

УДК 621.77; 621.314

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

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЗВАРНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ФЕРМ

***Резюме.** Експлуатаційне пошкодження зварних будівельних ферм відбувається під комплексним впливом багатьох стохастичних чинників (конструктивних, технологічних, експлуатаційних). Для виявлення кінетики пошкодження зварних ферм упродовж експлуатації доцільно застосовувати статистичні підходи. Для формування вхідного інформаційного забезпечення статистичної моделі розроблено конструкцію фізичної моделі, технологію її натурних досліджень, виконано серію експериментальних досліджень і отримано закономірності пошкоджуваності фізичних моделей зварних ферм.*

***Ключові слова:** пошкоджуваність зварних ферм, фізична модель, натурний експеримент, стохастичні параметри впливу.*

N. Shynhera, Y. Kovalchuk, I. Okipnyi

DESIGN OF DAMAGE OF THE WELD-FABRICATED BUILDING FARMS

***The summary.** The classic methods of calculation of remaining resource of the weld-fabricated farms give results, which have subzero convergence with actual, got on results exploitation. The statistical going is in-process considered near prognostication of offensive of the maximum state in the typical weld-fabricated farm taking into account багатоміжпараметричного комплексного впливу стохастичних параметрів. The results got in-process can be drawn on for determination of remaining resource of the weld-fabricated building farms with higher authenticity, than after existent methodologies of calculation.*

***Key words:** damaged of the weld-fabricated farms, physical model, model experiment, stochastic parameters of influence.*

Постановка проблеми. Зварні ферми широко застосовуються у будівництві (балкові ферми перекриття, ферми дахового накриття, мостові конструкції), в антенних баштах, опорах ліній електропередач тощо. Вони є складними технічними системами, що мають комплекс різноманітних фізичних властивостей та недосконалостей, які не завжди повною мірою можна описати теоретично. При математичному аналізі і розрахунку враховують якусь обмежену кількість вхідних даних, які не охоплюють усіх властивостей конструкції, а лише найголовніші з них. Так формується розрахункова схема або модель, завдяки якій можна математично описати зварну ферму і розрахунково передбачити її поведінку впродовж експлуатації. Однак неврахування, на перший погляд, несуттєвих факторів впливу при їх комплексному поєднанні зумовлює неузгодженість розрахункових та фактичних результатів, отриманих при експлуатації конструкції чи при її натурних дослідженнях.

Для дослідження складних технічних систем у техніці широко використовується фізичне моделювання, в основу якого покладено подібність фізичних процесів. У випадках, коли математичний розв'язок задачі утруднений або навіть неможливий, зазвичай використовують натурні експериментальні дослідження на фізичних (масштабних) моделях з наступним перерахунком отриманих результатів на реальну конструкцію, яка стала прототипом моделі. Фізичне моделювання є заміною вивчення

поведінки конструкції, яка нас цікавить, вивченням поведінки її фізичної моделі меншого розміру, як правило, в спеціальних лабораторних умовах.

Фізичне моделювання для дослідження залишкового ресурсу типової зварної ферми зумовлене:

- складністю врахування впливу багатьох стохастичних чинників (див. рис. 1.3) при їх комплексному поєднанні;
- значною матеріало- і трудомісткістю випробування натурних зразків.

Розроблення й натурне дослідження фізичної моделі типової зварної ферми доцільні для формування вхідного інформаційного забезпечення розроблюваної статистичної моделі, виявлення особливостей поведінки конструкції при навантаженнях.

Обов'язковою умовою при розроблення конструкції фізичної моделі є дотримання умов подібності реальної конструкції, її фізичної моделі. В свою чергу, це забезпечує можливість ідентифікувати результати дослідження, отримані з використанням фізичної моделі, для повномасштабних зварних ферм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Унаслідок інформаційного пошуку виявлено небагато результатів натурних експериментальних випробувань повномасштабних зварних фермових конструкцій [1]. Мала кількість таких досліджень зумовлена необхідністю застосування для цього досить енергозатратного випробувального устаткування та високою вартістю дослідних зразків. Однак виявлені результати доцільно використати для ідентифікації фізичної моделі зварної ферми і визначення констант подібності фізичного моделювання.

Порівнюючи руйнівне зусилля F_{\max} за результатами натурних досліджень повномасштабних ферм та його розрахункове значення $F_{\text{розра}}$ при статичних навантаженнях, виявлені співвідношення

$$K = F_{\text{розра}} / F_{\max} = 0,61 \dots 0,77.$$

Розрахункові значення $F_{\text{розра}}$ отримані з використанням прикладних програмних пакетів, в основу яких покладені детерміновані підходи. Одним із поширених пакетів, який використовують для проектування зварних фермових конструкцій, є ANSYS.

