

Методика визначення характеристик тріщино-стійкості металу на напіврозмірних зразках Шарпі за криогенних температур

М. М. Заразовський¹ • К. М. Лук'яненко^{1,2} • В. П. Ясній³ • С. М. Шукась²

Received: 20 June 2024 / Revised: 29 August 2024 / Accepted: 24 September 2024

Анотація. Надійна експлуатація атомних електричних станцій (АЕС) неможлива без забезпечення цілісності корпусу реактора (КР) при всіх режимах роботи, включаючи аварійні. Оцінка ресурсу КР базується на розрахунку на опір крихкому руйнуванню при аваріях з термошоком на стінку КР. Основною матеріалознавчою проблемою при цьому є деградація металу КР внаслідок екстремальних умов роботи, в першу чергу – радіаційним опроміненням від активної зони реактора, яка спричиняє окрихчення металу, тобто зниження його тріщиностійкості. Моніторинг окрихчення металу КР визначаються за допомогою зразків-свідків, які встановлюються в реактор і перебувають в умовах опромінювання і періодично виймаються з реактора для проведення відповідних випробувань. За результатами випробувань і розрахунками напруженості в тріщині, що знаходиться в критичних зонах КР, оцінюється його придатність для подальшої безпечної експлуатації. Як правило для отримання характеристик тріщиностійкості в необхідному для практичних цілей діапазоні температур необхідно проводити експерименти на стандартних повномасштабних, а також крупногабаритних зразках. Однак, через брак матеріалу після опромінення це проблематично. Тому наразі актуальною є потреба в розробці і апробації методик з експериментального визначення тріщиностійкості металу з використанням напіврозмірних і мініатюрних зразків. Метою даної роботи є розробка експериментальної методики випробувань на в'язкість руйнування напіврозмірних зразків Шарпі з тріщиною та оцінка можливості її застосування для визначення характеристик тріщиностійкості металу обладнання і трубопроводів АЕС. У роботі описане експериментальне обладнання і методика проведення експериментів на в'язкість руйнування напіврозмірних зразків Шарпі (55×10×5 мм) з тріщинами при криогенних температурах у діапазоні від –196 °С до –80 °С, а також представлені результати її апробації. Методика і експериментальне обладнання задовільняють вимогам стандартів ASTM E 1921 і ASTM E399. Дослідження проводились на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100 за квазістатичного навантажування. Для охолодження зразків до необхідних температур використовували термокриокамеру та рідкий азот і його пари. Температуру вимірювали за допомогою мідь-константанових термопар. Експериментальні дослідження на статичну тріщиностійкість виконані на зразках зі сталі 10ГН2МФА, вирізаних з секції головного циркуляційного трубопроводу ВВЕР-1000 у вихідному (без напруження) стані. Попереднє вирошування тріщин втомі в зразках проводилося при кімнатній температурі відповідно до стандарту ASTM E647. В роботі отримані нові експериментальні дані статичної тріщиностійкості та референсної температури за підходом Master-Curve металу головного циркуляційного трубопроводу (сталь 10ГН2МФА) у вихідному стані і показано можливість застосування розробленої методики для визначення характеристик тріщиностійкості металу обладнання і трубопроводів АЕС. Встановлено, що нормативна тріщиностійкість за ПНАЕ Г-7-002-86 має надлишковий консерватизм, недооцінюючи запас крихкої міцності порівняно з реальними характеристиками матеріалу. Отримані дані можуть бути використані при обґрунтуванні безпечної експлуатації ГЦТ АЕС з РУ ВВЕР-1000.

Ключові слова: випробування на тріщиностійкість, напіврозмірний зразок Шарпі, криогенна температура, сталь 10ГН2МФА, референсна температура.

Вступ

Надійна і безаварійна робота атомних електростанцій (АЕС) вимагає забезпечення цілісності корпусу реактора (КР) за всіх можливих режимів роботи, в тому числі і аварійних. Для оцінювання ресурсу КР виконується комплекс розрахунків, який включає: розрахунок

✉ К. М. Лук'яненко
lukianenko-km@ipp-centre.com.ua

¹ ТОВ "ІПП-Центр", Київ, Україна

² КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

³ ТНТУ ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

на статичну міцність, циклічну міцність, сейсмостійкість, міцність при гідроударах і опір крихкому руйнуванню (ОКР). Ключовим для оцінювання цілісності КР є розрахунок його крихкої міцності у відповідності до механіки руйнування. Згідно з нормативними документами різних країн [1]–[7] крихка міцність забезпечується тоді, коли діючий коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) в наявній або постульованій тріщині в стінці КР менший за критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} (він же в'язкість руйнування або статична тріщиностійкість) при розрахункових температурах:

$$K_I \leq K_{IC}. \quad (1)$$

Розрахунки виконуються з обов'язковим врахуванням деградації металу КР під дією експлуатаційних факторів, таких як опромінення швидкими нейтронами та температура робочого середовища. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень за певної температури визначається з кривої в'язкості руйнування, яка виражається експоненційною функцією (2):

$$K_{IC}(T) = A_1 + A_2 \cdot e^{\alpha(T-T_k)}, \quad (2)$$

де A_1 – нижня полиця (асимптота) кривої тріщиностійкості, що є фактично її мінімальним значенням в області низьких і криогенних температур; A_2 та α – емпіричні коефіцієнти; T – температура; T_k – критична температура крихкості (КТК) металу КР, яка відповідає за індексацію кривої тріщиностійкості (її положення по температурній осі). З метою забезпечення консервативності оцінки запасу крихкої міцності коефіцієнти функції (2) обираються таким чином, щоб результуюча крива була нижньою огинальною всіх експериментальних даних [8], [9].

