

Експериментальні дослідження впливу двовісного згину на тріщиностійкість корпусної реакторної сталі

В.Г. Сидяченко, В.В. Покровський

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Анотація. На основі чисельних та інженерних розрахунків розроблено зразки, відповідне додаткове обладнання для їх випробувань при двовісному навантаженні на одноосовій сервогідравлічній машині. Експериментально досліджено вплив двовісного згину на в'язкість руйнування реакторної сталі 15X2НМФАА. Результати, отримані на хрестоподібних зразках, перераховано за стандартом ASTM 1921 і нанесено на Майстер криву (температурну залежність в'язкості руйнування). Аналіз показав, що данні по тріщиностійкості, отримані на зразках з «короткими» ($a/W=0.1\dots 0.2$) лінійними і поверхневими напівеліптичними тріщинами виходять за верхню межу довірчого інтервалу Майстер кривої, а двовісне навантаження хрестоподібних зразків, знижує тріщиностійкість у порівнянні з одновісним навантаженням. В результаті виконання досліджень показано, що врахування коротких тріщин і двовісного навантаження може служити резервом міцності при уточненій оцінці залишкового ресурсу корпусів атомних реакторів.

Ключові слова: двовісне навантаження, хрестоподібний зразок, тріщиностійкість, в'язкість руйнування, J -інтеграл, напівеліптична поверхнева тріщина.

Вступ

Характеристики тріщиностійкості реакторних сталей, отримані за стандартами на в'язкість руйнування демонструють значний ступінь консерватизму. 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. Піонерськими роботами присвячені дослідженню впливу двовісного навантаження, відповідної до постульованих в стінці корпусу реактора конфігурації, на характеристики статичної тріщиностійкості є праці професора Басса [1] в яких було розроблено великогабаритний хрестоподібний зразок на п'ятиточковий згин, що дозволив для реакторних сталей в неопромінену стані (вихідний матеріал) вивчати одночасно вплив ефекту «коротких тріщин», двовісного навантаження (наближеного до того що реалізується в стінці корпусу реактора) на характеристику тріщиностійкості K_{Ic} . Враховуючи велику вартість виготовлення крупногабаритних хрестоподібних зразків і неможливість виконання порівняльних експериментальних досліджень для опроміненого й вихідного матеріалу корпусних реакторних сталей, корейськими [2] та німецькими вченими [3] були виконані експериментальні дослідження впливу двовісного навантаження на статичну в'язкість руйнування та температуру крихкості T_0 на зразках, розміри яких наближені до стандартних зразків Шарпі на триточковий згин. В результаті виконаних досліджень на малогабаритних зразках було отримано закономірності впливу двовісного навантаження на характеристики статичної тріщиностійкості подібні до тих що й на великогабаритних, але при цьому відзначалось що з врахуванням зміни скутості деформацій по фронту тріщини необхідні подальші розрахунково-експериментальні дослідження в даному напрямку.

Матеріали і методи досліджень. Для розробки експериментальної методики було вибрано сталь 15X2НМФА-А з наступною, згідно сертифікату, термообробкою: нормалізація при температурі $890^\circ\dots 920^\circ\text{C}$, відпуск при $650^\circ\dots 670^\circ\text{C}$, що за хімічним складом і механічними властивостями ($\sigma_{0.2}=462,08$ МПа, $\sigma_B=715,75$ МПа) відповідає корпусній реакторній сталі для реакторів типу ВВЕР-1000, але відрізняється неоднорідністю мікроструктури. Для випробувань на п'яти точковий згин за схемою, показаною на рис. 1, було розроблено хрестоподібні зразки з лінійним і напівеліптичним концентраторами (рис. 2–3), на

яких перед випробуваннями на статичну тріщиностійкість ініціювали тріщини втоми при їх навантаженні на три точковий згин.



Рис. 1. Пристрій для навантаження на двовісний згин

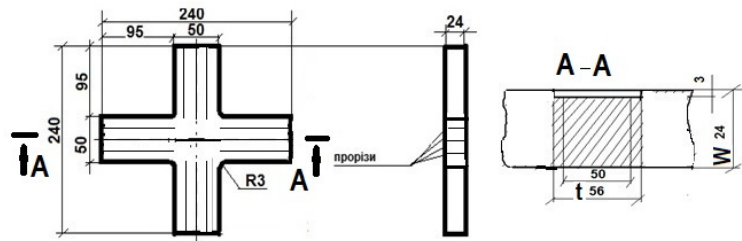


Рис. 2. Хрестоподібний зразок з лінійним концентратором (ХЛ)

