

РАДІАЦІЙНА ФІЗИКА
RADIATION PHYSICS

УДК 621.039.53

<https://doi.org/10.15407/jnpae2024.01.058>

В. М. Ревка*, Л. І. Чирко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: vrevka@hotmail.com

ПОРІВНЯННЯ МАЙСТЕР КРИВОЇ З НОРМАТИВНИМ МЕТОДОМ ОЦІНКИ
В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

У роботі розглянуто узагальнену температурну залежність коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} для металу корпусу реактора ВВЕР-1000, що отримана за результатами випробувань зразків-свідків на в'язкість руйнування. Досліджено узгодженість форми Майстер кривої та її 95 % верхньої та нижньої довірчих границь з експериментальною залежністю параметрів тріщиностійкості від температури. З точки зору рівня консерватизму та прийнятності проведено порівняння нормативних кривих тріщиностійкості за ПНАЕ Г-7-002-86 та СОУ НАЕК 177:2019 з 5 % довірчою границею Майстер кривої. Розглянуто можливість щодо використання температури RT_0 як температурного індексу замість T_K для нормативної кривої тріщиностійкості СОУ НАЕК 177:2019.

Ключові слова: корпус реактора ВВЕР-1000, сталь 15X2НМФА-А, зразки-свідки, радіаційне окрихчування, критична температура крихкості, в'язкість руйнування, Майстер крива.

1. Вступ

Достовірне визначення в'язкості руйнування конструкційних матеріалів корпусу реактора (КР) під час експлуатації вважається однією з ключових проблем для реакторів типу ВВЕР-1000. Дотепер в'язкість руйнування корпусних матеріалів оцінюється за допомогою кореляційного методу, що ґрунтується на результатах випробувань зразків Шарпі на ударний вигин. Як виявилось [1], непряме визначення в'язкості руйнування в деяких випадках суттєво занижує параметри тріщиностійкості, що може призвести до невинуватих обмежень в експлуатаційних режимах та радіаційному ресурсі КР. Пряме визначення параметрів тріщиностійкості ґрунтується на статистичній методології Майстер кривої, відповідно до якої оцінюють референсну температуру T_0 . Величина T_0 є більш точною мірою в'язкості руйнування порівняно з критичною температурою крихкості T_K , і тому її використання може знизити надлишковий консерватизм у розрахунках на крихку міцність, що притаманний існуючим нормативним підходам в атомній енергетиці України.

На сьогодні методологія Майстер кривої успішно використовується у нормативній практиці розвинутих країн. Так, наприклад, у 1997 р. у США було розроблено міжнародний стандарт ASTM E1921 [2], що регламентує визначення референсної температури T_0 феритних сталей, використовуючи положення методу Майстер кривої. Також у 1998 р. ASME (американське товариство інженерів-механіків) опублікувало нормативний документ Code Case No. 629 [3], що допускає використання температурного індексу

RT_{T_0} для матеріалів КР у вихідному стані як альтернативу RT_{NDT} (функціональний еквівалент критичної температури крихкості T_{K0}). Однак у цьому випадку форма нормативної залежності параметрів в'язкості руйнування від температури залишається без змін. Згідно з нормами Code Case No. 629 температура RT_{T_0} визначається як $RT_{T_0} = T_0 + 19,4$ °C. Подібно до RT_{NDT} температура RT_{T_0} застосовується для індексації нормативної температурної залежності критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} у розрахунках на крихку міцність. Використовуючи цей нормативний підхід, було продовжено термін експлуатації ряду енергоблоків АЕС західного типу, наприклад, Point Beach Unit 2 (США) [4] та Kori Unit 1 (Південна Корея) [5].

Більш широке використання методології Майстер кривої для оцінки в'язкості руйнування матеріалів КР закладено в нормах ASME Code Case No. 830 [6]. Згідно з цим документом, крім температури RT_{T_0} передбачено використання 5 % довірчої границі Майстер кривої як альтернативи для нормативної кривої K_{IC} в розрахунках на крихку міцність.

Розширюючи сферу застосування нового експериментального підходу, в рамках міжнародного проекту зусиллями провідних фахівців з радіаційного матеріалознавства та механіки руйнування із країн, що експлуатують реактори ВВЕР (наприклад, Nuclear Research Institute Rez, Czech Republic; Forschungszentrum Rossendorf, Germany; VTT Industrial Systems, Finland), було підготовлено нормативне керівництво VERLIFE [7], що стосується оцінки цілісності КР ВВЕР з використанням методології Майстер кривої.

© В. М. Ревка, Л. І. Чирко, 2024

Одним з важливих питань застосування методології Майстер кривої у нормативній практиці є форма температурної залежності коефіцієнта інтенсивності напружень K_{JC} та вплив на цю залежність нейтронного опромінення. У цій статті проведено аналіз узгодженості форми Майстер кривої та її 95 % верхньої і нижньої довірчих границь (95 % нижню границю часто позначають як 5 % толерантну границю) з експериментальними температурними залежностями K_{JC} , що отримані за результатами випробувань на в'язкість руйнування зразків-свідків (ЗС). Також проведено порівняння нормативних кривих тріщиностійкості ПНАЕ Г-7-002-86 та СОУ НАЕК 177:2019 з 5 % довірчою границею Майстер кривої з точки зору рівня консерватизму та

прийнятності. Крім того, розглянуто можливість використання температури RT_0 замість T_{K0} як температурного індексу для нормативної кривої тріщиностійкості СОУ НАЕК 177:2019.

2. Форма температурної залежності K_{JC} (штатні ЗС)

Узагальнені температурні залежності K_{JC} , отримані за результатами випробувань штатних ЗС (тобто зразків, які призначені для оцінки змін механічних властивостей металу КР під час експлуатації в рамках програми ЗС), показано на рис. 1 (неопромінені зразки), рис. 2 (опромінені зразки) та рис. 3 (термічно зістарені зразки). Експериментальні значення K_{JC} для кожної групи зразків скореговано на товщину 25,4 мм.

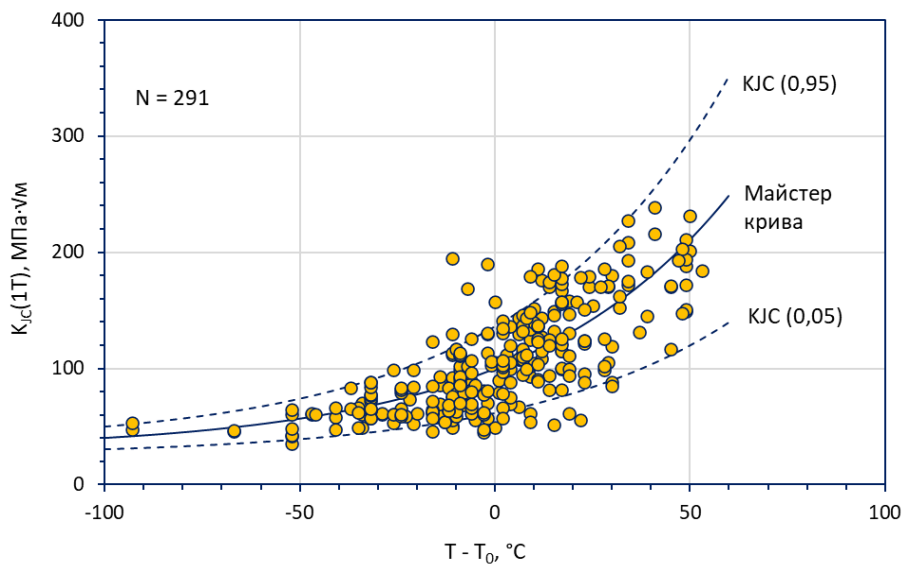


Рис. 1. Узагальнена температурна залежність K_{JC} для неопромінених ЗС. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

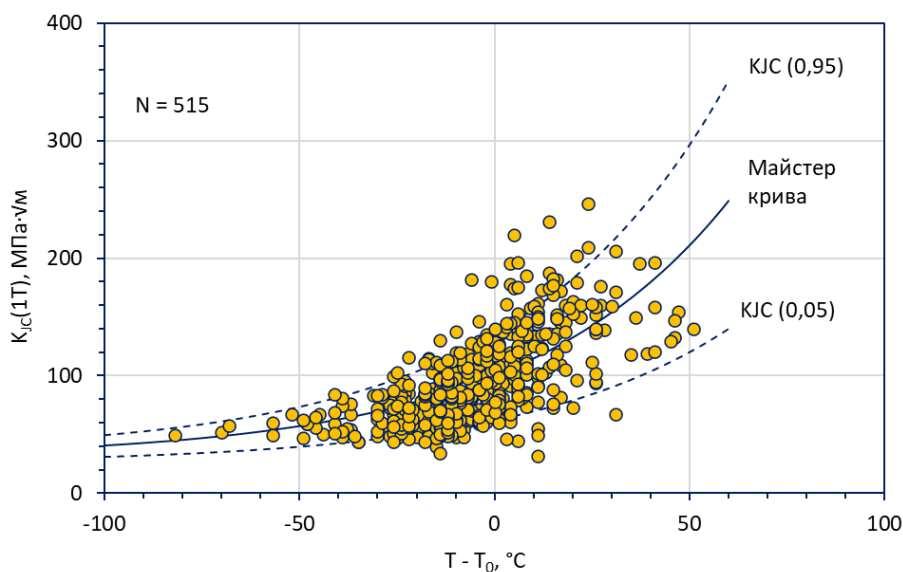


Рис. 2. Узагальнена температурна залежність K_{JC} для опромінених ЗС. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

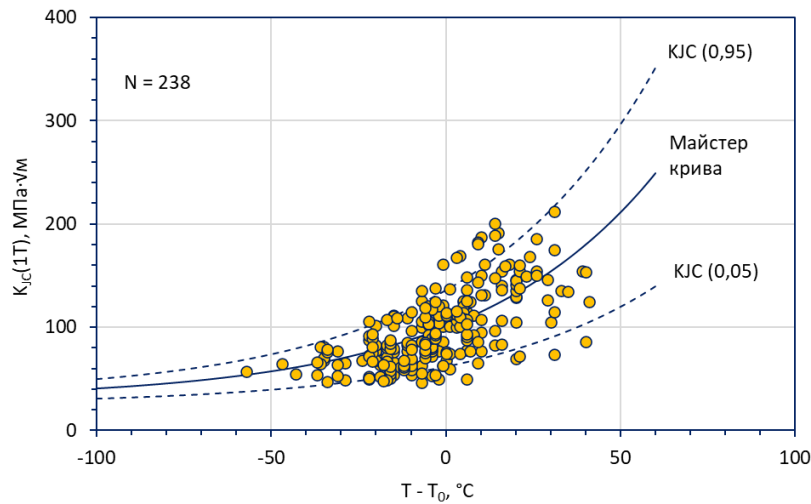


Рис. 3. Узагальнена температурна залежність K_{IC} для термічно зістарених ЗС.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

На цих рисунках поряд з експериментальними даними нанесено Майстер криву та 95 % і 5 % толерантні границі, які визначені за допомогою таких формул [2]:

$$K_{IC} = 30 + 70 \cdot \exp(0.019 \cdot (T - T_0)), \quad (1)$$

$$K_{IC(0,95)} = 34,5 + 101,3 \cdot \exp(0,019 \cdot (T - T_0)), \quad (2)$$

$$K_{IC(0,05)} = 25,2 + 36,6 \cdot \exp(0,019 \cdot (T - T_0)), \quad (3)$$

де T_0 – температура, за якої значення медіани температурної залежності K_{IC} для зразків товщиною 25,4 мм дорівнює $100 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

У переважній більшості випадків для визначення температури T_0 було випробувано шість і більше зразків в діапазоні температур $(T_0 - 50) < T < (T_0 + 50)$.

Аналіз даних показав, що експериментальні залежності добре узгоджуються з формою Майстер кривої. Крім того, можна сказати, що 95 % і

5 % толерантні границі адекватно характеризують статистичний розкид значень K_{IC} для штатних зразків як до, так і після опромінення та термічного старіння.

3. Форма температурної залежності K_{IC} (реконструйовані зразки)

Узагальнені температурні залежності K_{IC} для реконструйованих ЗС (тобто, зразків, які були виготовлені із половинок випробуваних штатних зразків із застосуванням технології реконструювання [8]) наведено на рис. 4 (неопромінені зразки), рис. 5 (опромінені зразки) та рис. 6 (термічно зістарені зразки). На цих рисунках поряд з експериментальними даними нанесено Майстер криву та 95 % і 5 % толерантні границі. Експериментальні значення K_{IC} для кожної групи зразків скореговано на товщину 25,4 мм. У переважній більшості випадків для визначення температури T_0 було випробувано дев'ять і більше зразків в діапазоні температур $(T_0 - 50) < T < (T_0 + 35)$.

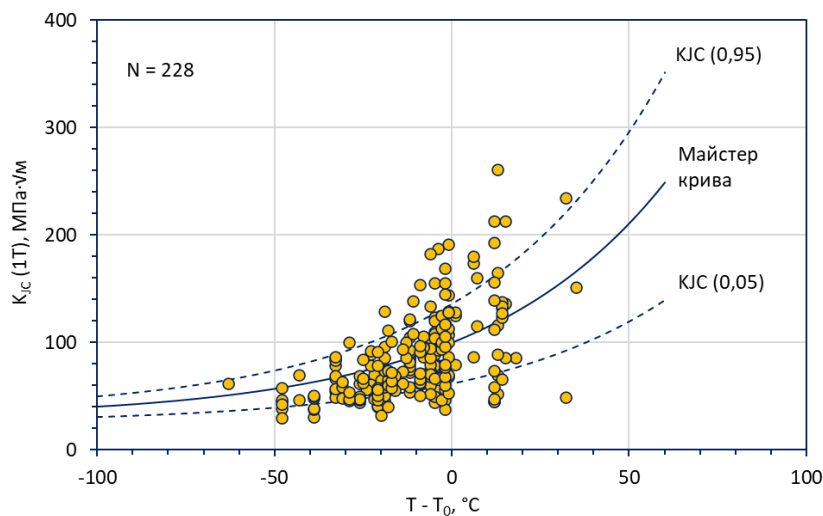


Рис. 4. Узагальнена температурна залежність K_{IC} для реконструйованих неопромічених ЗС.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

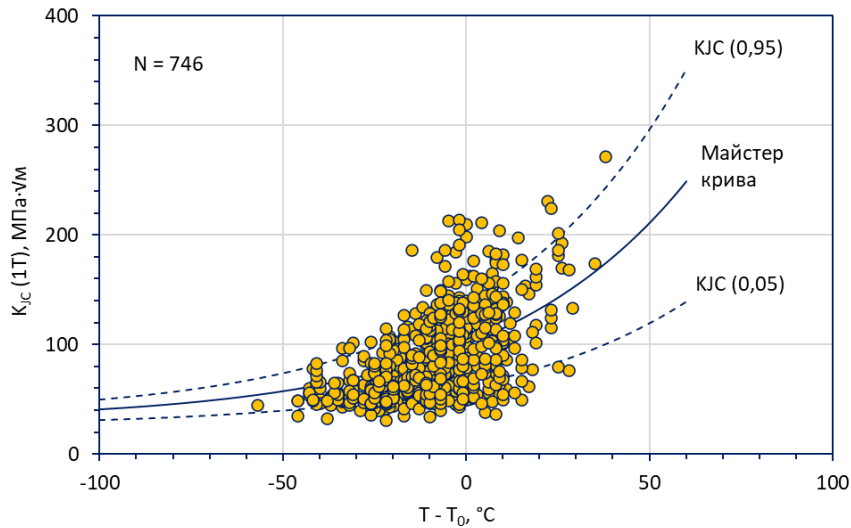


Рис. 5. Узагальнена температурна залежність K_{IC} для реконструйованих опромінених ЗС. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

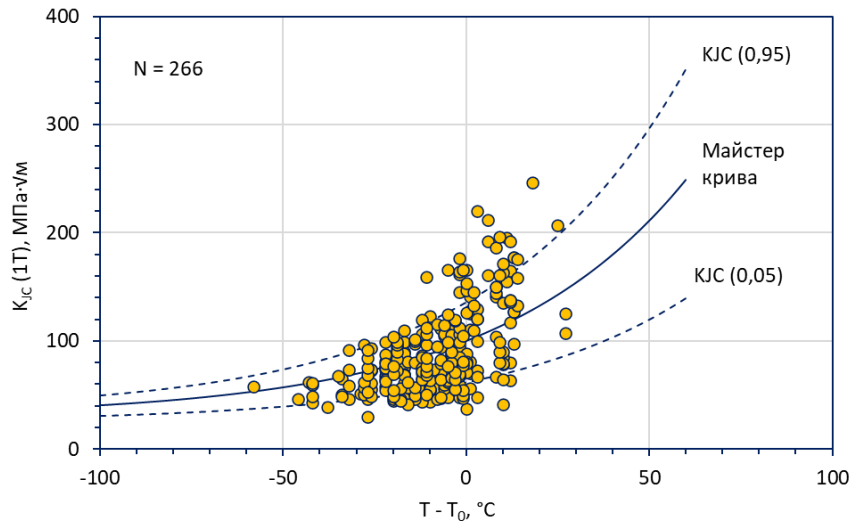


Рис. 6. Узагальнена температурна залежність K_{IC} для реконструйованих термічно зістарених ЗС. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Для реконструйованих зразків також спостерігається узгодженість температурної залежності K_{IC} з формою Майстер кривої щонайменше у нижній частині перехідної області. Щодо розкиду експериментальних даних, то можна відзначити, що значень K_{IC} , які лежать за межами 95 % і 5 % толерантних границь, помітно більше порівняно зі штатними зразками.

4. Порівняння Майстер кривої з нормативними кривими в'язкості руйнування

Для порівняння Майстер кривої з нормативними кривими тріщиностійкості ПНАЕ Г-7-002-86 [9] та СОУ НАЕК 177:2019 [10] з точки зору їхньої форми використано 5 % толерантну границю Майстер кривої, яка описується рівнянням (3).

Для оцінки опору крихкому руйнуванню розрахункові коефіцієнти інтенсивності напружень K_I порівнюють з характеристиками в'язкості руйнування матеріалів КР. Значення K_I визначають діючі напруження, які можуть виникати в умовах аварійного розхолодження активної зони реактора (т. з. термічного шоку) за наявності в стінці КР тріщини розрахункового розміру. В'язкість руйнування матеріалу КР характеризується залежністю критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} від нормованої температури $(T - T_K)$, де T_K є критичною температурою крихкості, яка фактично позиціонує криву тріщиностійкості на температурній осі. Ця залежність визначається за допомогою випробувань зразків механіки руйнування.

Згідно з нормативними підходами вважається, що крихка міцність КР забезпечена, якщо виконується критерій $K_I < K_{IC}$ для всіх розрахун-

кових режимів. Іншими словами, матеріал з такими параметрами в'язкості руйнування повинен витримувати діючі напруження в умовах аварійної ситуації, щоб запобігти крихкому (миттєвому) руйнуванню КР.

У розрахунках на крихку міцність важливими є форма температурної залежності K_{IC} та її положення на температурній осі. Відповідно до положень норм і стандартів [9, 10] форма кривої в'язкості руйнування визначається тільки для матеріалу у вихідному стані, і ця форма використовується для оцінки опору крихкому руйнуванню при експлуатації КР. Вплив експлуатаційних факторів, таких, наприклад, як опромінення, враховують шляхом введення зсуву критичної температури крихкості T_K , який визначається за результатами випробувань зразків Шарпі на ударний вигин.

Для визначення температурних залежностей K_{IC} , які використовуються у нормах ПНАЕ Г-7-002-86, спочатку були проведені механічні випробування традиційних зразків механіки руйнування різного типу (на позацентровий розтяг і триточковий вигин) товщиною 25 мм і більше. Потім будували залежність K_{IC} від нормованої температури $(T - T_{K0})$, де значення T_{K0} для кожного металу оцінювали за результатами випробувань стандартних зразків Шарпі на ударний вигин.

На кінцевій стадії доволно («на око») будували лінію, яка охоплювала (огинала) знизу всі експериментальні значення K_{IC} , тобто використовували детерміністичний підхід. Варто зауважити, що для отримання температурних залежностей K_{IC} сталей 15X2МФА, 15X2МФА-А, 15X2НМФА, 15X2НМФА-А та їхніх зварних з'єднань використовували плавки та зварні проби з різним хімічним складом та термообробкою. Таким чином, форма нижньої огинаючої лінії визначалася конструкційними сталями з найгіршими параметрами в'язкості руйнування. У такий спосіб було отримано проєктні криві тріщиностійкості, які на сьогодні регламентовані у нормах ПНАЕ Г-7-002-86 для використання у розрахунках на опір крихкому руйнуванню [11].

У положеннях ПНАЕ Г-7-002-86 для розрахункових сценаріїв аварійних ситуацій допускається використання різних кривих тріщиностійкості для матеріалів КР ВВЕР-1000.

Для сталі марки 15X2НМФА-А нормативна залежність коефіцієнта інтенсивності напружень від температури виражається таким рівнянням:

$$[K_I]_3 = 74 + 11 \cdot \exp(0,0385 \cdot (T - T_K)). \quad (4)$$

Для зварних з'єднань сталі марки 15X2НМФА-А

нормативна крива тріщиностійкості задається таким рівнянням:

$$[K_I]_3 = 35 + 53 \cdot \exp(0,0217 \cdot (T - T_K)). \quad (5)$$

Крім того, норми ПНАЕ Г-7-002-86 передбачають використання узагальненої залежності допустимого коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} від нормованої температури, що характеризується таким співвідношенням:

$$[K_I]_3 = 26 + 36 \cdot \exp(0,02 \cdot (T - T_K)). \quad (6)$$

В останньому випадку одна узагальнена залежність призначена як для сталі марки 15X2НМФА-А, так і для її зварних з'єднань. Слід також зазначити, що залежність (6) також використовується у методиці VERLIFE [6] для оцінки цілісності КР ВВЕР.

Важливо відзначити, що коефіцієнти у рівнянні (6) практично збігаються з коефіцієнтами у рівнянні (3), яке визначає 5 % толерантну границю Майстер кривої. Цей збіг є достатньо обнадійливим моментом з огляду на потенційну можливість застосування референсної температури T_0 як функціонального еквівалента T_K . У такому випадку нормативна залежність ПНАЕ Г-7-002-86 буде практично збігатися на температурній осі з 5 % толерантною границею Майстер кривої, якщо її індексувати значеннями T_0 замість T_K .

Щодо діючої на сьогодні методики СОУ НАЕК 177:2019 [10], то у її нормативних положеннях для розрахунків крихкої міцності матеріалів КР у випадку термічного шоку рекомендується застосовувати температурну залежність K_{IC} , яка виражається таким рівнянням:

$$\bar{K}_{IC} = 23 + 48 \cdot \exp(0,019 \cdot (T - T_K)). \quad (7)$$

У цьому випадку також одна крива тріщиностійкості використовується як для основного металу циліндричних обечайок, так і для зварних швів КР.

Результати порівняння свідчать, що для основного металу КР 5 % довірча границя Майстер кривої суттєво відрізняється від нормативної кривої ПНАЕ Г-7-002-86 (рис. 7). Це стосується в першу чергу нижнього шельфу, який для нормативної кривої ПНАЕ Г-7-002-86 характеризується значно вищим рівнем. Також можна помітити, що у перехідній області 5 % довірча границя Майстер кривої суттєво відрізняється від нормативної залежності K_I та має більш консервативний характер.

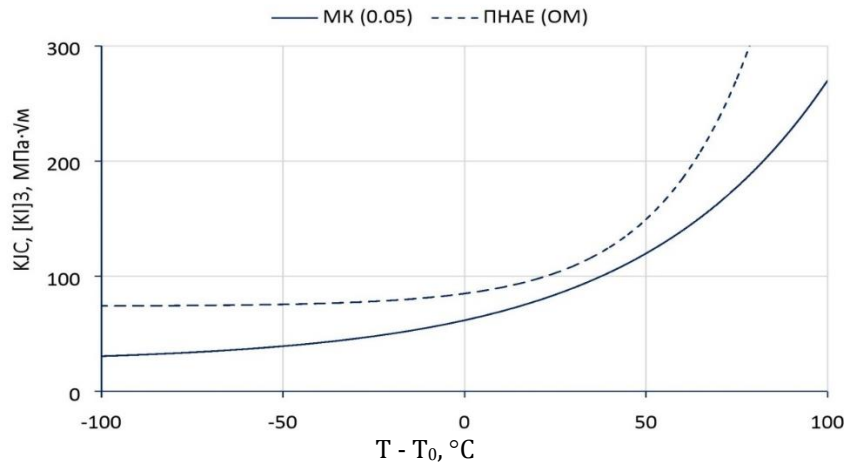


Рис. 7. 5 % довірча границя Майстер кривої та нормативна крива в'язкості руйнування ПНАЕ Г-7-002-86 для основного металу КР ВВЕР-1000.

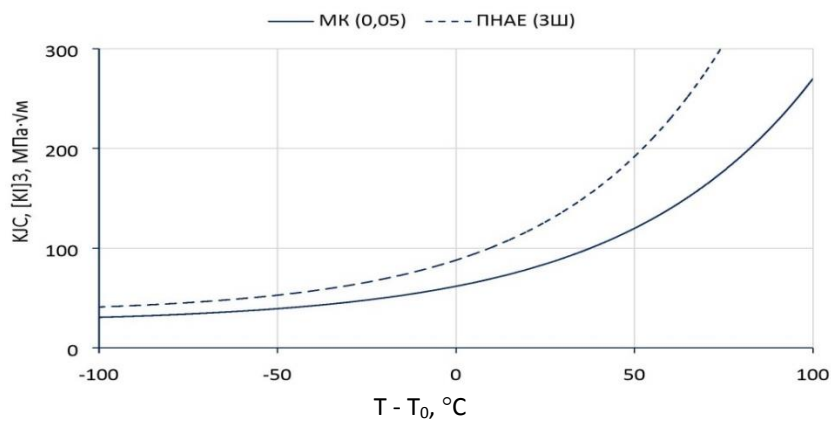


Рис. 8. 5 % довірча границя Майстер кривої та нормативна крива в'язкості руйнування ПНАЕ Г-7-002-86 для металу зварного шва КР ВВЕР-1000.

Для металу зварного шва залежність ПНАЕ Г-7-002-86 краще узгоджується з 5 % довірчою границею Майстер кривої щодо величини нижнього шельфу та форми в перехідній області температур, однак остання зсунута приблизно на 30 °C по відношенню до нормативної кривої тріщиностійкості у бік підвищених температур (рис. 8), тобто є більш консервативною.

Порівняння узагальненої залежності коефіцієнта інтенсивності напружень від температури, що призначена для сталі марки 15X2НМФА-А та її зварних з'єднань, із залежністю $K_{IC}(0,05)$ показує, що форма обох кривих практично збігається (рис. 9). Незначну відмінність можна помітити лише в діапазоні перехідних температур $50 < (T - T_0) < 100$ °C. Як уже відмічалось раніше, збіг обох кривих дає потенційну можливість застосувати референсну температуру T_0 для індексації нормативної кривої в'язкості руйнування як функціональний еквівалент T_K . Саме такий підхід до оцінки в'язкості руйнування застосовано у міжнародній методиці VERLIFE [7].

Результати ще одного порівняння наведено на рис. 10, де поряд з Майстер кривою показана

крива в'язкості руйнування, яка регламентована СОУ НАЕК 177:2019 для застосування у розрахунках на крихку міцність. У цьому випадку залежність K_I суттєво відрізняється від 5 % довірчої границі Майстер кривої тільки у перехідній області. Ця відмінність може бути нівельована паралельним зсувом нормативної кривої тріщиностійкості у бік підвищених температур приблизно на 13 °C, у результаті чого дві криві будуть практично збігатися.

Отже, залежність СОУ НАЕК 177:2019 може бути індексована температурою T_0 як функціональним еквівалентом T_K , якщо буде враховано зсув 13 °C. Наприклад, для оцінки в'язкості руйнування металу КР нормативна залежність K_{IC} буде розміщена на температурній осі із застосуванням індексної температури RT_0 , яка визначається за таким співвідношенням:

$$RT_0 = T_0 + 13^\circ\text{C}, \quad (8)$$

де референсна температура T_0 повинна враховувати похибки її визначення.

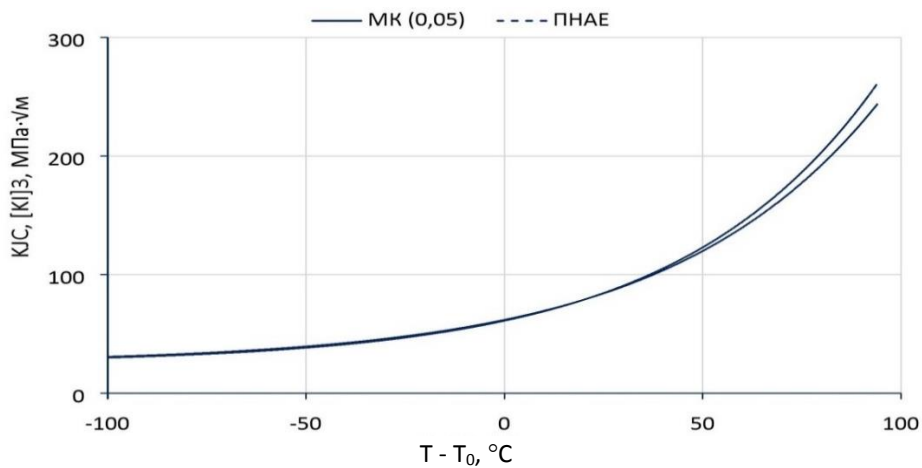


Рис. 9. 5 % довірча границя Майстер кривої і узагальнена крива в'язкості руйнування ПНАЕ Г-7-002-86 для металу КР ВВЕР-1000.

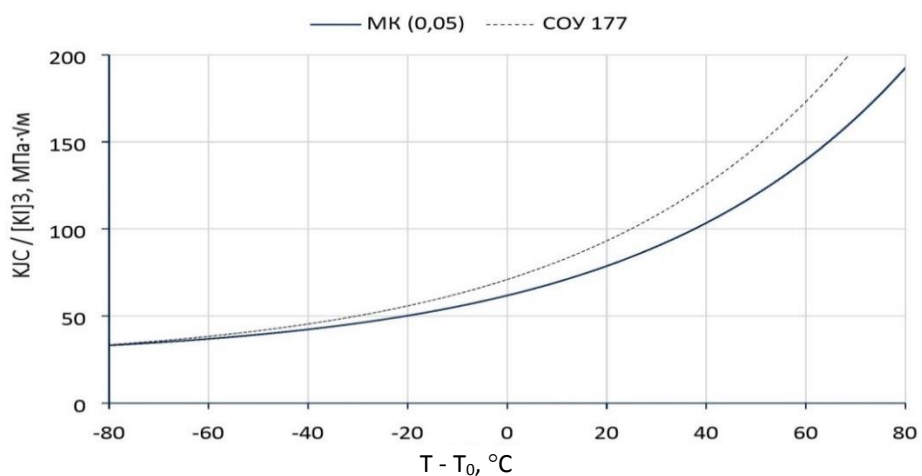


Рис. 10. 5 % довірча границя Майстер кривої і нормативна крива СОУ НАЕК 177:2019 для металу КР ВВЕР-1000.

Таким чином, порівняльний аналіз кривих в'язкості руйнування показав, що 5 % довірча границя Майстер кривої найкраще узгоджується з узагальненою залежністю ПНАЕ Г-7-002-86, яка використовується для сталі марки 15X2НМФА-А та її зварних з'єднань. Їхня форма практично збігається. Щодо інших нормативних залежностей K_{IC} , то вони помітно відрізняються і є менш консервативними порівняно з 5 % довірчою границею Майстер кривої.

5. Висновки

У роботі розглянуто ряд ключових аспектів щодо використання статистичної методології Майстер кривої та референсної температури T_0 для оцінки тріщиностійкості конструкційної сталі марки 15X2НМФА-А та її зварних з'єднань із застосуванням малорозмірних зразків механіки руйнування таких, як зразки Шарпі з тріщиною. В аналіз включено експериментальні дані, отримані за результатами випробувань на в'язкість

руйнування ЗС основного металу і металу зварного шва КР ВВЕР-1000. Показано, що для штатних зразків температурна залежність K_{IC} і розкид експериментальних даних добре узгоджується з формою Майстер кривої для металу КР в неопромінену, опромінену та термічно зістареному станах. Для реконструйованих зразків досліджених матеріалів виявлено статистично значиме відхилення температурних залежностей K_{IC} від Майстер кривої у бік збільшення крутизни.

Крім того, встановлено, що 5 % довірча границя Майстер кривої практично збігається з формою узагальненої залежності ПНАЕ Г-7-002-86, яка використовується для сталі марки 15X2НМФА-А та її зварних з'єднань. Для індексації нормативної кривої тріщиностійкості СОУ НАЕК 177:2019 запропоновано використовувати температуру $RT_0 = T_0 + 13$ $^{\circ}C$ замість критичної температури крихкості T_{K0} для металу КР у вихідному стані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. V. Revka, E. Grynuk, L. Chyrko The use of master curve method for statistical re-evaluation of surveillance test data for WWER-1000 reactor pressure vessels. *Strength Mat.* 42 (2010) 705.
2. [Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, \$T_0\$, for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM E1921-19. ASTM Book of Standards. Vol. 03.01:2019.](#)
3. [Use of Fracture Toughness Test data to Establish Reference Temperature for Pressure Retaining Materials. Section XI, Division 1. Code Case N-629 \(New York, ASME, 1999\).](#)
4. Master Curve Fracture Toughness Application for Point Beach Nuclear Plant Unit 2. Consulting Report, ATI-021-030-2003-1 (January 2003).
5. B.-S. Lee. Life extension programme for Kori-1 nuclear power plant. In: Proceedings of Regional workshop on Structure, Systems and Components Integrity. Belo Horizonte, Brazil, 23 - 26 June 2009.
6. Direct Use of Master Fracture Toughness Curve for Pressure-Retaining Materials of Class 1 Vessels. Section XI. Division 1. Code Case N-830 (New York, ASME, 2013).
7. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs "VERLIFE": Technical report, No. COVERS-WP4-D4.10, COVERS project (WP4 Material and Equipment Ageing) (2008) 275 p.
8. Технология реконструкции образцов-свидетелей металла корпусов реакторов ВВЭР-1000: отчет ИЯИ НАН Украины (К., ИЯИ НАН Украины, 2009) 14 с. / Technology of reconstruction of metal witness samples of WWER-1000 reactor pressure vessels: Report of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, 2009) 14 p. (Rus)
9. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (Москва: Энергоатомиздат, 1989). / NPPR (Nuclear Power Rules and Regulations) G-7-002-86. Standards for Strength Calculation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (Moskva: Energoatomizdat, 1989). (Rus)
10. СОУ НАЕК 177:2019. Инженерная, научная и техническая поддержка. Методика оценки хрупкой прочности корпусов реакторов ВВЭР (К., ГП НАЭК "Энергоатом", 2019) 49 с. / SOU NNEGC (Standard of organization of Ukraine, National Nuclear Energy Generating Company) 177:2019. Engineering, scientific, and technical support. Methodology for assessing the brittle strength of WWER reactor pressure vessels (Kyiv, State enterprise NNEGC "Energoatom", 2019) 49 p. (Rus)
11. M. Brumovsky. Check of Master Curve application to embrittled RPVs of WWER type reactors. *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 79 (2002) 715.

V. M. Revka*, L. I. Chyrko

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: vrevka@hotmail.com

COMPARISON OF MASTER CURVE WITH NORMATIVE METHOD OF ESTIMATING WWER-1000 REACTOR PRESSURE VESSEL METAL FRACTURE TOUGHNESS

The paper considers the generalized temperature dependence of the stress intensity factor K_{JC} in the WWER-1000 reactor pressure vessel metal, which was derived based on the surveillance test data for fracture toughness. The consistency of the shape of the Master curve and 95 % upper and lower confidence bounds with the experimental dependence of crack resistance parameters on temperature was studied. From the point of view of the level of conservatism and acceptability, a comparison of the normative curves of fracture toughness according to NPPR (Nuclear Power Rules and Regulations) G-7-002-86 and SOU NNEGC (Standard of organization of Ukraine, National Nuclear Energy Generating Company) 177:2019 with a 5 % confidence bound of the Master curve was carried out. The possibility of using RT_0 temperature as a temperature index instead of T_K for the normative fracture toughness curve of SOU NNEGC 177:2019 was considered.

Keywords: WWER-1000 reactor pressure vessel, 15X2NMFA-A steel, surveillance specimens, radiation embrittlement, critical brittleness temperature, fracture toughness, Master curve.

Надійшла/Received 08.01.2024