

УДК 539.4

doi:10.20998/2413-4295.2021.03.03

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ДЛЯ СТАЛІ 22К ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ РІЗНИХ ТИПІВ

А. В. КРАВЧУК*, Є. О. КОНДРЯКОВ

відділ чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: kravchuk.a@ipp.kiev.ua

АНОТАЦІЯ В наш час в різних галузях промисловості, зокрема в атомній енергетиці, для визначення характеристик тріщиностійкості поряд із стандартними випробуваннями компактних зразків, які є доволі дорогими та складними, розробляються методи визначення цих характеристик за результатами ударних випробувань зразків Шарпі зі встановленням залежностей між ударною в'язкістю (енергією руйнування) та критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень (J -інтегралом). В роботі проаналізовано кореляційні та аналітичні методи, автори яких вважають їх універсальними для певного класу сталей. Кореляційні методи поділяються на одноетапні та двоетапні. Одноетапні методи дозволяють за відомою енергією руйнування отримати значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень. Двоетапні методи на першому етапі пропонують розрахунок динамічного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень, на другому зсув по температурі та отримання статичного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень. Аналітичні методи за діаграмою ударного руйнування зразка дозволяють побудувати J - R криву та за нею розрахувати значення J -інтегралу. Проведено серію випробувань на тріщиностійкість CT зразків із теплостійкої сталі 22К, визначено референсну температуру T_0 за однотемпературною методикою стандарту ASTM-1921 та побудовано Майстер криву. Проведено серію ударних випробувань стандартних зразків Шарпі у діапазоні температур $-50...+100^{\circ}C$ з використанням інструментованого вертикального копра, обладнаного високошвидкісною системою реєстрації. За результатами ударних випробувань зразків Шарпі визначено характеристики тріщиностійкості з використанням різних методів. Встановлено, що як аналітичні, так і кореляційні методи не можуть бути універсальними та використовуватись для визначення характеристик тріщиностійкості сталі 22К. Тому було запропоновано нову експоненціальну кореляційну залежність між енергією руйнування зразка Шарпі та критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень для теплостійкої сталі 22К.

Ключові слова: зразок Шарпі; CT зразок; ударний згин; тріщиностійкість; критичний коефіцієнт інтенсивності напружень; Майстер крива

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS FOR STEEL 22K FROM THE RESULTS OF TESTS OF DIFFERENT TYPES SPECIMENS

A. KRAVCHUK, E. KONDRIAKOV

Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Nowadays, in various industries, in particular in nuclear energy, to determine the fracture toughness, along with standard tests of compact specimens, which are quite expensive and complex, methods are developed to determine these characteristics by impact tests of Charpy specimens using different correlations between Charpy impact fracture energy (CVN) and critical stress intensity factor (J -integral). The paper analyzes correlation and analytical methods, the authors of which consider them universal for a certain class of steels. Correlation methods are divided into one-stage and two-stage. One-stage methods allow to obtain the value of the critical stress intensity factor by the known fracture energy. Two-stage methods in the first stage offer the calculation of the dynamic critical stress intensity factor, in the second the temperature shift and obtaining a static critical stress intensity factor. Analytical methods according to the impact fracture diagram of the specimen allow to construct a J - R curve and calculate the value of the J -integral. A series of fracture tests of CT specimens made of heat-resistant steel 22K was carried out, the reference temperature T_0 was determined according to the single-temperature method of the ASTM-1921 standard and the Master curve was constructed. A series of standard Charpy specimens impact tests in the temperature range $-50...+100^{\circ}C$ was performed using an instrumented drop-weight impact testing machine equipped with a high-speed registration system. According to the results of Charpy specimens impact tests, the fracture toughness were determined using different methods. It is established that both analytical and correlation methods cannot be universal and can be used to determine the fracture toughness of 22K steel. Therefore, a new exponential correlation was proposed between the fracture energy of the Charpy specimens and the critical stress intensity factor for heat-resistant steel 22K.

Keywords: Charpy specimen; CT specimen; impact bending; fracture toughness; critical stress intensity factor; Master curve

Вступ

Вирішенням проблеми оцінки залишкового ресурсу та обґрунтуванням продовження строків експлуатації відповідальних конструкцій, займаються

фахівці різних галузей сучасної техніки, зокрема в атомній енергетиці, як в Україні, так і за кордоном. При оцінці ресурсу корпусів реакторів АЕС проводяться випробування на тріщиностійкість та ударну в'язкість зразків-свідків (ЗС) для визначення

ступеню деградації матеріалу внаслідок радіаційного та термічного окрихчування, зокрема металу та зварних з'єднань корпусу реактора (КР) АЕС при тривалій експлуатації. Визначення характеристик тріщиностійкості за стандартними випробуваннями компактних зразків є доволі дорогими та складними, тому розробляються методики визначення цих характеристик за результатами ударних випробувань зразків Шарпі з використанням різних кореляційних залежностей між ударною в'язкістю (енергією руйнування) та критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень [1,2],

Розробка кореляційних залежностей передбачає проведення статистичного аналізу великого обсягу експериментальних даних. Умовно кореляційні методи можна розділити на одно та 2-х етапні. Одноетапні дозволяють отримувати характеристики тріщиностійкості за значенням повної або питомої енергії руйнування зразків Шарпі. Розвитком таких методів займалися Рольф, Новак [3], Барсом, Вітт [4] та інші. 2-х етапні кореляційні методи передбачають на першому кроці розрахунок динамічного критичного КІН, на другому зсув по температурі та отримання значень статичного критичного КІН, серед них методи Sailor, Corton [5] та Roberts, Newton [6].

Також існують кореляційні методи отримання референсної температури T_0 та побудови за нею Майстер кривої. Серед них емпіричні залежності, які включають значення критичних температур 28Дж і 41Дж (Wallin, Sattari-Far [7], Sokolov, Nanstad [8]), а також залежності, які окрім зазначених температур включають характеристики міцності матеріалів та діаграму навантаження, отриману з ударних випробувань (Sreenivasan [9]).

Останні роки набули поширення аналітичні методи отримання характеристик тріщиностійкості. Такі методи передбачають побудову J-R кривої за результатами аналізу діаграми деформування та руйнування зразків Шарпі. Найбільш розвинутим серед них є аналітичний 3-х параметричний метод Шиндлера [10], який передбачає побудову J-R кривої за трьома параметрами, отриманими із діаграми деформування та руйнування і метод нормалізації Шаоді [11], який полягає у розділенні діаграми на окремі ділянки та розрахунку значень J інтегралу та приросту тріщини для кожної ділянки по аналогії зі стандартом стандарту ASTM E 1820 [1].

Наведені методи розробляються як універсальні для широкого спектру конструкційних сталей, тому в роботі була проведена перевірка застосування даних методів для визначення характеристик тріщиностійкості на прикладі сталі 22К, а також була запропонована нова кореляційна залежність.

Мета роботи

Основною задачею даної роботи є визначення характеристик тріщиностійкості для теплостійкої сталі 22К за різними експериментальними методиками.

Методика випробувань та обробки результатів

Випробування компактних зразків СТ-0,5 зі сталі 22К проводились, згідно методики стандарту ASTM E1820 [1]. В діапазоні температур $-120^{\circ}\text{C} \leq T \leq -25^{\circ}\text{C}$ проводились випробування на визначення силової характеристики K_{IS} . В діапазоні температур $-25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 10^{\circ}\text{C}$ проводились випробування на визначення енергетичної характеристики тріщиностійкості J_{IC} .

Ударні випробування проводились на інструментованому вертикальному копрі [12], обладнаному високошвидкісною багатоканальною системою реєстрації зусиль та деформацій (частота дискретизації 20 МГц), а також системою нагріву та охолодження зразків у широкому діапазоні температур [13]. Проводились випробування стандартних зразків Шарпі розміром 55 x 10 x 10 мм. в діапазоні температур $-50 \dots +100^{\circ}\text{C}$ при швидкості удару $V_0 = 5 \text{ м/с}$ [14,15].

Зразки Шарпі та компактні зразки вирізались з елемента трубопроводу зі сталі 22К в одному напрямку.

Побудова Майстер кривої

За результатами випробувань компактних зразків СТ-0,5 зі сталі 22К були отримані діаграми руйнування в координатах $P(\Delta l)$, як показано на рис. 1.