Порівняння значення F_{\max} і $F_{\text{розра}}$ свідчить про низький рівень узгодженості розрахункових результатів з фактичними. За результатами аналізу умов виконання розрахунків виявлено, що причинами цього є неврахування імовірнісної природи комплексного впливу стохастичних факторів, дійсних значень характеристик механічних властивостей або неправильний вибір математичного опису кінетики пошкоджуваності для конкретного типу ферм та умов навантажування.

Основною перевагою натурального дослідження зварних повномасштабних ферм є можливість точно оцінити відповідність властивостей реальної конструкції та її теоретичної моделі. Таким чином, можлива перевірка теоретичної моделі за наступними пунктами:

- перевірка критерію граничного стану конструкції;
- оцінка врахування в розрахунку резерву підвищення її тримкості;
- перевірка прийнятої розрахункової схеми аж до настання граничного стану конструкції та ін.

Недоліки експериментального методу:

- висока вартість випробування;
- дослідження проводять на окремих зразках у той час, коли результати випробувань необхідно розповсюдити на певну групу конструкцій.

Для багатьох типових зварних конструкцій виявлено їх закономірності пошкоджуваності за результатами дослідження як натурних зразків, так і їх фізичних моделей. Однак основний акцент у цих роботах зосереджений на об'єктах енергетичної

галузі (паропроводи, теплообмінники, колектори) [1, 2], резервуарах, які працюють під тиском (котли, ресивери, газгольдери) [3, 4], авіаційній техніці (лонжерони, обшивка, елементи шасі) [5], магістральних газо- та нафто трубопроводах, транспортних системах (рами автомобілів, причепів, різні шасі) тощо. Однак узагальнена інформація для визначення кінетики пошкодження зварних ферм із урахуванням комплексного багатопараметричного впливу стохастичних факторів відсутня.

Метою роботи є визначення кінетики пошкодження фізичної моделі будівельних зварних ферм із урахуванням багатопараметричного комплексного впливу стохастичних чинників для формування вхідного інформаційного забезпечення при статистичному моделюванні.

Постановка завдання. Для дослідження слід розробити конструкцію фізичної моделі типової зварної балкової розкритої ферми з трикутною решіткою, схему її навантаження та конструкцію пристосування для натурних досліджень моделі на випробувальному комплексі СТМ-100. Дослідження доцільно виконати під дією статичних навантажень. Отримані результати натурного експерименту порівняти з даними комп'ютерного розрахунку з використанням прикладного програмного пакета ANSYS.

Результати дослідження. Конструкція фізичної моделі розроблена з дотриманням класичних положень теорії подібності (рис. 1) [6]. Крім того, саме така конфігурація ферми широко застосовується в будівництві. Запропоновано схему навантаження фізичної моделі при виконанні натурного експерименту (рис. 2) та пристосування для реалізації цієї схеми на випробувальному комплексі СТМ-100 [7].

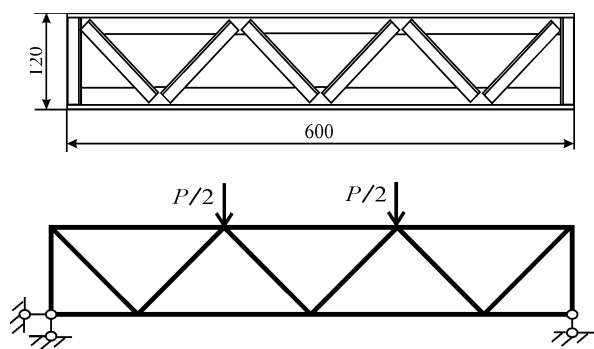


Рисунок 2. Схема навантаження фізичної моделі при виконанні натурного експерименту

Рисунок 1. Конструкція фізичної моделі зварної

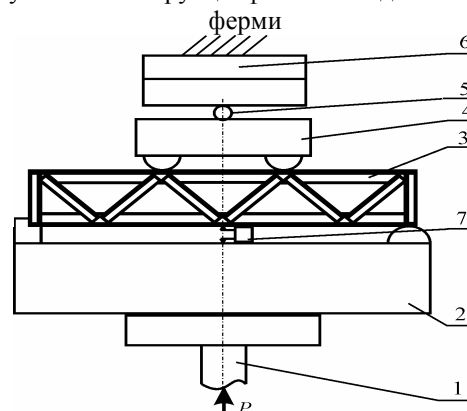


Рисунок 3. Схема реалізації експериментального навантаження зразків на випробувальній машині СТМ-100

Експериментальні навантаження P створюються штоком 1 гідроциліндра і через підставку 2 передаються на досліджувану ферму 3. Траверса 4 сприймає навантаження від двох вузлів ферми, зрівноважуючи його за рахунок циліндричного шарніра 5 і передаючи на жорстко закріплений динамометр 6. Динамометр 6 фіксує відпрацьований силовий сигнал, а тензометричний давач 7 – величину деформації зразка вздовж лінії навантаження.

