

УДК 539.434

Підгурський М. І.

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ВТОМНИХ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Руйнування циклічно навантажених зварних конструкцій є багатофакторним явищем, яке значною мірою залежить від геометричної та структурної неоднорідності зварних швів.

На сьогоднішній день для прогнозування довговічності нараховується близько 10 основних методів і більше 150 їх модифікацій [1, 2]. Різноманіття підходів свідчить про постійне удосконалення розрахункових залежностей з метою отримання найбільш вірогідних оцінок довговічності.

Для прогнозування довговічності конструкцій традиційно застосовуються методи, основні на аналізі стадії зародження тріщини. Найчастіше розрахунок довговічності вузла зварного з'єднання здійснюється за кривою втоми елемента зварного з'єднання [1]. Положення кривої втоми міцності, в інтегральному вигляді враховує всі фактори, що визначають циклічну міцність з'єднання: концентрацію напружень, рівень залишкових напружень, структурну неоднорідність матеріалу шва та ін. Проте стохастична природа геометричних параметрів зварних швів та технологічних дефектів призводять до значного розкиду показників довговічності. У зв'язку з цим вводяться коефіцієнти запасу (до 10 за довговічністю), що приводить до завищення матеріаломісткості конструкцій.

Метою роботи є вивчення причин зародження втомних тріщин та складання математичної моделі їх розповсюдження у елементах зварних конструкцій.

Широкі можливості для розробки більш універсальних методів розрахунку дає метод скінчених елементів (МСЕ). Одним з основних у цьому напрямку є «метод напруження в ефективному концентраторі» [3]. У зв'язку з тим, що моделювання геометрії надрізу практично неможливе через неправильну форму зварного шва, підрізу, непровару та ін., то цю проблему вирішено шляхом запровадження ефективного радіуса заокруглень в концентраторі (названого ефективним концентратором). Коректність цього підходу було підтверджено результатами експериментальних досліджень зварних з'єднань різних типів. Графік розподілу ймовірності результатів досліджень показав, що можна знайти єдиний радіус ефективного концентратора (для сталі він складає ≈ 1 мм), коли всі результати належать єдиній статистичній сукупності. Даний метод став потужним інструментом моделювання геометрії зварних швів з наявними дефектами МСЕ. Він включений в рекомендації Міжнародного інституту зварювання [4], у норми Німецької асоціації машинобудівних компаній [5] і застосовується для розрахунку елементів конструкцій на довговічність на стадії зародження втомних тріщин. До недоліків методу напруження в ефективному концентраторі слід віднести його обмеженість товщиною металу $t \geq 5$ мм.

Все більшого поширення для розрахунку елементів зварних конструкцій набувають методи механіки руйнування [1, 6]. Застосування підходів механіки руйнування має практичне підґрунтя, оскільки втомні тріщини у зв'язку з наявною дефектністю, високою концентрацією напружень, залишковими деформаціями зварювання з'являються вже на ранніх стадіях експлуатації машин або (як у випадку тріщин зварювання) ще в процесі виготовлення машин, визначаючи, значною мірою, їх надійність та ресурс.

У загальному випадку число циклів до руйнування N визначається кількістю циклів до виникнення втомної тріщини N_0 і числом циклів її розвитку N_{mp} :

$$N = N_0 + N_{mp}. \quad (1)$$

Зважаючи на те, що стадії зародження і розвитку втомних тріщин описуються різними математичними моделями, то принципово важливим є встановлення співвідношення між стадіями зародження і розповсюдження тріщини в залежності від концентрації напружень в зоні зварного з'єднання.

На основі даних [1] та результатів експериментальних досліджень втомної міцності лабораторних зразків, великогабаритних таврових з'єднань та зразків з привареною накладкою (сталь 09Г2С, ручне зварювання здійснювалось електродами УОНИ – 13/55) показано (рис. 1), що при відсутності концентратора напружень число циклів N_0 , необхідне для зародження тріщини, становить 0,8–0,9 загального числа циклів N до руйнування. При збільшенні концентрації напружень до $\alpha_\sigma = 1,9$ (зварне з'єднання з привареними накладками) та $\alpha_\sigma = 3,6–3,8$ (зварне з'єднання з ініційованими надрізами, що імітують гострі підрізи), відношення N_0/N суттєво зменшується.