Деградація металу КР внаслідок нейтронного опромінення призводить до зменшення в'язкості руйнування, яке проявляється в плоско-паралельному зсуві кривої в'язкості (2) праворуч по температурній осі (див. Рис. 1). Це явище відоме як радіаційне окрихчування (РО) матеріалу. Для моніторингу цього ефекту використовуються зразки-свідки (ЗС), суть яких полягає в тому, що вони розміщуються у реакторі в зоні опромінення і періодично виймаються з реактора для проведення експериментальних досліджень. Внаслідок того, що реактор має обмежений вільний простір для розміщення в ньому зразків-свідків, а для експериментального отримання в'язкості руйнування в області 100–200 МПа·м^{0.5} необхідні повнорозмірні і великі зразки в необхідній кількості [10], то деградацію тріщиностійкості металу КР оцінюють не безпосередньо з експериментів на тріщиностійкість, а опосередковано – з експериментів на ударний згин, за якими визначають зміну КТК. Вважається, що зсув КТК металу КР внаслідок опромінення консервативно описує зміну (зсув

праворуч) кривої в'язкості руйнування. Тому для моніторингу деградації металу КР в проекті ВВЕР-1000 передбачені стандартні зразки-свідки типу Шарпі (розміром 10 мм×10 мм×5 мм) з V-подібним надрізом. Для зручності запас крихкої міцності КР оцінюється не в термінах класично в МПа·м^{0.5}, а в термінах температури через КТК (див. Рис. 1), саме тому вона вважається однією з найважливіших характеристик металу КР та металу обладнання і трубопроводів АЕС. Залежність КІН від температури у постульованій тріщині визначається за допомогою метода скінчених елементів (див. Рис. 1).



Рис. 1. Класична схема оцінки опору крихкому руйнуванню КР

Слід зауважити, що криву K_{IC} – металу після опромінення (див. Рис. 1) індексують за допомогою КТК у країнах, які експлуатують водо-водяні енергетичні реактори (ВВЕР), а в країнах ЄС, США і Японії за такий параметр приймають перехідну температуру “transition temperature” (ПТ). Незважаючи на деякі методичні відмінності у визначенні КТК і ПТ [11] за фізичним змістом вони дуже схожі. По суті, перехідна температура, до якої відноситься і КТК, є температурою, за якої відбувається зміна механізму руйнування від в'язкого (за вищих температур) до крихкого (за нижчих температур).

Більшість АЕС Європи і США і переважна їх більшість в Україні, вичерпали свій проектний ресурс. Їх подальша експлуатація понад проектний термін стала можливою внаслідок виконання комплексу робіт з оцінювання технічного стану і, як результат, продовження строку експлуатації. При цьому, більшість зразків-свідків вже використана і для подальшого обґрунтування безпечної експлуатації КР вже недостатньо опроміненого металу. У зв'язку з чим на сьогодні актуальним є розробка методів дослідження мініатюрних зразків, виготовлених з половинок вже випробуваних ЗС. Тобто, ідея полягає у виготовленні мініатюрних зразків зі зламаних половинок і їх повторного розміщення у реакторі для доопромінення та наступного дослідження. Тому останніми десятиліттями інтенсивно ведуться роботи за цим напрямом.

Одним з найбільш популярних напрямків мініатюризації ЗС є дослідження можливості отримання

тріщиностійкості металу КР за допомогою методології Майстер-Кривої [12]–[14].

Ідея Майстер-Кривої полягає в безпосередньому визначенні тріщиностійкості на невеликій кількості зразків і базується на трьох параметричній моделі Вейбулла [15], яка встановлює зв'язок між тріщиностійкістю та повною ймовірністю руйнування p_f . Величина p_f являє собою ймовірність руйнування при величині інтенсивності напружень меншій або рівній K_{Jc} для будь-яких зразків вибраних з великої партії зразків. Вважається, що достатньо 6 або більше валідних експериментальних даних для коректного визначення масштабного параметру, K_0 за рівнянням (3):

$$p_f = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{K_{Jc} - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}}\right]^b\right\}. \quad (3)$$

Феритні сталі з границею текучості в інтервалі від 275 МПа до 825 МПа мають схожі розподілення ймовірностей руйнування, вплив розмірного фактору а також температури випробувань коли величина $K_{\min} = 20 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ (прийняте значення нижньої асимптоти тріщиностійкості для феритних сталей). Форма кривої розподілу визначається показником Вейбулла, b , величина якого ≈ 4 . Коли $K_{Jc} = K_0$, величина повної ймовірності становить 0,632. Майстер-Крива виражається експоненційною функцією (4) яка має вигляд:

$$K_{Jc} = 20 + \left[\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)\right]^{0.25} \cdot \left(11 + 77 \cdot e^{0.019(T-T_0)}\right); \quad (4)$$

де T_0 – референсна температура, що визначається за допомогою статистичної обробки експериментальних даних тріщиностійкості (це таке значення температури, при якому медіанна ($p = 0.5$) Майстер-Крива відповідає значенню $K_{Jc} = 100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$).

Максимальне валідне (отримане за умови плоскої деформації у вершині тріщини) значення K_{Jc} яке можна отримати на зразках даної товщини визначається за формулою [12]:

$$K_{Jc \text{ limit}} = \sqrt{\frac{Eb_0\sigma_{YS}}{30(1-\nu^2)}}, \quad (5)$$

де $b_0 = W - a_0$.

У стандарті Е 1921 [12] передбачено два методи оцінки міцності матеріалів: мультитемпературна та однотемпературна оцінка.

1. Мультитемпературна оцінка:

– Проводиться при різних температурах для визначення залежності критичної інтенсивності напружень K_{Jc} від температури.

– Дозволяє отримати більш повну картину про міцнісні характеристики матеріалу в різних умовах.

– Вимагає проведення випробувань при різних температурах та аналізу отриманих даних для побудови кривої залежності K_{Jc} від температури.

2. Однотемпературна оцінка:

– Проводиться при одній конкретній температурі.

– Дозволяє отримати значення критичної інтенсивності напружень K_{Jc} для даної температури.

– Вимагає проведення випробувань лише при одній температурі, що спрощує процес оцінки міцності матеріалу в конкретних умовах.

Для отримання референсної температури проводиться мультитемпературна оцінка, а саме значення T_0 визначається з рівняння:

$$\sum_{i=1}^N \delta_i \frac{e^{(0.019(T_i-T_0))}}{11 + 76.7e^{(0.019(T_i-T_0))}} - \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - 20)^4 e^{(0.019(T_i-T_0))}}{\left[11 + 76.7e^{(0.019(T_i-T_0))}\right]^5} = 0; \quad (6)$$

де N – кількість випробуваних зразків; T_i – температура випробування яка відповідає $K_{Jc(i)}$; $K_{Jc(i)} = K_{Jc}$ або $K_{Jc(i)} = K_{Jc \text{ limit}}$ у випадку коли $K_{Jc \text{ limit}} < K_{Jc}$; δ_i – (символ Кронекера і приймає значення 0 або 1) $\delta_i = 1$ – коли $K_{Jc \text{ limit}} > K_{Jc}$, або $\delta_i = 0$ – коли $K_{Jc \text{ limit}} < K_{Jc}$.

Основні переваги підходу на основі Майстер-Кривої по відношенню до класичного підходу полягають в наступному:

– це безпосередньо прямий метод визначення кривої тріщиностійкості з експериментів на статичну тріщиностійкість матеріалу у необхідному стані (після напрацювання) замість використання кореляційних методів;

– цей метод дає можливість охарактеризувати в'язкість руйнування матеріалів у широкому діапазоні температур за допомогою однієї еталонної кривої;

– отримання кривої тріщиностійкості не потребує використання великих зразків і відповідних експериментів на машинах з великими силами для отримання адекватних значення в'язкості руйнування в області $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ і більше. Достатньо може бути лише 6 стандартних або напіврозмірних зразки.

Підхід Майстер-Кривої стандартизований [12], [16] і широко прийнятий в матеріалознавчій спільноті, що сприяє узгодженості і порівнянності результатів різних досліджень і лабораторій.

Але цей метод добре відпрацьований та верифікований лише на стандартних повнорозмірних зразках таких як SENB (Single Edge Notched Bend) розміром $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$ і Compact Tension з типорозмірами (СТ)1Т і (СТ)0.5Т (товщиною один дюйм і відповідно пів дюйма). Також, він впроваджений в деякі стандарти атомної енергетики, наприклад в VERLIFE [17]. Однак результати розрахунків ресурсу КР з використанням Майстер-Кривої за [17] не використовували на практиці для прийняття рішення стосовно ресурсу КР.

Мета даної роботи полягає в розробці методики експериментального визначення тріщиностійкості за допомогою напіврозмірних зразків типу Шарпі з тріщиною ($10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$) та оцінки можливості їх застосування для побудови Майстер-Кривої.

1. Методи і матеріали досліджень

1.1. Експериментальне обладнання

Основною технічною проблемою низькотемпературних випробувань є забезпечення і підтримання заданої температури впродовж усього процесу навантаження зразка. Згідно з вимогами стандарту [12], необхідно було забезпечити постійну температуру з точністю до ± 1 °С.

Для проведення експериментів та підтримання криогенних температур на зразку, було виготовлено криокамеру, призначену для проведення досліджень конструкційних матеріалів в інтервалі температур 77...293 К. Схему криокамери показано на Рис. 2. Кріокамера складається безпосередньо з металевого корпусу (поз. 5) який теплоізолюваний товстим шаром пінопласту (поз. 6), двох металевих опор під зразок (поз. 12), трубки подачі азоту (поз. 1) та станини (поз. 16). Процес відпрацювання методики полягав в поступовому збільшенні термоізолювання криокамери від навколишнього середовища, для отримання оптимальних умов проведення експерименту при низьких температурах. З цієї метою були використані термопрокладки (поз. 9) в зоні контакту між зразком та опорами, а також термопрокладки між гетинаксовою опорою та станиною (поз. 15). Поступове збільшення рівня термоізоляції дозволяло зменшувати теплові втрати та стабілізувати температурний режим всередині камери, забезпечуючи необхідні умови для проведення експериментів. Загальний вигляд термокамери представлено на Рис. 3.

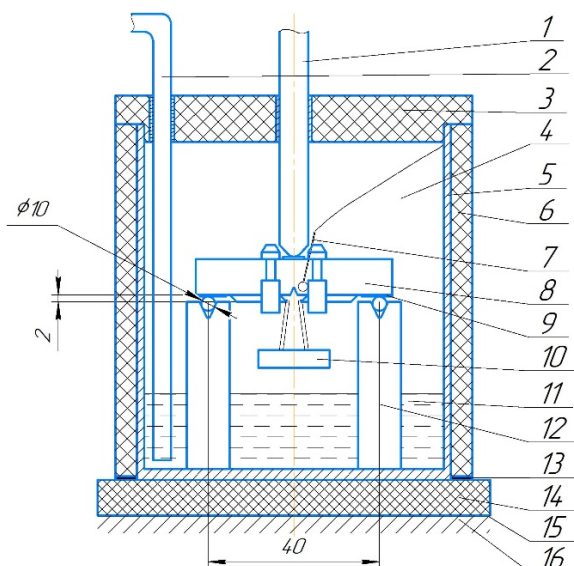


Рис. 2. Схема криокамери: 1 – трубка подачі азоту, 2 – штук, 3 – пінопластова кришка, 4 – пари азоту, 5 – корпус металевий, 6 – пінопласт, 7 – термопара, 8 – зразок, 9 – термопрокладка, 10 – тензометр, 11 – рідкий азот, 12 – опора, 13 – клей, 14 – гетинаксова опора, 15 – термопрокладка, 16 – станина

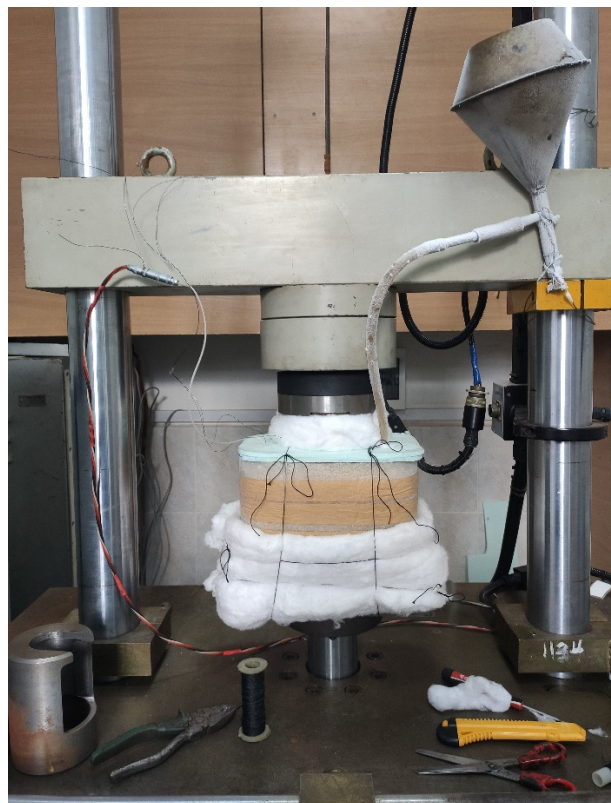


Рис. 3. Випробувальна установка СТМ-100 з криокамерою

Для реєстрації розкриття тріщини на зразку, використовувався низькотемпературний екстензометр, який відкалібрований при кімнатній температурі в середовищі рідкого азоту. Калібрування проводили за допомогою механічного калібровача фірми Instron, величина абсолютної похибки якого складає 0.38 мкм. У зв'язку з тим, що різниця коефіцієнтів калібрування на краях температурного інтервалу становить 6.1 %, то для проміжних температур діапазону 77°...293 °К закон зміни коефіцієнту калібрування тензометра в залежності від температури було прийнято лінійним.

Температуру вимірювали за допомогою мідь-константанових термопар, що мають найбільшу чутливість у цьому діапазоні температур. Сигнал з термопар подавався на мілівольтметр НР 3456А з точністю вимірювання ± 1 мкВ. Термопару калібрували за сімома фіксованими значеннями температури, п'ять із яких знаходилися в середині інтервалу 77°...293 °К та досягалися за допомогою суміші рідкого азоту і концентрованого етилового спирту в різних пропорціях.

Експеримент проводився таким чином, що криокамера через теплоізоляційну прокладку встановлювалась та закріплювалась на нижню основу випробувальної установки. На її дно встановлюються дві металеві опори, які мають V-подібні вирізи для встановлення в них роликів. Після цього встановлюється зразок з попередньо прикріпленим до нього тензометром і вмонтованою термопарою, після чого тензометр під'єднують

до контролера, з'єднаного з комп'ютером, а термопару до мікроемметра. Потім криокамеру заповнюють рідким азотом (рівень заповнення залежить від температури, яку необхідно досягти на зразку) і, після закінчення бурхливого кипіння, закривають пінопластовою кришкою. Протягом 10 хвилин системі дають термостабілізуватися, після чого, послідовно, порціями, через трубку, що теплоізольована від криокамери втулкою (див. Рис. 3), заливають азот доки температура на зразку не досягне потрібного значення. Таким чином зразок перебуває в інертному середовищі парів азоту. Обрана температура дослідження повинна залишатись стабільною протягом 5–10 хв, після чого запускається шток зі швидкістю 0,2–0,7 мм/хв, а на комп'ютері здійснюється запис діаграми “сила – переміщення”.

Експерименти проводились на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100 (див. Рис. 3), яка дає змогу реалізувати статичне навантаження в межах 0...100 кН.

Похибка величини задаючого каналу та похибка контрольованих величин не перевищує 1 % від максимального значення встановленого масштабного діапазону.

1.2. Процес вирощування тріщини

Початкові тріщини вирощували в напіврозмірних зразках Шарпі за трьох-точкового згину з V-подібним надрізом (концентратором) перпендикулярним до осі зразка глибиною 2 мм та шириною 2 мм (Рис. 4). Частота навантаження складала 20 Гц, коефіцієнт асиметрії циклу навантаження $R_p = P_{\min}/P_{\max} = 0,1$ (тут P_{\min}/P_{\max} – найменше і найбільше значення зусилля). В процесі вирощування втомної тріщини визначали швидкість її росту відповідно до стандарту [18]. Спостереження за тріщиною, а також її приріст визначали за допомогою бінокулярного мікроскопу типу МБС – 10, з точністю до 0,0143 мм.

Попереднє вирощування тріщини полягає в отриманні загостреної втомної тріщини відповідного розміру, прямолінійності та правильної симетрії. Розтріскування зразка проводиться в повністю термообробленому стані, в якому він буде випробовуватись. Обладнання для попереднього розтріскування було таким, щоб розподіл зусиль був симетричним відносно обробленого надрізу, а K_{\max} (коефіцієнт інтенсивності напружень) – під час попереднього розтріскування контролювався з точністю до $\pm 5\%$. Для попереднього розтріскування можна використовувати будь-яку частоту навантаження, яка дозволяє досягти необхідної точності зусилля. Оброблений надріз і вирощена тріщина повинні лежати в межах огинаючої, вершиною якої є кінець втомної попередньої тріщини. Крім того, втомна передтріщина не повинна бути меншою за $0,1B$ (B – ширина зразка), h (h – ширина початкового надрізу) або 1,0 мм, залежно від того, яка з цих величин більша.

Кінцеве значення K_{\max} під час попереднього розтріскування не повинно перевищувати початкове значення K_{\max} , для якого повинні бути отримані дані випробувань. За необхідності, для ініціювання розтріскування в обробленому надрізі можуть бути використані зусилля, що відповідають вищим значенням K_{\max} . У цьому випадку діапазон зусиль повинен бути зменшений, щоб задовольнити вищезазначену вимогу. Крім того, пропонується, щоб зменшення P_{\max} для будь-якого з цих кроків не перевищувало 20 % і щоб вимірювання розширення тріщини відбувалося до переходу до наступного кроку. Для запобігання впливу перехідних процесів на дані випробувань, на кожному кроці слід застосовувати діапазон зусиль з кроком збільшення розміру тріщини щонайменше $(3/\pi) (K'_{\max}/\sigma_{02})^2$, де K'_{\max} – це кінцеве значення K_{\max} на попередньому кроці випробування. Якщо P_{\min}/P_{\max} під час попереднього розтріскування відрізняється від значення під час тестування, дотримувались застережних заходів. Якщо діапазон зусиль потрібно змінювати поступово, це слід робити, лише зі збільшенням P_{\max} , щоб запобігти уповільненню швидкості росту, спричиненому ефектом переваження; уповільнення є більш вираженим ефектом, ніж прискорений ріст тріщини, пов'язаний з поступовим збільшенням P_{\max} .

Геометричні характеристики напіврозмірного зразка Шарпі показано на Рис. 4.

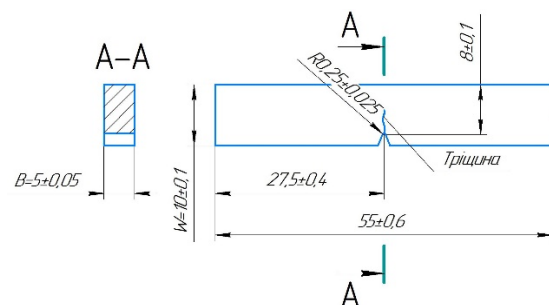


Рис. 4. Геометричні характеристики напіврозмірного зразка Шарпі

Відомо, що перехідні швидкості росту також є результатом зміни P_{\min} . Після зміни навантаження слід забезпечити достатнє розширення тріщини, щоб швидкість росту досягла стаціонарного значення. Необхідна величина росту тріщини залежить від величини зміни сили і від матеріалу. Поступове збільшення на 10 % або менше, мінімізує ці перехідні швидкості росту.

Вимірювання розміру тріщини проводили одночасно на обох поверхнях зразка з точністю до 0,10 мм або $0,002W$, залежно від того, яка з них більша. Якщо розміри тріщини, виміряні на передній і задній поверхнях, відрізняються більш ніж на $0,25B$, операція попереднього розтріскування не підходить, і подальші випробування будуть недійсними за цим методом.

2. Результати досліджень

2.1. Досліджуваний матеріал

В якості досліджуваного матеріалу вибрали сталь з секції головного циркуляційного трубопроводу першого контуру ВВЕР-1000 типу 10ГН2МФА, яка близька до реакторної сталі за своїми механічними характеристиками.

Нормативні значення механічних характеристик сталі 10ГН2МФА в залежності від температури згідно з ТУ 108.766-86 приведені в табл. 1, де R_m^T [МПа] – мінімальне значення границі міцності, $R_{p0.2}^T$ [МПа] – мінімальне значення границі текучості, A^T [%] – відносне видовження при статичному руйнуванні в умовах розтягу, Z^T [%] – відносне звуження поперечного перерізу зразка при статичному руйнуванні в умовах розтягу. В табл. 2 наведено вимоги до хімічного складу згідно з ТУ 108.766-86 та фактичний хімічний склад досліджуваного металу.

Визначення елементного складу здійснювалося за допомогою оптико-емісійного спектрометра Metavision 1008i. Цей прилад забезпечує високу точність на рівні мікрограм на грам.

2.2. Обробка результатів експериментів

На основі даних, отриманих з випробувальної машини та збережених на ПК, будували графік залежності переміщення від сили, який представлено на Рис. 5. Цей графік розбивається щонайменше на дві частини: лінійну та криволінійну. Кожна з цих частин апроксимується окремо, після чого здійснюється їх “склеювання” для створення остаточної кусково-гладкої діаграми залежності переміщення від сили.

Таблиця 1. Механічні характеристики матеріалу 10ГН2МФА

T, °C	R_m^T , МПа	$R_{p0.2}^T$, МПа	A^T , %	Z^T , %
	Дорівнює або більше			
20	539	343	16	55
350	490	294	14	50

При апроксимації діаграми деформування важливим аспектом є фізичність вибору функцій, які використовуються для представлення різних частин графіка. Це означає, що обрані функції повинні адекватно відображати фізичні процеси, що відбуваються в матеріалі під час його навантаження та руйнування.

Наприклад, лінійна частина графіка апроксимується рівнянням $y = a + b \cdot x$, а криволінійна частина – рівнянням $y = a \cdot x + b \cdot x^2 + (c \cdot x) / (d + e \cdot x + f \cdot x^2)$.

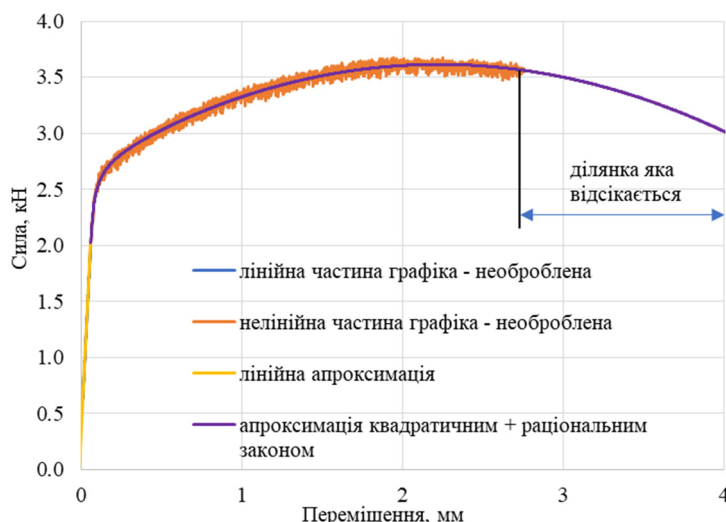


Рис. 5. Графік залежності переміщення від сили, отриманий за необробленими даними, з апроксимаційними лініями

Таблиця 2. Хімічний склад матеріалу 10ГН2МФА

C	Si	Mn	Ni	Mo	V	Cr	Ti	S	P	Cu	Al	Co	W
згідно з ТУ 108.766-86													
Діапазон						Менше або дорівнює					–		
0.08–0.12	0.17–0.37	0.80–1.10	1.8–2.3	0.4–0.7	0.03–0.07	0.30	0.015	0.020	0.020	0.30	–	–	–
Результати вимірювання хімічного складу													
0.14	0.23	0.80	2.045	0.515	0.011	0.255	0.002	0.004	0.005	0.022	0.018	0.0085	0.007

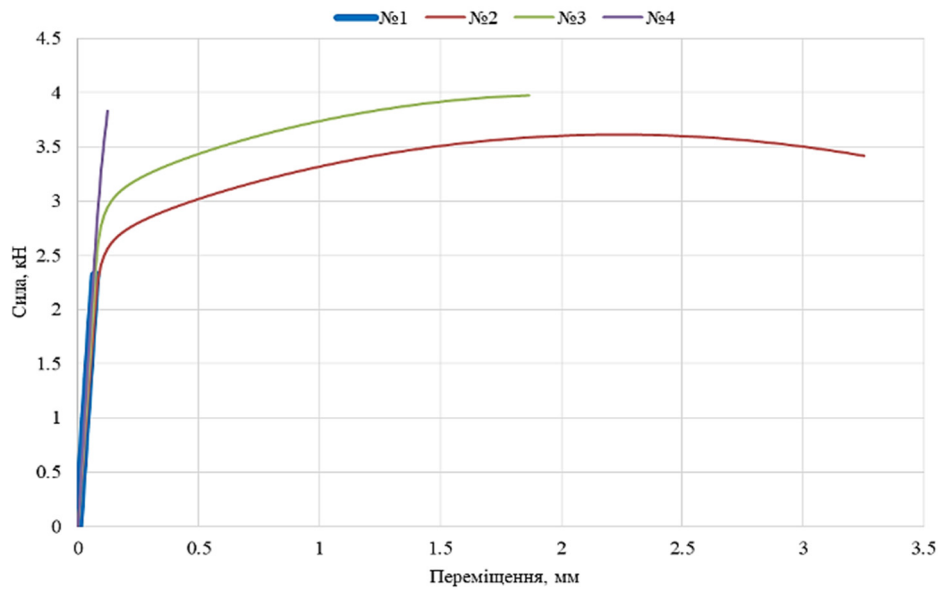


Рис. 6. Діаграми руйнування. №1 – випробування при температурі $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$, №2 – при температурі $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$, №3: $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, №4: $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$

Після побудови остаточної діаграми було проведено аналітичне інтегрування для визначення пластичної області для розрахунків (див. Рис. 7). Після визначення пластичної області було проведено розрахунок, як описано в [12], та визначено значення референсної температури T_0 .

На **Ошибки!** **Источник ссылки не найден.** приведені діаграми руйнування отримані в результаті проведених експериментів.

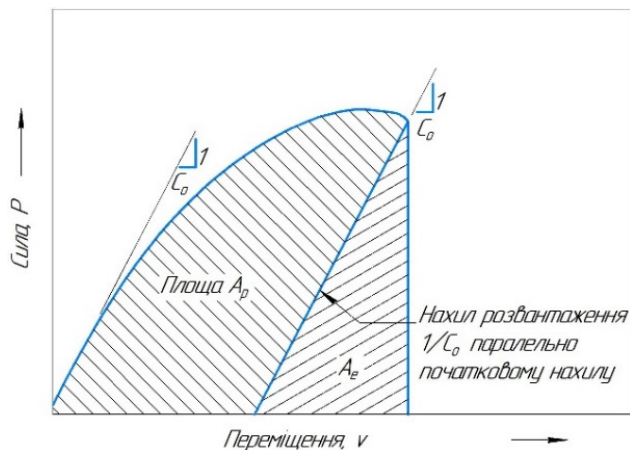


Рис. 7. Схема визначення пластичної області для розрахунку J_p

Наступним кроком йде визначення початкового розміру втомної тріщини a_0 . Процедура відбувається наступним чином (див. Рис. 8): виміряти довжину тріщини в дев'яти рівновіддалених точках, центральної лінії зразка і віддалених на $0,01B$ від вільних поверхонь

плоских зразків або біля бокового паза на зразках з боковими канавками. Початковий розмір тріщини обчислюється як середнє значення восьми вимірювань, середнє двох при поверхневих та решти семи вимірів. На кінцевому етапі визначається середнє значення лівої та правої половинки зразка. Вимірювальні прилади повинні мати точність $0,025\text{ мм}$. Для наочності на Рис. 8 показано зони в яких вимірювалися значення початкового розміру тріщини.

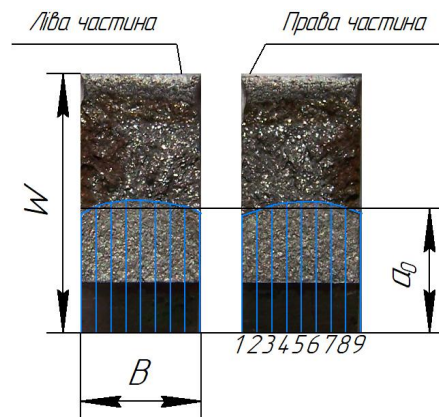


Рис. 8. Зони половинок зламаного зразка в яких проводилося вимірювання початкового розміру тріщини a_0

2.3. Результати та обговорення

Чотири зразки Шарпі з надрізом в яких попередньо вищувалась втомна тріщина були випробувані на трьох точковий згин в діапазоні температур від $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3. Вхідні дані та результати випробувань на в'язкість руйнування

№ Зразка	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{кН}$	$A_p, \text{Дж}$	$K_{JC}, \text{МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$	$K_{JC}(1T), \text{МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$	$R_{p0.2}, \text{МПа}$	$K_{JC}(1T)\text{limit}, \text{МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$	$a_0, \text{мм}$	δ_i
1	-190	2.32	0.002	59.76	46.49	1074.59	140.45	5.01	1
2	-120	3.42	9.37	398.74	272.27	714.64	117.27	5.02	0
3	-130	3.98	6.36	334.82	229.70	740.11	119.98	4.97	0
4	-165	3.83	0.05	99.33	72.84	983.91	130.72	4.90	1

Результати випробувань наведені в табл. 3. Для побудови графіка референсної температури було використано достовірний набір даних відповідно до стандарту [12]. Результати мультитемпературної оцінки T_0 представлені в табл. 4 та на Рис. 9 (включено 5 % та 95 % межі допуску разом з медіанною $K_{JC}(T)$). В результаті обробки експериментальних даних було отримано недостатню кількість даних відповідно до норм [12], оскільки сума вагових коефіцієнтів $\sum r_i \cdot n_i$ дорівнює $0.27 \leq 1$. Сума вагових коефіцієнтів розраховується наступним чином:

$$\sum r_i \cdot n_i = r_1 n_1 + r_2 \cdot n_2 + r_3 \cdot n_3,$$

де $r_1 = 1/6, r_2 = 1/7, r_3 = 1/8$, а n_1 – кількість валідних зразків, температура випробування яких потрапила в діапазон $50^\circ\text{C} - T_0 - 14^\circ\text{C}$, n_2 – кількість зразків в діапазоні $-15^\circ\text{C} - T_0 - 35^\circ\text{C}$, n_3 – кількість зразків в діапазоні $-36^\circ\text{C} - T_0 - 50^\circ\text{C}$.

В таблиці 3 границя текучості консервативно обиралась з [5], та відповідно до стандарту [12] розраховувалась для кожної температури, при якій відбувся експеримент.

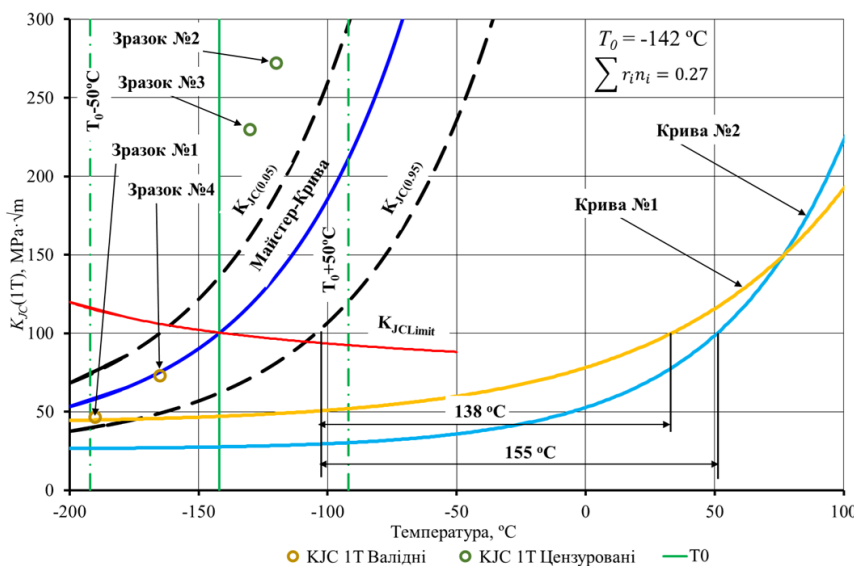


Рис. 9. Оцінка Майстер-Кривої для сталі 10ГН2МФА. Крива №1 – побудована за результатами випробувань [9], Крива №2 – побудована відповідно до норм [5]

Таблиця 4. Узагальнення результатів визначення референсної температури T_0 відповідно до стандарту ASTM E1921-17a [12]

Величина	Значення
Референсна температура, T_0 ($^\circ\text{C}$)	-142
Загальна кількість зразків	4
Кількість зразків в діапазоні $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$	4
Кількість нецензурованих даних	2
Коефіцієнт Пуассона	0,3
$\sum r_i \cdot n_i$	0,27
Кількість зразків в діапазоні $50^\circ\text{C} - T_0 - 14^\circ\text{C}$	0
Кількість зразків в діапазоні $-15^\circ\text{C} - T_0 - 35^\circ\text{C}$	1
Кількість зразків в діапазоні $-36^\circ\text{C} - T_0 - 50^\circ\text{C}$	1

З отриманих даних видно (див. табл. 3–табл. 4 та Рис. 9), що результати випробувань зразків №1 та №4 задовольняють умови та вимоги стандарту [12] (формула 5), оскільки значення $K_{JC}(1T)$ у цих випадках були меншими, ніж лімітуючі значення $K_{JC}(1T)\text{limit}$. В той

же час результати для зразків №2 та №3 не задовольняли даних умові. Отриманий ваговий коефіцієнт є меншим за одиницю, що свідчить про те, що кількість проведених експериментів не є достатньою для надійного визначення значення референсної температури “ T_0 ”. Тому для адекватного визначення T_0 необхідно випробувати більше матеріалу.

Однак слід зазначити, що метою даної роботи є виготовлення експериментального обладнання та розробка і вдосконалення методики проведення експерименту відповідно до вимог стандарту [12], з урахуванням допустимого відхилення температури на зразку

під час навантаження в межах не більше $\pm 1^\circ \text{C}$.

Хоча отримана оцінка T_0 для сталі 10ГН2МФА є приблизною, вона дає змогу зробити висновки про тріщиностійкість цієї сталі. На Рис. 9 крива №1 відповідає функції допустимих КІН від температури $42.3 + 44.46e^{0.0143(T-T_{k0})}$, яка побудована відповідно до сертифікаційних даних [9], а крива №2 відповідає функції $26 + 36e^{0.02(T-T_{k0})}$, яка побудована відповідно до Норм [5], при цьому КТК в початковому стані відповідно до [5] складає $T_{k0} = 15^\circ \text{C}$. Видно, що криві [5] і [9] близькі між собою, особливо в порівнянні з нижнім 5% - ним довірчим інтервалом Майстер-Кривої $25.2 + 36.6e^{0.019(T-T_0)}$. З Рис. 9 видно, що проектна крива [5] і сертифікаційна крива [9] є занадто консервативними, оскільки зсув КТК по відношенню до Майстер-Кривої складає 138°C для кривої №1 та 155°C для кривої №2. Це свідчить про значні запаси ресурсу крихкої міцності конкретного металу ГЦТ, які розраховуються по відношенню до кривих [5] і [9]. Таким чином, впровадження концепції Майстер-Кривої дозволить більш адекватно оцінювати крихку міцність обладнання і трубопроводів АЕС, а отже обґрунтовано збільшити їх ресурс.

Висновки

1. Розроблено і апробовано експериментальну методику для визначення тріщиностійкості металу при криогенних температурах з використанням напіврозмірних ($10 \times 5 \times 55$) зразків Шарпі з тріщиною. Дана методика задовільняє ГОСТ 25.506–85 та міжнародним стандартам, таким як ASTM E 1921 та ASTM E399.

References

- [1] Safety Standards of the Nuclear Safety Standards Commission, 1996, "KTA 3201.2. Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors, Part 2: Design and Analysis," Salzgitter, Geschaefsstelle.
- [2] ASME, 2002, "Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plants, Division 1," New York.
- [3] ASSOCIATION FRANCAISE POUR LES REGLES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION DES MATERIELS DES CHAUDIERES ELECTRONUCLEAIRES, 1988, "Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, RCC-M," Paris.
- [4] JAPANESE SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2001, "JSME Codes for Nuclear Power Generation Facilities, S NC1-2001, Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plant", Tokyo.
- [5] PNAE G-7-002-86. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Moscow: Energoatomizdat, 1989.
- [6] RD EO 0606-2005. Metodika rascheta na soprotivlenie khrupkomu razrusheniyu korpusov reaktorov AES s VVER (MRKR-SKhR-2004), SPb. Moscow, 2004.
- [7] MT-D.0.03.391-09. Metodika otsenki prochnosti i resursa korpusov reaktorov VVER v protsesse ekspluatatsii. Kiev: Mintonergo Ukrainy, 2009.
- [8] A. Ya. Krasovsky, Yu A. Kashtayalan and V. N., Krasiko, "Fracture toughness temperature dependences of RPV steel at static and dynamic loadings taking into account scale factor," Preprint. Institute for problem of Strength National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 1982,

2. Показано принципову можливість застосування розробленої методики для визначення характеристик тріщиностійкості металу обладнання і трубопроводів АЕС.

3. Отримані нові експериментальні дані статичної тріщиностійкості та референсної температури за підходом Master-Curve металу головного циркуляційного трубопроводу (сталь 10ГН2МФА) у вихідному стані.

4. Встановлено, що нормативна крива тріщиностійкості за ПНАЕ Г-7-002-86, має надлишковий консерватизм в порівнянні з Майстер-Кривою (на рівні $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$ він складає близько 150°C). Це свідчить про наявність значних запасів ресурсу крихкої міцності металу ГЦТ. Отримані дані можуть бути використані при обґрунтуванні безпечної експлуатації ГЦТ АЕС з ВВЕР-1000.

5. Використання мініатюрних зразків для визначення тріщиностійкості дасть змогу більш точно оцінити залишковий ресурс тепломеханічного обладнання і трубопроводів АЕС з обґрунтованим зменшенням консерватизму проектних розрахунків, закладеного ще в 80-х роках минулого століття, що в свою чергу підвищить строк безпечної експлуатації АЕС України та економічну ефективність експлуатації за рахунок продовження терміну служби обладнання.

Подяка. Представлена робота виконана в рамках проекту STRUMAT-LTO (Structural Materials Research of Parameters Influencing the Material Properties of RPV Steels for Safe Long-Term Operation of LWR NPPs), який був схвалений NUGENIA. Проект STRUMAT-LTO отримав фінансування в рамках програми досліджень і навчання Євратому 2019–2020 за грантовою угодою № 945272.

- [9] Otchet po ispytaniyam stali marki 10GN2MFA, ee svarynykh soedineniia i antikorrozionnykh naplavok po opytu izgo-tovleniia i ekspluatatsii korpusnogo oborudovaniia ustanovki V-1000. "Gidropress", Moskva, 2000.
- [10] I. Orynyak, M. Zarazovskii, S. Radchenko and V. Kozlov, "To Determination of the WWER RPV Steels Crack Resistance Characteristics," *ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2014, doi: 10.1115/PVP2013-97742
- [11] International Atomic Energy Agency. 2009. Integrity of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants: Assessment of Irradiation Embrittlement Effects in Reactor Pressure Vessel Steels. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.11. Vienna: IAEA.
- [12] ASTM E1921-17a, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range," West Conshohocken, PA, 2017.
- [13] K. Wallin, "Fracture toughness transition curve shape for ferritic structural steels," in *Proc. Joint FEEG/ICF International Conference on Fracture of Engineering Materials and Structures*, S.H. Teoh and K.H. Lee Eds, Elsevier, London, pp. 83–88, 1991a, doi: 10.1007/978-94-011-3650-1_10
- [14] K. Wallin, T. Planman, M. Valo and R. Rintamaa, "Applicability of Miniature Size Bend Specimens to Determine the Master Curve Reference Temperature T₀," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 68, pp. 1265–1296, 2001, doi: 10.1016/S0013-7944(01)00020-0
- [15] K. Wallin, Master Curve Analysis of Ductile to Brittle Transition Region Fracture Toughness Round Robin Data (The Euro Fracture Toughness Curve). VTT Technical Research Centre of Finland, 1989.
- [16] International Atomic Energy Agency, "Master curve approach to monitor fracture toughness of reactor pressure vessels in nuclear power plants," *IAEA-TECDOC-1631*, Vienna, 2009.
- [17] Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs, "VERLIFE" Version 2008.
- [18] ASTM E647-22, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," West Conshohocken, 2022.
- [19] ASTM E399-22, "Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" West Conshohocken, 2022.

Determination of metal crack resistance on half-size Charpy specimens at cryogenic temperatures

M. M. Zarazovskii¹ • S. M. Shukayev² • K. M. Lukianenko^{1,2} • V. P. Iasnii³

¹ IPP-Centre LLC, Kyiv, Ukraine

² Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

³ Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Abstract. Reliable operation of nuclear power plants (NPPs) is impossible without ensuring the integrity of the reactor pressure vessel (RPV) under all operating conditions, including emergencies. The RPV service life assessment is based on the calculation of resistance to brittle fracture in accidents with thermal shock to the RPV wall. The main material science problem here is the degradation of the RPV metal due to extreme operating conditions, primarily radiation exposure from the reactor core, which causes metal embrittlement, i.e., a decrease in its crack resistance. The monitoring of RPV metal embrittlement is determined using test specimens that are installed in the reactor and exposed to irradiation and periodically removed from the reactor for relevant tests. Based on the test results and calculations of the stress in the crack located in the critical zones of the RPV, its suitability for further safe operation is assessed. As a rule, to obtain crack resistance characteristics in the temperature range required for practical purposes, it is necessary to conduct experiments on standard full-scale and large-sized specimens. However, due to the lack of material after irradiation, this is problematic. Therefore, there is currently a need to develop and validate methods for the experimental determination of metal crack resistance using semi-sized and miniature samples. The goal of this work is to develop an experimental methodology for testing the fracture toughness of half-size Charpy specimens with a crack and to evaluate the possibility of its application for determining the characteristics of the crack resistance of metal in NPP equipment and pipelines. This work describes the experimental equipment and procedure for conducting experiments on the fracture toughness of half-size Charpy specimens (55×10×5 mm) with cracks at cryogenic temperatures in the range from –196° C to –80° C, and presents the results of its testing. The methodology and experimental equipment meet the requirements of ASTM E 1921 and ASTM E399. The research was conducted on a servo-hydraulic testing machine STM-100 under quasi-static loading. A thermocryo chamber and liquid nitrogen and its vapor were used to cooling the specimens to the required temperatures. The temperature was measured using copper-constantane thermocouples. Experimental studies of static crack resistance were conducted on specimens made of 10GN2MFA steel cut from a section of the main circulation pipeline of WWER-1000 in the initial (no operating time) state. Preliminary fatigue crack growth in the specimens was performed at room temperature in accordance with ASTM E647. The study provides new experimental data on static crack resistance and reference temperature using the Master-Curve approach for the metal of the main circulation pipeline (10GN2MFA steel) in the initial state and shows the possibility of applying the developed methodology to determine the crack resistance characteristics of metal in NPP equipment and pipelines. It is established that the normative crack resistance according to PNAE G-7-002-86 is excessively conservative, underestimating the margin of brittle strength compared to the actual characteristics of the material. The obtained data can be used to substantiate the safe operation of NPPs with WWER-1000 RPVs.

Keywords: crack resistance, specimen, thermocouple, thermal chamber, extensometer.