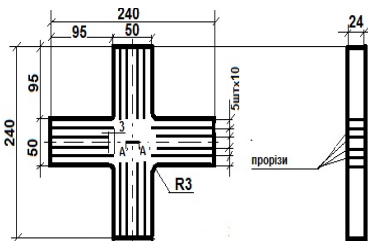


Рис. 3. Хрестоподібний зразок з напівліптичним поверхневим концентратором (ХЕ)

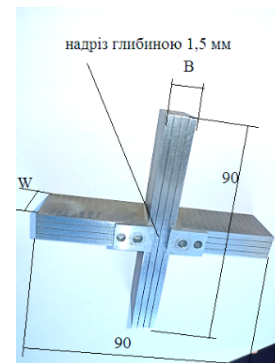
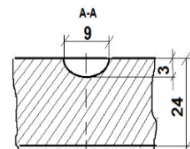


Рис. 4. Малогабаритний хрестоподібний зразок (B=10 мм, W=20 мм) з лінійним концентратором

Зародження тріщини та її зростання контролювали за методом піддатливості, записуючи діаграму навантаження-розкриття берегів тріщини. Детально експериментальну методику та залежності для розрахунку величини J-інтегралу наведено в [4, 5].

Результати. Для порівняння даних по тріщиностійкості, отриманих на хрестоподібних зразках при двовісному згині, з раніше отриманою за стандартом Майстер кривою [6] для даного матеріалу здійснювали їх перерахунок за залежністю (1) на СТ-1 зразки:

$$K_{jc} = K_{\min} + [K_{jc(0)} - K_{\min}] \cdot \left(\frac{B_0}{B_x} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

де $K_{jc(0)}$ - K_{jc} для зразка з довжиною фронту, B_0 – довжина фронту СТ зразка, B_x – довжина фронту зразка що прогнозується, $K_{\min} = 20 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

Тестові дослідження малорозмірного хрестоподібного зразка (рис. 4) при двовісному навантаженні з урахуванням наведених залежностей для обчислення параметрів тріщиностійкості засвідчили узгодженість з отриманими раніше результатами [4, 5], що спонукає до отримання статистично значущих даних при різних температурах, а також дослідження впливу двовісного навантаження на температуру T_0 за Майстер кривою. Дослідження впливу двовісного згину на статичну тріщиностійкість та аналіз умов виконання

умов маломасштабної текучості на досліджуваних зразках, виконаний раніше [4], засвідчили, що за умов мало масштабної текучості двовісне навантаження практично не впливає на величину характеристик тріщиностійкості, а за інших умов навпаки, причому вплив двовісності збільшується зі зменшенням відносної довжини тріщини (рис.5). Злам пробного зразка, зображений на рис.6 свідчить про крихкий характер руйнування і можливість утворення вторинної тріщини з розвантажуючої прорізи при доломі зразка. Для уникнення цього при виконанні подальших досліджень необхідно більше уваги приділяти центруванню зразка при ініціації первинної тріщини втомі і виконувати кінцеві випробування при більшій довжині втомної тріщини для зменшення навантаження на зразок при руйнуванні.

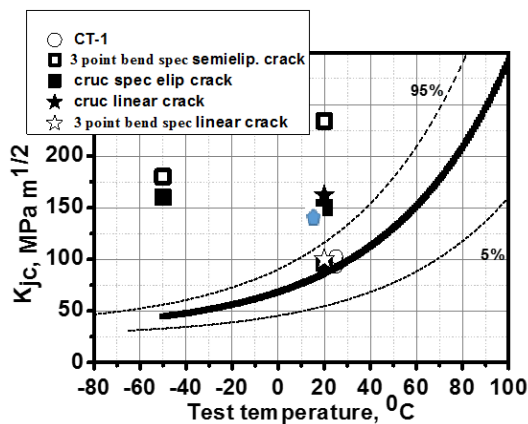


Рис. 5. Майстер крива для сталі 15X2HMFAA, побудована на СТ-1 зразках і результати тестових експериментів виконаних за розробленими методиками і перерахованих для порівняння за стандартом ASTM 1921 на СТ-1 зразки. \blacklozenge - Хрестоподібний 90 мм x 90 мм пробний зразок при двовісному навантаженні, довжина тріщини $a/W=0,12$.

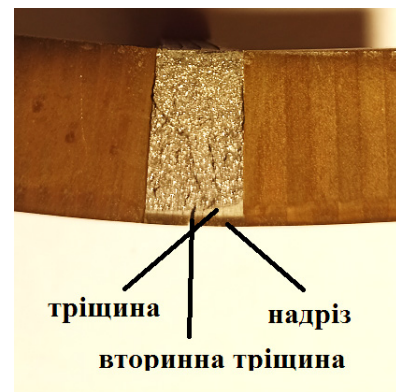


Рис. 6. Фото зламу тестового хрестоподібного зразка.

Обговорення. Аналіз результатів (рис. 5) показав, що дані по тріщиностійкості, отримані на зразках з «короткими» ($a/W=0.1\dots0.2$) лінійними і напівеліптичними тріщинами перевищують в'язкість руйнування отриману на компактних СТ-1 зразках, а двовісне навантаження хрестоподібних зразків з напівеліптичною тріщиною, з врахуванням моменту зрушення тріщини знижує тріщиностійкість у порівнянні з одновісним навантаженням зразків.

Деяке збільшення тріщиностійкості для хрестоподібних зразків на двовісний згин з лінійною тріщиною у порівнянні із одновісним навантаженням на три точковий згин, і зі стандартними компактними зразками може бути пов'язано з порушенням умов мало масштабної текучості у вершині тріщини. Отже, для уточнення отриманих даних і вдосконалення експериментальної методики слід виконати дослідження на більшій кількості зразків з поглибленим вивченням напружено – деформованого стану досліджуваних зразків на предмет виконання умов маломасштабної текучості в залежності від розміру і форми фронту тріщини.

Висновки

В результаті виконання досліджень показано, що врахування коротких тріщин і двовісного навантаження може служити резервом міцності при уточненій оцінці залишкового ресурсу корпусів атомних реакторів, а дослідження тріщиностійкості виконанні на хресто-

подібних зразках зменшеного розміру дозволяє отримати закономірності впливу двовісного навантаження аналогічні тим що і на великогабаритних.

Список літератури

1. W.J.McAfee, B.R.Bass and J.W. Bryson, «Biaxial loading effects on fracture toughness of reactor pressure vessel steel», NREG/CR6273, Pennel W.E., NRC, 1995.
2. J.Hohe, S.Luckow, V.Hardenacke, et al, «Enhanced fracture assessment under biaxial external loads using small scale cruciform bending specimens», *Eng.Fract.Mech.*, vol. 78, pp.1876–1894, 2011, May. 2023. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.03.013.
3. Jong Min Kim, Min Chul Kim and Bong Sang Lee, «Evaluation of Fracture Toughness and Constraint Effect of Cruciform Specimen under Biaxial Loading», *Transaction of the KPVP*, vol.12, pp.62-69, 2016,
4. V.V.Pokrovs'kyi, V.G.Sidyachenko and V.M.Ezhov, «On experimental procedure development for evaluating the effect of biaxial loading on the static crack resistance characteristics of reactor vessel steels», *Strength of Mater.*, vol.54, pp.188-198, 2022, May. 2023. doi.org/10.1007/s11223-022-00394-3.
5. V.V.Pokrovs'kyi, V.G.Sidyachenko and Yu.P.Kurash, «Calculation of crack resistance parameters in cross-shaped specimens in biaxial bending tests», *Strength Mater.* vol. 55, pp. 69–78, 2023, May. 2023. doi.org/10.1007/s11223-023-00503-w.
6. *ASTM E 1921–2018. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range*, ASTM standard, 2018.

Experimental studies of the influence of biaxial bending on the crack resistance of reactor pressure vessel steel

V. Sydiachenko and V. Pokrovskyi

Abstract. Background: to assess the residual life of nuclear reactor hulls in Ukraine, normative temperature dependences of the crack resistance of hull steels obtained on standard samples with a deep through crack under plane strain conditions are used. However, it is known that the thickness of the wall of the reactor body is subject to biaxial loading, which affects the value of the crack resistance characteristics. Therefore, in order to substantiate the possibility of lengthening beyond the design resource of VVER-1000 reactor hulls, an experimental study of the effect of biaxial load on the crack resistance characteristics of hull reactor steel 15X2NMFAA is relevant.

Objective: development of an experimental technique and investigation of crack resistance under biaxial loading on small-sized samples in the brittle-ductile transition temperature range of reactor steels.

Methods: on the basis of numerical and engineering calculations, a specimen was developed, the corresponding additional equipment for its tests under biaxial loading on a uniaxial servo-hydraulic machine. The influence of biaxial bending on the fracture toughness of reactor steel 15X2NMFAA was experimentally investigated.

Results: the results obtained on cruciform specimen are calculated according to the ASTM 1921 standard and plotted on the Master curve (temperature dependence of fracture toughness). The analysis showed that the data on crack resistance obtained on samples with "short" ($a/W=0.1...0.2$) linear and surface semi-elliptical cracks exceed the upper limit of the confidence interval of the Master curve, and biaxial loading of cruciform specimen reduces crack resistance compared to uniaxial loading.

Keywords: biaxial loading, cruciform specimen, crack resistance, fracture toughness, J -integral, semi-elliptical surface crack