

УДК 621.77; 621.314

Н. Шингера

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ СУМІСНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ В НАВАНТАЖЕНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Резюме. Класичні інженерні методи розрахунку показників міцності і надійності зварних навантажених конструкцій дають результати, які мають низьку збіжність з фактичними, отриманими за наслідками експлуатації. В роботі розглянуто імовірнісний підхід до умов настання граничного стану в таких конструкціях з урахуванням розкиду механічних властивостей основного матеріалу та матеріалу зварного шва. Отримано аналітичні залежності ймовірності неруйнування групи зварних з'єднань при їх сумісному навантаженні. Експериментально визначено значення границі міцності для зварних з'єднань на зразках зі сталі ВСтЗпс, сформовано з них інформаційний масив та розраховано його статистичні характеристики. Отримані в роботі результати можна використовувати при визначенні характеристик надійності зварних навантажених конструкцій.

Ключові слова: надійність зварних конструкцій, імовірність неруйнування, властивості зварних з'єднань, розсіювання показників міцності.

N. Shynhera

PROBABILISTIC ANALYSIS OF MUTUAL BEHAVIOUR OF WELDED JOINTS WITHIN A LOADED CONSTRUCTION

The summary. Classical engineering approaches to calculation of strength and reliability of loaded welded constructions give results of low coincidence degree as compared with actual operational outcomes. The author considers a probabilistic approach to marginal state conditions for such constructions taking into account variation between mechanical properties of base and weld materials. Analytical dependences for welded joint survival probability in case of simultaneous loading of a group of joints have been obtained. Ultimate strength values for welded joints have been found experimentally by using samples of VSt3ps steel and included in the information collection whose statistical characteristics have been calculated. The obtained results can be used when considering reliability behaviour of loaded welded constructions.

Key words: reliability of welded constructions, survival probability, weld properties, spread of strength indices.

Постановка проблеми. Зварні навантажені конструкції все ширше застосовуються у виробі відповідального призначення завдяки своїм високим техніко-економічним показникам. Показники надійності складних технічних систем і комплексів, як правило, залежать від міцності й надійності їх структурних складових, зокрема зварних конструкцій. Класичні інженерні методи розрахунку характеристик міцності й надійності таких конструкцій дають результати, які суттєво відрізняються від фактичних, отриманих за наслідками експлуатації або натурних випробувань. Причиною цього є ймовірнісна природа чинників, які визначають надійність зварних конструкцій (експлуатаційні та аварійні навантаження, властивості основного конструкційного матеріалу та зварних швів, умови експлуатації тощо). Суттєве значення для надійності конструкції мають технологічні чинники (кваліфікація зварювальника, металургійні властивості матеріалу, метод зварювання, тип електрода, результати зняття внутрішніх напружень з ділянки зварного шва і навколо шовної області термічною обробкою, метод контролю якості зварювання та ін.) Врахувати весь цей багатопараметричний спектр чинників в аналітичних залежностях неможливо, оскільки вони носять випадковий характер і підпорядковуються імовірнісним законам. Однак проблема оцінювання надійності зварних навантажених конструкцій є досить актуальною як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації цих виробів. У першому випадку вирішення її забезпечує визначення нормативного ресурсу конструкції, у другому – раціональне призначення термінів планово-попереджувальних ремонтів, оцінювання залишкового ресурсу і термінів настання граничного стану з метою недопущення виходу конструкції з ладу або настання аварії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання сучасної обчислювальної техніки в інженерній практиці суттєво розширило можливості ймовірнісного підходу для вирішення проблем міцності й надійності складних технічних систем. Для багатьох із них сформовано великі інформаційні масиви за результатами дослідження поведінки конструкцій під дією різноманітних навантажень з урахуванням стохастичної природи факторів впливу на вичерпування ресурсу виробів.

За допомогою комп'ютерної техніки оброблено значні інформаційні масиви. Отримано статистичні характеристики для цих баз даних і встановлено ймовірнісні закони розподілу показників надійності. Для багатьох типових зварних конструкцій виявлено закони розсіювання досліджуваних величин, розроблено стохастичні моделі зварних конструкцій та їх окремих елементів. Ймовірнісний підхід до визначення показників надійності зварних конструкцій зводить до мінімуму розбіжності розрахункових і фактичних експлуатаційних результатів, а, отже, дає можливість з високим рівнем достовірності прогнозувати настання граничного стану та попередити руйнування конструкцій.