Таким чином, в процесі експлуатації при можливому поєднанні концентрації напружень, високого рівня залишкових напружень і наявності технологічних дефектів (підрізи, непровари та ін.) тріщини можуть виникати і при обмеженому числі циклів навантажень. Причому емпірична автотомодель подібності довговічності реальних конструкцій, зокрема рам, і напівнатурних зразків, що моделюють реальні зварні з'єднання рам мобільних машин досягається при наявності в модельних зразках штучно ініційованих дефектів (зокрема надрізів глибиною 2,0–2,5 мм виконаних дисковою фрезою товщиною 0,13 мм в зоні підходу шва до основного металу (рис. 2).

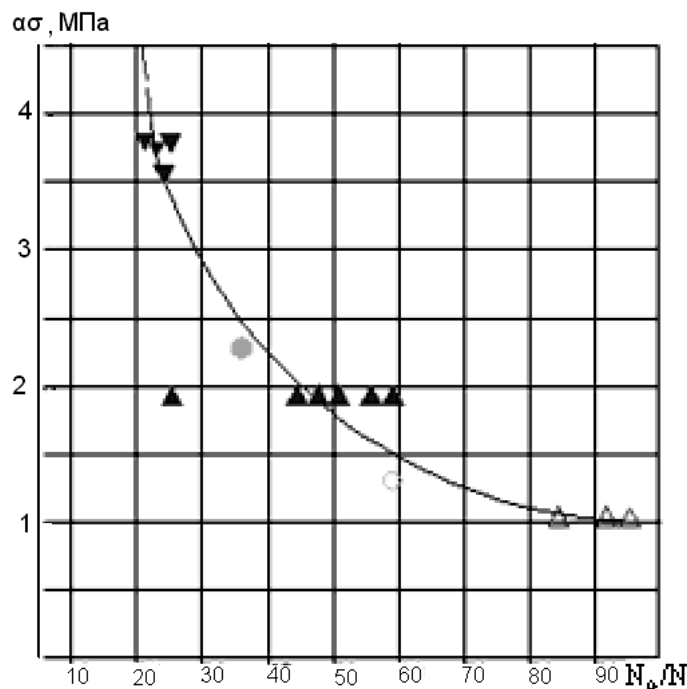


Рис. 1. Залежність відносного числа циклів до зародження втомної тріщини від рівня концентрації напружень:

\triangle \blacktriangle \blacktriangledown – експериментальні дані; \circ \bullet – дані роботи [1]

Таким чином, підтверджується концепція неминучої наявності дефектів у великогабаритних зварних конструкціях. Про це свідчать також дані неруйнівного контролю (візуальний, капілярний) великогабаритних рамних конструкцій мобільних сільськогосподарських машин. Досліджено дефектність зварних з'єднань замкнутих профільних елементів (сталь

09Г2С; t = 4–8 мм), які виконані напівавтоматичним зварюванням в середовищі CO₂, дріт Св-08Г2С. Зварювання виконувалось згідно ГОСТ 5264.80. Виявлено дефекти швів – подрізи, непровари, пори, різкі переходи від основного до наплавленого металу.

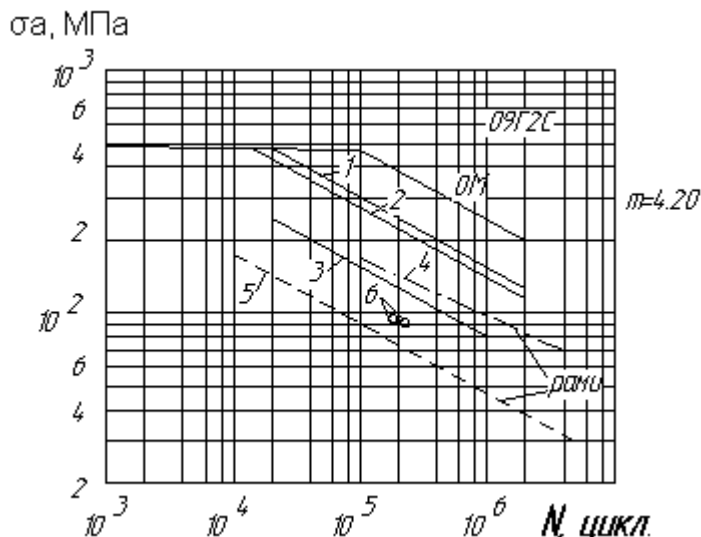


Рис. 2. Діаграми втомної міцності сталі 09Г2С та елементів зварних з’єднань:

ОМ – базова діаграма сталі; 1, 2 – з’єднання: з привареною накладкою (1); таврове (2); 3 – таврові з’єднання з ініційованими надрізами; 4, 5, 6 – рамні конструкції мобільних машин (4 – [7]; 5 – [8])

Параметри розподілу характеристик подрізів, як одного з найбільш небезпечних дефектів зварних з’єднань наведено в табл. 1. Відзначено, що функції розподілу розмірів подрізів описуються законом Вейбулла-Гнеденка:

$$F(l_i) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{a}\right)^b, \tag{2}$$

де l_i – розміри дефекту; a і b – параметри розподілу. Максимальні розміри подрізів досягають 30...40 мм за довжиною і 1,5...2 мм по глибині.

Таблиця 1

Параметри розподілу характеристик подрізів

| Вид дефекту | Розмір дефекту | Середнє значення розміру, мм | Середнє квадратичне відхилення | Коефіцієнт варіації | Параметри | |
|-------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------|------|
| | | | | | a | b |
| подріз | довжина | 7,15 | 6,48 | 0,89 | 1,12 | 7,21 |
| | глибина | 0,76 | 0,45 | 0,592 | 1,8 | 0,87 |

Наявність технологічних дефектів зварювання спостерігалась у зварних швах відповідальних конструкцій кульових газгольдерів об’ємом 2000 м³ (сталь 09Г2С, t = 36 мм) [9]. Оцінка впливу технологічних дефектів зварювання наведена, зокрема в [1].

Імовірнісний характер розташування дефектів різної природи зумовлює випадковість локалізації, орієнтації та часу виникнення тріщин в процесі експлуатаційного навантаження. Причому у багатьох випадках (рис. 3) спостерігається багатоосередковий характер зародження невеликих поверхневих макротріщин (показано стрілками) біля кромки зварного шва у процесі циклічного навантаження. Розвиваючись, тріщини зближуються, перетинки між ними руйнуються, залишаючи на зламах рубці і східці, а сідловидний фронт тріщини, що утворилася, випрямляється та стабілізується. Надалі магістральна тріщина, розвиваючись при циклічному навантаженні, приводить до руйнування зразка.

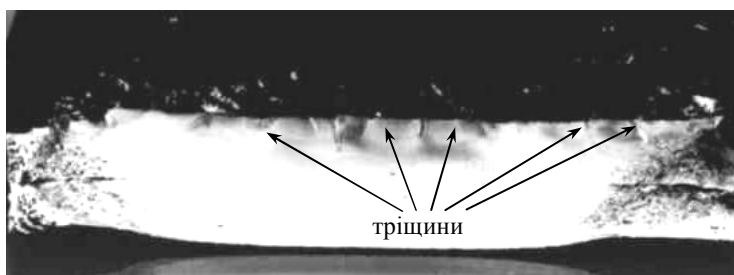


Рис. 3. Поверхня руйнування зразка з привареною накладкою, що демонструє багатоосередковий характер зародження поверхневих тріщин

Аналогічні закономірності, що спостерігаються при об'єднанні магістральних поверхневих тріщин, описані в роботах [10–12].

У зв'язку зі стохастичною природою зародження і розповсюдження тріщин, аналітичні моделі вносять значні похибки при прогнозуванні довговічності зварних з'єднань, суттєво завищуючи результати розрахунку. Існуючі моделі трансформації дефектів у тріщині [13, 14] базуються на спрощених підходах, зокрема схематизації дефектів і не враховують реальної кінетики розвитку тріщини. Імітаційне моделювання розвитку дефектності [10] не знімає невизначеностей, пов'язаних із зародженням і розвитком тріщин. Нормативні документи неоднозначно трактують розмір початкової тріщини a_0 , який закладається в розрахунок живучості методами механіки руйнування.

Для уніфікації початкової стадії зародження і розвитку тріщини при розрахунку довговічності запропоновано концепцію наявності в зварному елементі умовної початкової тріщини. У відповідності з цією концепцією розроблено математичну модель зародження і розповсюдження поверхневої тріщини, яка враховує випадкову геометрію зварних швів, різноманіття дефектів і їх початкових розмірів (саме від цих факторів залежить період зародження тріщини) і їх об'єднання (від цього фактора залежить імовірнісна природа розвитку тріщини) (рис. 4).