Натурними випробуваннями при дії статичних навантажень досліджено поведінку 5 зразків. Отримана база даних за результатами натурного експерименту (табл. 1).

Таблиця 1. Значення деформацій фізичної моделі зварної ферми при різних

навантаженнях за результатами натурального дослідження

| Навантаження P , кН | Деформація $\delta_{експ}$, мм | | | | | Усереднене значення |
|--------------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| | Зразок 1 | Зразок 2 | Зразок 3 | Зразок 4 | Зразок 5 | |
| 6 | 0,19 | 0,20 | 0,21 | 0,20 | 0,22 | 0,208 |
| 12 | 0,46 | 0,42 | 0,38 | 0,40 | 0,36 | 0,405 |
| 20 | 0,74 | 0,57 | 0,69 | 0,66 | 0,60 | 0,652 |
| 26 | 0,75 | 0,79 | 0,82 | 0,80 | 0,78 | 0,788 |
| 30 | 0,86 | 0,81 | 0,84 | 0,85 | 0,80 | 0,832 |
| 35 | 1,02 | 0,98 | 0,99 | 1,03 | 0,97 | 0,998 |
| 40 | 1,20 | 1,12 | 1,16 | 1,18 | 1,14 | 1,16 |

Для запропонованої фізичної моделі виконано дослідження поведінки зварної ферми під дією статичних навантажень із використанням прикладного програмного пакета ANSYS (рис.4).

Побудовано суміщено діаграму деформування досліджуваного зразка типової зварної ферми (рис. 5) за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту (лінія 1) і натурального експерименту (лінія 2).

Порівняно й проаналізовано результати натурального і комп'ютерного моделюючого експериментів. Очевидним є факт задовільного узгодження отриманих результатів при низьких рівнях навантаження і незадовільного – при високих навантаженнях. Так втрата тримкості ферми за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту настала при навантаженні $P_{max} = 40$ кН, а усереднене значення руйнівного навантаження при натурному експерименті дорівнює 45,7 кН, що на 14,3% вище від розрахункового. Пластичне деформування конструкції за результатами розрахунків настало при зусиллях 32 кН, а при натурному експерименті почалося при 40 кН, що на 25% більше від розрахункової величини.

| Data1 | | |
|-------|-----------|------------------|
| | A(X) | B(Y) |
| | Force, kg | displacement, mm |
| 1 | 600 | 0,2082 |
| 2 | 1200 | 0,41648 |
| 3 | 2000 | 0,69414 |
| 4 | 2600 | 0,90296 |
| 5 | 3000 | 1,0448 |
| 6 | 3600 | 1,2919 |
| 7 | 4000 | 1,5486 |
| 8 | 4400 | 1,9 |
| 9 | 4800 | 2,37 |
| 10 | 5000 | 3,068 |
| 11 | | |

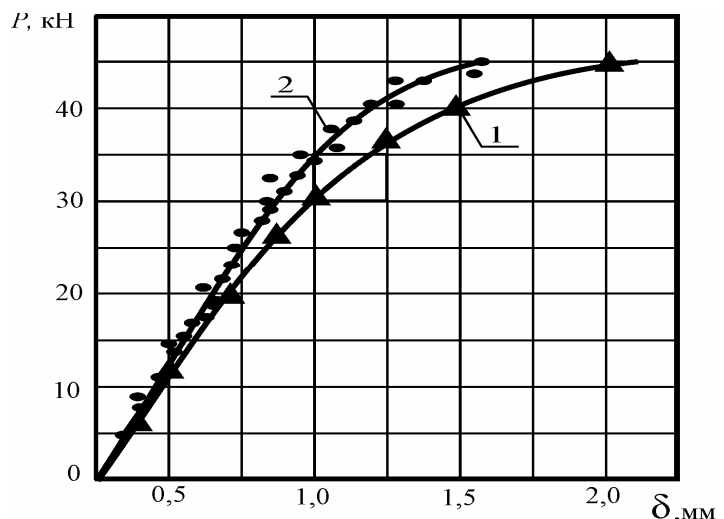


Рисунок 4. Результати навантажування і деформування фізичної моделі зварної ферми, отримані комп'ютерним моделюючим експериментом

Рисунок 5. Діаграма деформування фізичної моделі зварної ферми за результатами комп'ютерного моделюючого (1) та натурального (2) експериментів