Однак основний акцент у цих роботах 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 нафтогазопроводах, транспортних системах (рама автомобілів, причепів, різні шасі) тощо. Частина робіт містить ймовірнісний аналіз поведінки під навантаженням окремих зварних з'єднань без урахування особливостей їх сумісної роботи в конструкціях [6, 7]. Таку інформацію отримати легше і розрахунково, й експериментально, розглядаючи один зварний елемент (з'єднання). Однак узагальнення отриманої інформації для визначення характеристик надійності зварної конструкції з групи однотипних структурних елементів, як правило, зумовлює розбіжність розрахункових і фактичних показників.

Метою роботи є виявлення закономірностей зміни характеристик надійності навантажених зварних стержневих конструкцій з урахуванням взаємного впливу зварних з'єднань при їх сумісній роботі.

Постановка завдання (задачі). Для досягнення поставленої мети для дослідження вибрано два типових зварних елементи конструкцій з навантаженими з'єднаннями. Спираючись на положення теорії ймовірності, проаналізуємо поведінку спарених зварних з'єднань на цих елементах упродовж часу експлуатації конструкції. За експериментально отриманим інформаційним масивом для значень границі руйнування типового зварного з'єднання визначимо його статистичні показники. За отриманими аналітичними залежностями й експериментальними результатами проведемо порівняльні розрахунки характеристик надійності зварної конструкції для умов навантаження одного окремого з'єднання та двох з'єднань при їх сумісній роботі.

Результати дослідження. Розглянемо два приклади фрагментів типових навантажених зварних конструкцій – гладкий циліндричний стержень із двома послідовними зварними з'єднаннями, які працюють на розтяг (рис. 1а), та косинку з кутникового профілю в складі зварної ферми, зварний шов якої працює на зсув (рис. 1б).

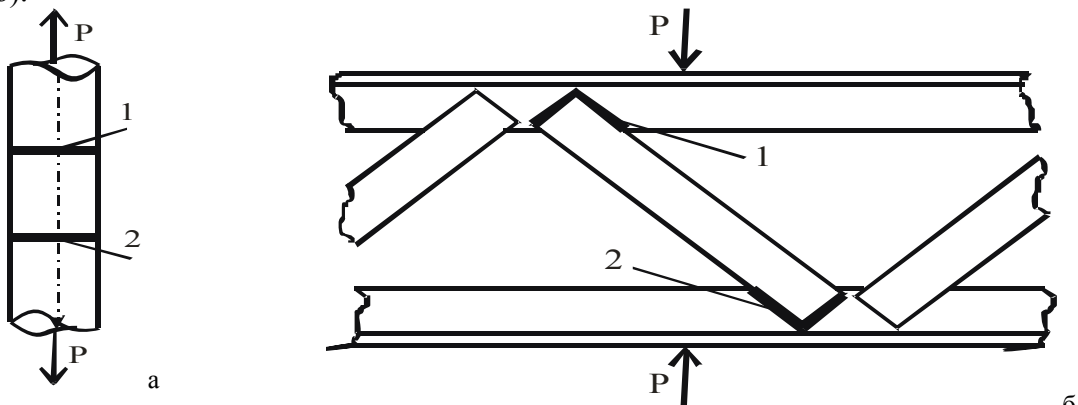


Рис.1. Фрагменти типових навантажених зварних конструкцій з двома зварними з'єднаннями:

циліндричного стержня (а) та фрагмента ферми (б)

Проілюструвати розсіювання міцності та надійності зварного елемента 1 можна кривою нормального розподілу (рис. 2б). Тоді крива імовірності неруйнівності одного зварного з'єднання H_1 буде мати вигляд, як показано суцільною лінією на рис. 2а.

Імовірність неруйнування системи з двома ланками визначається як добуток ймовірностей неруйнування кожної ланки, тобто

$$H_{\Sigma} = H_1 H_2 \tag{1}$$

Оскільки кожне зварне з'єднання виконується окремо, незалежно від попереднього, за однакових умов, то міцність кожного зварного з'єднання є незалежною величиною. Тому для даного випадку $H_1 = H_2$, а $H_{\Sigma} = H_1^2$.

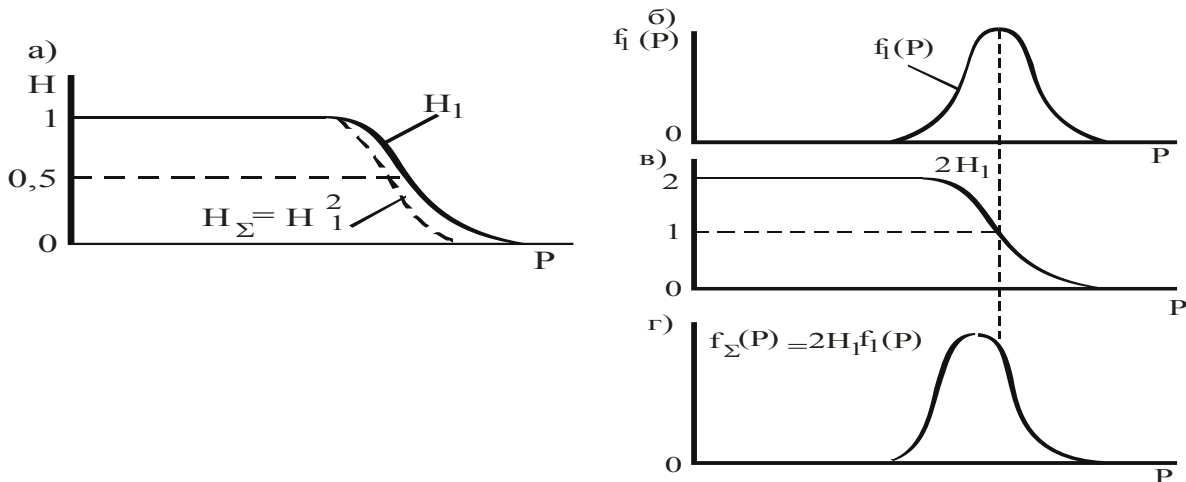


Рис. 2. Визначення закону розподілу міцності системи з двома зварними з'єднаннями

Для визначення закону розподілу міцності системи $f_{\Sigma}(P)$ за відомим законом розподілу щільності ймовірності міцності одного зварного з'єднання $f_1(P)$ використаємо положення, згідно з яким щільність ймовірності розподілу міцності дорівнює першій похідній ймовірності неруйнування.

Тоді

$$f_{\Sigma}(P) = -\frac{dH_{\Sigma}}{dP} = -\frac{dH_1^2}{dP} = -2H_1 \frac{dH_1}{dP} = 2H_1 f_1(P). \tag{2}$$

На рис. 2 в зображено крива $2H_1$, а на рис. 2, г – крива $f_{\Sigma}(P)$ у вигляді добутку $2H_1 f_1(P)$. Якщо прийняти $f_1(P)$ у вигляді симетричної кривої нормального розподілу, то функція $f_{\Sigma}(P)$ є асиметричною кривою, максимум якої зміщений вліво (у бік менших значень P). Середній рівень міцності й надійності системи з двох ланок зменшується у порівнянні з рівнем міцності й надійності однієї ланки.

Міцність одного зварного з'єднання визначається властивостями шва, перерізом цього елемента та характером навантаження. Для статичного навантаження осьовим розтягом (рис. 2а) руйнівне зусилля P знаходять із залежності

$$P = \sigma_6 F, \tag{3}$$

де σ_6 – границя міцності матеріалу в ділянці зварного шва; F – площа поперечного перерізу зварного з'єднання.

Кожна з цих величин σ_6 та F має розсіювання. Розглянемо зміну руйнівного зусилля P залежно від зміни σ_6 та F . Середнє значення руйнівного навантаження $\bar{P} = \bar{\sigma}_6 \bar{F}$ і розсіювання величин σ_6 та F , на перший погляд, не повинно впливати на

імовірність руйнівності. Однак дисперсія D_z добутку двох величин x і y , яку визначаємо за формулою

$$D_z = D_x D_y + \bar{x}^2 D_y + \bar{y}^2 D_x, \quad (4)$$

впливає на імовірність руйнівності при незмінному рівні експлуатаційних навантажень.

Для дослідження поведінки зварних швів при навантажуванні статичним розтягуванням використано стандартизований 10-кратний зразок (робоча частина 100 мм завдовжки, 10 мм завширшки), виготовлений з пластини товщиною 4 мм зі сталі ВСт 3пс (рис. 3). Робоча частина зразка має два напусткових зварних з'єднання, виконаних ручним дуговим зварюванням постійним струмом електродами типу АНО-21 діаметром 3 мм, струм зварювання становив 130 А. Зварював один зварювальник 4 розряду.

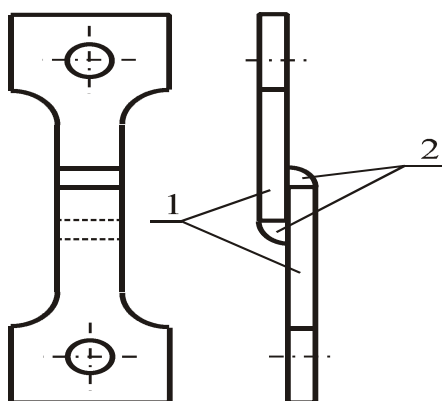


Рис. 3. Конструкція зразка для дослідження поведінки зварних з'єднань при статичному навантажуванні:

1 – основний матеріал; 2 – ділянка зварного шва

Тип з'єднання вибрано з умови ідентифікації роботи зварного шва в реальній конструкції.

Згідно з вищеописаною методикою дослідження виконано на 15 однотипних зразках. За отриманими експериментальними результатами сформовано інформаційну базу значень границі міцності зварних швів і уточнених розмірів їх поперечних перерізів у місці руйнування. Визначено статистичні показники розсіювання цих значень.

За їх результатами згідно з рекомендаціями [8] отримано $\bar{\sigma}_e = 320$ МПа; $\bar{F} = 100$ мм², середнє квадратичне відхилення $S_\sigma = 25$ МПа, $S_F = 5$ мм², дисперсія $D_\sigma = 625$ МПа², $D_F = 25$ мм⁴. Дисперсію руйнівного навантаження знаходимо за формулою (4)

$$D_P = 625 \times 25 + 320^2 \times 25 + 100^2 \times 625 = 8,82 \times 10^6 \text{ Н}^2.$$

Середнє квадратичне відхилення

$$S_P = \sqrt{D_P} = 2970 \text{ Н.}$$

Математичне сподівання руйнівного навантаження

$$\bar{P} = \bar{\sigma}_e \bar{F} = 320 \times 100 = 3,2 \times 10^4 \text{ Н.}$$

Коефіцієнт варіації руйнівного навантаження

$$v_P = S_P / \bar{P} = 2970 / 3,2 \times 10^4 = 0,093,$$

що перевищує коефіцієнти варіації

$$v_\sigma = S_\sigma / \bar{\sigma}_e = 25 / 320 = 0,078,$$

$$v_F = S_F / \bar{F} = 5 / 100 = 0,050.$$

Отже, розсіювання величин σ_e та F впливає на характеристики надійності зварних з'єднань при їх сумісному навантаженні, зокрема на імовірність руйнівності.

Висновки. Отримані в роботі результати дають можливість стверджувати, що зі збільшенням кількості зварних з'єднань навантажена конструкція втрачає імовірність неруйнування при всіх інших постійних параметрах. Це зумовлене розсіюванням механічних характеристик конструкційних матеріалів та зварних швів. Характеристики надійності зменшуються також при збільшенні розсіювання показників міцності матеріалу і зварних швів. Отже, максимальну надійність зварної навантаженої конструкції можна отримати при високих значеннях міцності матеріалу та зварного шва і мінімальній кількості зварних з'єднань при всіх інших незмінних параметрах.

Результати роботи можна використовувати як на етапі проектування зварних навантажених конструкцій для визначення характеристик надійності, так і для експертного оцінювання конструкцій, які експлуатуються.

Література

1. Фошко Э. Оценка надёжности теплоэнергетического оборудования электростанций с использованием полумарковских процессов // Структура генерирующих мощностей и режимы работы энергосистемы / Эдуард Фошко. – М., 2003. – С. 93 – 102.
2. Клёмин А. И. Надёжность ядерных энергетических установок: Основы расчёта / А.И. Клёмин. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 344 с.
3. Митрофанов А. В. Расчет гамма-процентного ресурса сосудов и резервуаров / А. В. Митрофанов, С. Б. Киченко // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №9. – С. 28 – 32.
4. 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.
5. Кузнецов А. А. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента: справочник / А. А. Кузнецов, О. М. Алифанов, В. И. Ветров и др. – М.: Машиностроение, 2002. – 568 с.
6. Тимофеев Б. Т. Статистический подход к оценке качества и свойств сварных соединений / Б. Т. Тимофеев. – Л.: ЛДНТП, 2005. – 23 с.
7. Шокин Ю. И. Вероятностные модели технологической дефектности сварных соединений / Ю. И. Шокин, А. М. Лепихин, В. В. Москвичев. – Красноярск, 2002. – 20 с. – (Препринт / ВЦ СО РАН 2002-8).
8. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М. Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1998. – 231 с.

Одержано 16.11.2009р.