Згідно із запропонованою математичною моделлю, проведено втомні випробування напівнатурних зразків, що моделюють зварні з'єднання реальних конструкцій. Зварні шви виконувались з дотриманням технологічної подібності зварювання. В процесі досліджень фіксувалася кінетика розвитку тріщини і число циклів до руйнування кожного зразка.

За результатами експериментальних досліджень отримано апроксимаційну залежність, що описує ідеалізовану кінетику поверхневої тріщини в зоні кутового шва:

$$\frac{a}{c} = 0,813 - 2,51\left(\frac{a}{t}\right) + 4,428\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 2,54\left(\frac{a}{t}\right)^3. \quad (3)$$

Слід зазначити один методологічний аспект. Форма поверхневих тріщин, які зародилися при циклічному навантаженні (природне зародження тріщин), і яку характеризує співвідношення півосей a/c , суттєвим чином (у кілька разів) відрізняється від форми поверхневих тріщин, що утворюються штучними способами [14]. Цю особливість слід враховувати при моделюванні кінетики розвитку поверхневих тріщин та при оцінці довговічності.

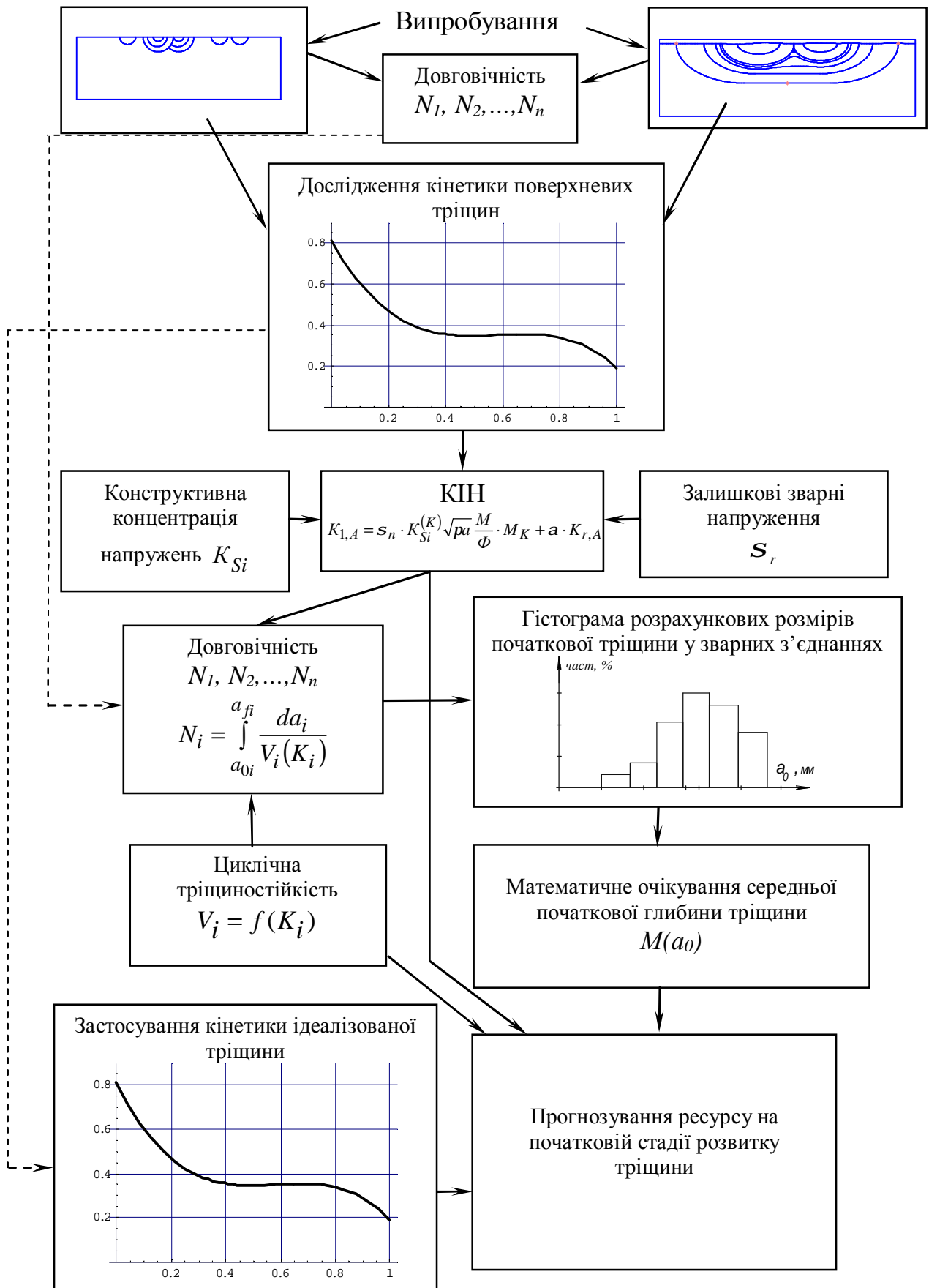


Рис. 4. Структурна схема алгоритму розрахунку, яка основана на моделюванні процесу зародження і розвитку поверхневих тріщин

За отриманими даними, у відповідності із запропонованою математичною моделлю розв'язувалась обернена задача прогнозування живучості $N_{mp} = N_i$ кожного модельного зразка з врахуванням ідеалізованої форми поверхневої тріщини та числа циклів до руйнування.

При розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень КІН $K_i = K_{i,нов.}$ поверхневих напівеліптичних тріщин застосовували модифіковане рівняння Ньюмена-Райю [15], що враховує конструктивну концентрацію напружень K_S в зоні зварного шва та її перерозподіл по товщині елемента за допомогою коефіцієнта M_K . Вплив залишкових зварних напружень оцінювали за методикою [16], додаючи їх до номінальних напружень.

Таким чином, КІН у найглибшій точці (А) та на поверхні (В) поверхневої напівеліптичної тріщини:

$$K_{i,A} = S_n \cdot K_{si} \cdot \sqrt{pa} \cdot \frac{M}{\Phi} \cdot M_K + a \cdot K_{T,A};$$

$$K_{i,B} = S_n \cdot K_{si} \cdot \sqrt{pa} \cdot \frac{M \cdot S}{\Phi} + a \cdot K_{T,B},$$
(4)

де S_n – номінальні напруження в елементі зварного з'єднання.

За результатами розрахунків побудовано гістограму початкових розмірів дефектів зварного з'єднання сталі 09Г2С (рис. 5).

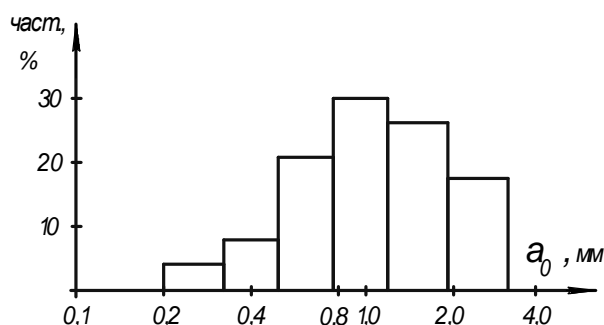


Рис. 5. Гістограма розрахункових розмірів початкової тріщини у зварних швах сталі 09Г2С

На основі випробувань зразків було встановлено статистичний розподіл розмірів початкових тріщин a_0 , який можна розглядати як характеристику дефектності зварювання. Встановлено, що розподіл початкових тріщин близький до логарифмічно-нормального із густиною ймовірності (ДСТУ 3433-96) [17]:

$$f(a_0) = \frac{1}{a_0 \cdot s \cdot \sqrt{2p}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a_0 - m)^2}{2s}\right],$$
(5)

де a_0 – глибина тріщини; μ та σ – статистичні параметри: $\mu = 0,029$; $\sigma = 0,73$. Математичне очікування середньої початкової глибини тріщини:

$$M(a_0) = \exp\left(m + \frac{s^2}{2}\right) = 1,27 \text{ мм.}$$
(6)

Необхідно відзначити, що використання кінематичних діаграм втомного руйнування, за якими визначалась швидкість росту тріщин $V_i(K_i)$, достатньо обґрунтовано для довгих тріщин. Закономірності розвитку коротких тріщин суттєво відрізняються від властивостей,

характерних для довгих тріщин [1]. Оскільки на практиці прийнято встановлювати розмір (найчастіше в межах $0,5 \div 1,0$ мм), що відділяє короткі тріщини від довгих, керуючись при цьому технічними можливостями виявлення і вимірювання довжини тріщини [1, 6], та розрахунки проводились в межах лінійної механіки втомного руйнування.

ВИСНОВКИ

Запропоновано науково обґрунтований підхід до нормування дефектів зварювання на основі розрахунково-експериментальної методики отримання статистичного розподілу розмірів початкових тріщин, одержаних при випробуваннях партії напівнатурних зразків, що моделюють реальні зварні з'єднання. Статистичний розподіл умовних початкових тріщин можна розглядати як характеристику дефектності конкретної технології зварювання, зважаючи на те, що автоматичне механізоване, ручне зварювання мають певний статистичний розподіл [18]. Подальші дослідження будуть направлені на встановлення статистичних розподілів умовних початкових тріщин для різних технологій зварювання. Оцінка умовної початкової тріщини суттєво підвищує точність розрахунків довговічності зварних конструкцій методами механіки руйнувань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Винокуров В. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. Д. Николаев ; под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с.
2. Почтенный Е. К. Оценка ресурса конструкций по сопротивлению усталости при типовых режимах эксплуатации в условиях случайного нагружения / Е. К. Почтенный, С. М. Минюкович, А. В. Шмелев // Вестник машиностроения. – 2006. – № 8. – С. 13–19.
3. Хоббахер А. Ф. Расчет на усталость сварных конструкций по напряжениям / А. Ф. Хоббахер // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10–11. – С. 122–126.
4. Hobbacher A. et al. Fatigue design of welded joints and components. – Int. Inst. of Welding. Abington publ., Cambridge UK, 1996. – 103 p.
5. Anthes R. J. Kerbformzahlen von Stumpfstößen und Doppel. – T-Stößen / R. J. Anthes, V. B. Köttgen, T. Seeger // Schweissen und Schneiden. – 1993. – № 12. – P. 43–49.
6. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К. : Наук. думка, 2006. – 619 с.
7. Миркитанов В. И. Повышение долговечности рам тракторных полуприцепов / В. И. Миркитанов, К. В. Щурин // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – № 5. – С. 37–39.
8. Дмитриченко С. С. Повышение долговечности деталей и узлов машин на основе априорных данных каталога характеристик сопротивления усталости / С. С. Дмитриченко, Н. М. Понкратов, Ю. С. Борисов // Вестник машиностроения. – 1993. – № 2. – С. 3–7.
9. Евдокимов В. В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния и долговечности шаровых газгольдеров / В. В. Евдокимов, Н. И. Пидгурский // Сб. науч. трудов «Трещиностойкость строительных металлических конструкций». – М. : ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. – 1988. – С. 152–166.
10. Статистические закономерности малоциклового разрушения / Н. А. Махутов, В. В. Зацаринный, Ж. Л. Базарас и др. – М. : Наука, 1989. – 252 с.
11. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1990. – 448 с.
12. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослабления сечений для дефектов в сварных соединениях. Методические рекомендации / А. А. Попов, Г. В. Васильченко, Е. Ю. Ривкин и др. – К. : ИЭС им. Патона, 1991. – 40 с.
13. Hobbacher A. IIF Fatigue Design Recommendations XIII-1539-94, XV 845-94-1994. – 112 p.
14. Підгірський М. І. Критерії розвитку втомних поверхневих тріщин у зварних вузлах металоконструкцій / М. І. Підгірський // Вісник ТДТУ. – 2008. – Т. 13. – С. 35–42.
15. Newman I. C. An empirical stress intensity factors a equation for the surface crack / I. C. Newman, I. S. Raju // Eng. Fract.Mech. – 1981. – V. 15. – № 1–2. – Pp. 185–192.
16. Труфяков В. И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / В. И. Труфяков. – К. : Наук. думка, 1990. – 256 с.
17. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. – К. : Держстандарт України, 1998. – 42 с.
18. Доронин С. В. Нормирование долговечности и дефектности сварных конструкций / С. В. Доронин, В. В. Москвичев // Проблемы прочности и надежности машин. – 1998. – № 1. – С. 44–49.