнитогорск, 2005. – 220 с.

**Ярослав Олексійович Ковальчук** – к.т.н., доцент кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя.

**Юрій Іванович Пиндус** – к.т.н., доцент, декан механіко-технологічного факультету Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя.

**Наталія Ярославівна Шингера** – к.т.н., асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя.