

УДК 539.4

В. Сидяченко, к.т.н., ст.досл., А. Котляренко, к.т.н.

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Україна

**ПРОГНОЗУВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ КОРПУСНИХ РЕАКТОРНИХ
СТАЛЕЙ В ОБЛАСТІ КРИХКО-В'ЯЗКОГО ПЕРЕХОДУ НА ОСНОВІ
ЛОКАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДВОВІСНОГО
НАВАНТАЖЕННЯ**

V. Sidyachenko, Ph.D., Senior Researcher, A. Kotliarenko, Ph.D

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Ukraine

**PREDICTION OF THE FRACTURE TOUGHNESS OF REACTOR PRESSURE
VESSEL STEEL IN THE AREA OF THE BRITTLE-DUCTILE TRANSITION
BASED ON LOCAL MODELS AND TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE
OF BIAXIAL LOADING**

Abstract. The Master curve for reactor pressure vessel steel 15Cr2NiMoFA-A was experimentally constructed. Fracture toughness estimation using the Rice-Tracey model showed satisfactory agreement with the Master curve. A small-sized cruciform specimen was developed, the effect of biaxial bending on the crack resistance of 15Cr2NiMoFA-A steel was investigated, and a decrease in fracture toughness compared to uniaxial loading was shown.

На ділянці крихко-в'язкого переходу механізм руйнування сколом викликає значний розкид в'язкості руйнування у порівнянні з нижнім шельфом, що спонукає до застосування методів математичної статистики.

На основі великої кількості експериментальних випробувань реакторних сталей було зроблено наступні висновки, які лягли в основу розробки стандарту [1] на Майстер-криву:

- Розкид в'язкості руйнування в перехідній області підлягає характерному статистичному розподілу схожому для всіх феритних сталей

- Форма температурної кривої для всіх феритних сталей на перехідній температурній ділянці має схожий характер і відмінність між ними полягає тільки в позиціюванні на температурній осі.

Оскільки в області крихко-в'язкого переходу початкове підростання тріщини відбувається в'язко, тобто за механізмом зародження, росту та об'єднання пор то постає питання верифікації локальних моделей в'язкого руйнування (Райса-Трейсі) для оцінки статичної тріщиностійкості реакторної корпусної сталі в області крихко-в'язкого переходу.

Крім того, одним з можливих шляхів пошуку резервів міцності при розрахунках на опір крихкому руйнуванню корпусу реактора є врахування впливу реального двовісного навантаження на береги поверхневої постульованої тріщини в стінці корпусу реактора з врахуванням її глибини.

Отже, враховуючи зазначене вище, метою даної роботи є верифікація моделей локального в'язкого руйнування для оцінки величини в'язкості руйнування в області крихко-в'язкого переходу та експериментальне дослідження статичної тріщиностійкості при двовісному згині для корпусної реакторної сталі 15X2НМФА-А.

За одно температурним методом [1] на стандартних СТ-1 зразках було побудовано Майстер криву та довірчі інтервали для сталі 15X2НМФА-А з наступною, згідно сертифікату, термообробкою: нормалізація при температурі 890⁰...920⁰С, відпуск при 650⁰...670⁰С.

Мікроструктурі дослідження сталі показали значну неоднорідність, що може обумовлювати розкид властивостей в різних зонах вирізки зразків, а волокниста структура призводить до вираженої анізотропії властивостей в різних перерізах заготовки. Після дослідження механічних властивостей сталі в трьох взаємно ортогональних напрямках було прийнято рішення вирізати СТ-1 і спеціальні хрестоподібні зразки для дослідження тріщиностійкості при двовісному згині (рис.1) так, щоб площина тріщини була перпендикулярна напрямку де було отримано максимальні характеристики умовної границі текучості ($\sigma_{0,2}=462,08$ МПа, $\sigma_B=715,75$ МПа). Із загальних закономірностей для цих зразків слід очікувати мінімальні характеристики тріщиностійкості, тобто консервативний результат.

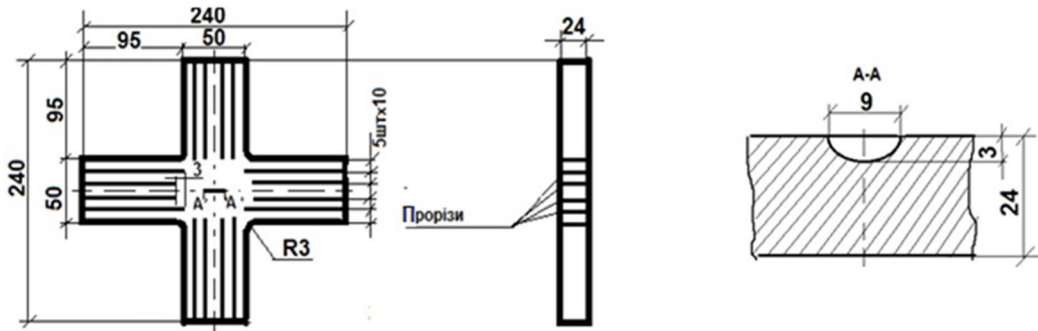


Рис.1. Хрестоподібний зразок із поверхневим напівеліптичним концентратором для випробувань на двовісний згин [2].

У відповідності до моделі Райса-Трейсі [3] критерієм зрушення тріщини є критичний радіус пор (R/R_0)_c оцінка якого здійснювалась попередньо при розтягуванні циліндричних зразків з врахуванням шийкоутворення. При цьому експериментальна діаграма в координатах «навантаження – звуження», отримана при розтягуванні гладких циліндричних зразків порівнюється з розрахунковою (МСЕ) і визначається критичний радіус пори за формулою (1) в момент коли розрахункове звуження зразка буде дорівнювати експериментальному в момент руйнування. З цією метою використовують данні про гідростатичне напруження (σ_m), границю текучості (σ_{ys}) та еквіваленту пластичну деформацію (ε_{eq}^p) в центральному елементі в перерізі виникнення шийки.

Для пост процесорної обробки розрахунків пропонується використовувати формулу Райса-Трейсі в наступному вигляді:

$$\ln(R/R_0)_{i+1} = \ln(R/R_0)_i + 0.283 \cdot \Delta \varepsilon_{eq}^p \cdot \exp(1.5 \sigma_m / \sigma_{ys}), \quad (1)$$

де $(R/R_0)_{i+1}$ - швидкість росту пори на кроці $i+1$, $(R/R_0)_i$ - швидкість росту пори на кроці i , $(R/R_0)_0=1$.

Раніше [4] було показано, що результати прогнозування за залежністю (1) суттєво залежать від розміру скінчених елементів.

В роботі [4] запропонована модифікація моделі Райса – Трейсі:

$$\Psi = \int_{A(r=2J/\sigma_y)} \{ \int 0.283 \exp(3\sigma_m/2\sigma_{eq}) d\varepsilon_{eq}^p \} dA, \quad (2)$$

яка полягає осередненні відносного радіусу пор в зоні процесу, розмір якої визначається як $2J/\sigma_y$. Це дозволило позбутися залежності параметра $(R/R_0)_i$ від розміру скінченого елемента. В даній роботі було здійснено (МСЕ) 3D моделювання в'язкого зрушення тріщини в СТ-1 зразку за формулою (2). При розрахунку статичної тріщиностійкості J_c моделювали зростання параметра R/R_0 перед вершиною тріщини в СТ-1 зразку при навантаженні його по лінії дії сили переміщенням по аналогії з експериментом. При цьому на кожному кроці навантаження розраховувався J -інтеграл і

розмір зони процесу біля вершини тріщини що дорівнював $2J/\sigma_{0.2}$. Параметр R/R_0 осереднювався по розміру зони процесу за формулою (2), що нівелює вплив розміру елементів на величину параметру. При перерахунку отриманого при (МСЕ) моделюванні J_c в K_{Jc} за формулою: $K_{Jc} = \sqrt{J_c E} = \sqrt{40653 \times 2 \times 10^{11}} = 90 \text{ МПа м}^{1/2}$, можна помітити з рис.2 (Майстер кривої) задовільний збіг з експериментальними даними при температурі 25°C

Дані моделювання в'язкості руйнування за формулою (2) і результати експериментів по впливу двовісного згину на тріщиностійкість корпусної сталі 15X2НМФА-А перераховані за залежністю роботи [1]:

$$K_{Jc} = K_{min} + [K_{Jc(0)} - K_{min}](B_0/B_x)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

на стандартні СТ-1 зразки показані на рис.2 у порівнянні з експериментальними результатами по в'язкості руйнування отриманими при випробуваннях на триточковий згин зразків з короткими ($a/W=0.1 \dots 0.2$) тріщинами [2].

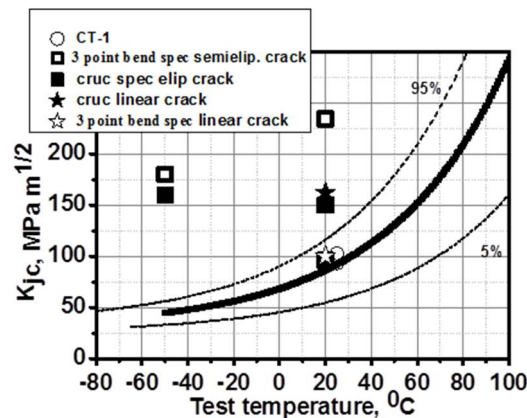


Рис.2. Майстер крива для сталі 15X2НМФА-А, побудована на СТ-1 зразках, результати тестових експериментів на в'язкість руйнування на триточковий згин і на хрестоподібних зразках при двовісному згині перераховані за стандартом [1] на СТ-1 зразки [2].

Проведений аналіз показав, що данні по тріщиностійкості, отримані в роботі [2] на зразках з «короткими» ($a/W=0.1 \dots 0.2$) лінійними і напівеліптичними тріщинами виходять за верхню межу довірчого інтервалу Майстер кривої, а двовісне навантаження хрестоподібних зразків, з врахуванням моменту зрушення тріщини знижує тріщиностійкість у порівнянні з одновісним навантаженням зразків з короткою тріщиною, що в цілому підтверджує тенденції описані в літературних джерелах. Задовільний збіг прогнозування за моделлю Райса-Трейсі та експерименту свідчить про можливість застосування останньої для оцінки в'язкості руйнування реакторних сталей в умовах обмеженої кількості матеріалу.

Література.

1. ASTM E 1921–17a. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range.
2. Покровський В.В., Сидяченко В.Г., Єжов В.М. До розробки експериментальної методики оцінки впливу двовісного навантаження на характеристики статичної тріщиностійкості корпусних реакторних сталей. *Пробл. Міцності*. 2022. №2. С.28-39.
3. Rice J.R., Tracey D.M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *J. of the Mech. and Phys. of Solids*. 1969. Vol.17. P.201-217.
4. Dutta B.K., Kushwaha H.S. A modified damage potential to predict crack initiation: theory and experimental verification. *Eng. Fract. Mech.* Vol.71. P.263–275.