Рівень збіжності C визначено як відношення деформації зразка за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту $\delta_{розр}$ до усередненої фактичної деформації $\delta_{експ}$, отриманої натурним дослідженням п'яти зразків ферми (табл. 2)

$$\tilde{N} = \delta_{\delta_{іс\delta}} / \delta_{\delta_{\text{еїі}}} .$$

Таблиця 2. Збіжність величини деформації зварної ферми при статичному навантажуванні за результатами комп'ютерного моделюючого $\delta_{розр}$ та натурального $\delta_{експ}$ експериментів

| Показники | Навантаження P , кН | | | | | | |
|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 6 | 12 | 20 | 26 | 30 | 36 | 40 |
| $\delta_{розр}$, мм | 0,208 | 0,416 | 0,694 | 0,903 | 1,045 | 1,292 | 1,55 |
| $\delta_{експ}$, мм | 0,205 | 0,405 | 0,652 | 0,788 | 0,832 | 0,998 | 1,16 |
| C | 0,985 | 0,971 | 0,938 | 0,872 | 0,796 | 0,772 | 0,682 |

Зведений графік збіжності розрахункових та експериментальних результатів за величиною деформації при однакових навантаженнях зображено на рис. 6.

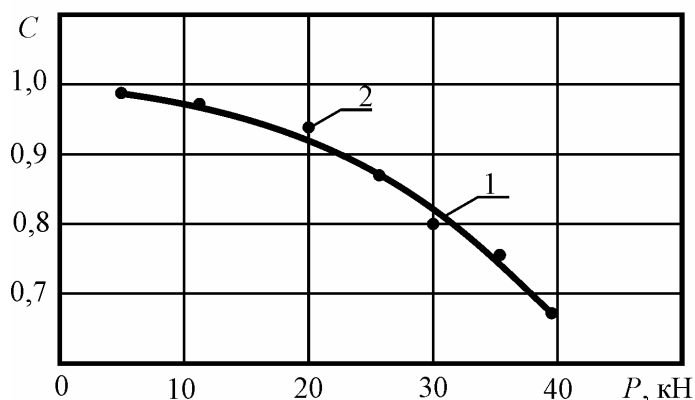


Рисунок 5. Зведений графік збіжності C деформацій зварної ферми під дією статичного навантаження за результатами комп'ютерного моделюючого та натурального експериментів: 1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

Низька збіжність результатів при високих навантаженнях зумовлюється імовірнісною природою формування пошкоджень під впливом дефектів зварювання, ліквіації в матеріалі, температурним впливом в наволошовній ділянці тощо.

Висновки. Розроблено конструкцію фізичної моделі типової зварної балкової ферми, методику її натурних випробувань та пристосування для виконання експериментальних досліджень. Виконано дослідження поведінки ферми під дією статичних навантажень як натурним експериментом, так і з використанням прикладного програмного пакета ANSYS. Виявлено високу збіжність отриманих результатів при низьких навантаженнях і низьку збіжність при високих навантаженнях. Це свідчить про неврахування в розрахункових методиках комплексного впливу стохастичних чинників, які створюють суттєвий вплив саме при значних зусиллях.

Отримані результати можуть бути використані для оцінювання кінетики пошкодження зварних фермових конструкцій під дією статичних навантажень та в якості вхідного інформаційного забезпечення при розробленні статистичних моделей пошкоджуваності зварних конструкцій, які враховують комплексний

багатопараметричний вплив стохастичних чинників і дають можливість отримати розрахункові результати максимально наближеними до фактичних.

Література

1. Лобанов, Л.М. Сварные строительные конструкции [Текст] / Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, В.И. Труфяков – К.: Наук. думка, 2005. – 416 с.
2. Фошко, Э. Оценка надёжности теплоэнергетического оборудования электростанций с использованием полумарковских процессов // Структура генерирующих мощностей и режимы работы энергосистемы [Текст] / Эдуард Фошко. – М., 2003. – С. 93–102.
3. Клёмин, А.И. Надёжность ядерных энергетических установок: основы расчёта [Текст] / А.И. Клёмин – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 344 с.
4. Митрофанов, А.В. Расчет гамма-процентного ресурса сосудов и резервуаров [Текст] / А.В. Митрофанов, С.Б. Киченко // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №9. – С. 28–32.
5. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов: РД 03-421-01:2002. – Офиц. изд. – М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 136 с.
6. Кузнецов, А.А. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента : справочник [Текст] / А.А. Кузнецов, О.М. Алифанов, В.И. Ветров и др. – М.: Машиностроение, 2002. – 568 с.
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.