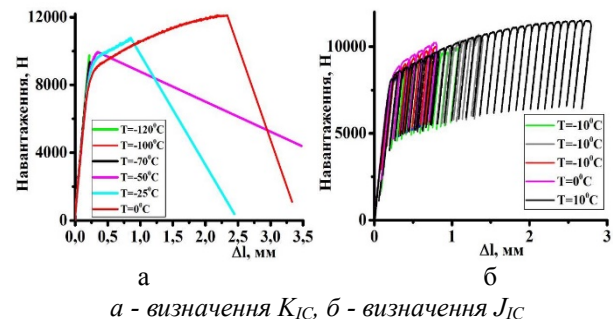


Рис. 1 – Діаграми руйнування $P(\Delta l)$, отримані за результатами випробувань компактних зразків зі сталі 22К

Визначення референсної температури T_0 та побудова Майстер кривої проводилось згідно стандарту ASTM E1921-03 [2] за однотемпературною методикою. Випробування на визначення енергетичної характеристики тріщиностійкості J_{IC} проводились за стандартом ASTM E1820-01 [1].

За результатами ударних випробувань зрізків Шарпі зі сталі 22К було побудовано температурну криву в'язко-крихкого переходу та визначено критичні температури T_{28J} та T_{41J} , які відповідають енергії руйнування $CVN=28\text{Дж}$ та енергії $CVN=41\text{Дж}$, і становлять $T_{28J}=+5^{\circ}\text{C}$ та $T_{41J}=+17^{\circ}\text{C}$ відповідно (рис. 2).

Випробувань на тріщиностійкість проводились за температури $T = -10^{\circ}\text{C}$.

В даній роботі використовувались зразки товщиною 0,5 дюйма, тому значення $K_{Jc(1T)}$ перераховуються за формулою [2]:

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

де $K_{Jc(0)} = K_{Jc}$; B_0 - номінальна товщина зразків для випробувань, B_x - номінальна товщини передбачення, $K_{min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

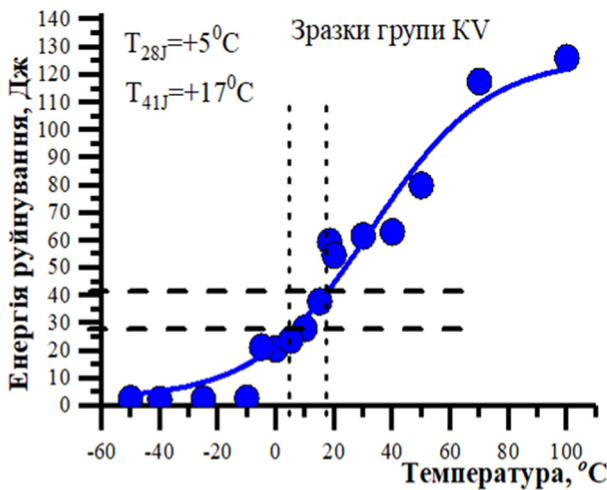


Рис. 2 – Температурна крива в'язко-крихкого переходу для сталі 22К

Якщо еквівалентне значення $K_{Jc(1T)}$ для зразків 1Т більше $83 \text{ MPa}\sqrt{m}$, необхідна кількість дійсних значень K_{Jc} для виконання оцінки становить шість. Оскільки результати деяких випробувань на тріщиностійкість можуть не відповідати критеріям процедури J_{Ic} стандарту ASTM E1820-01 [1], для даного набору даних допускається до 3 недійсних значень. Було проведено 8 випробувань, з яких 1 результат був недійсним.

Майстер крива $K_{Jc}(T)$ відповідає загальній формі кривої залежності в'язкості руйнування від температури. Для цього методу медіанна температурна крива тріщиностійкості для зразків товщиною 1Т описують рівнянням:

$$K_{Jc(1T)} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)] \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (2)$$

де T - температура випробувань, T_0 - референсна температура.

Референсна температура T_0 розраховується за результатами розрахунків значень $K_{Jc(1T)}$, які відповідають результатам 1Т зразків:

$$T_0 = T - \left(\frac{1}{0.019} \right) \ln \left[\frac{K_{Jc(1T)} - 30}{70} \right] = -38.1^\circ\text{C} \quad (3)$$

На рис. 3 представлено Майстер криву для сталі 22К, а також її 5% та 95% огинаючі

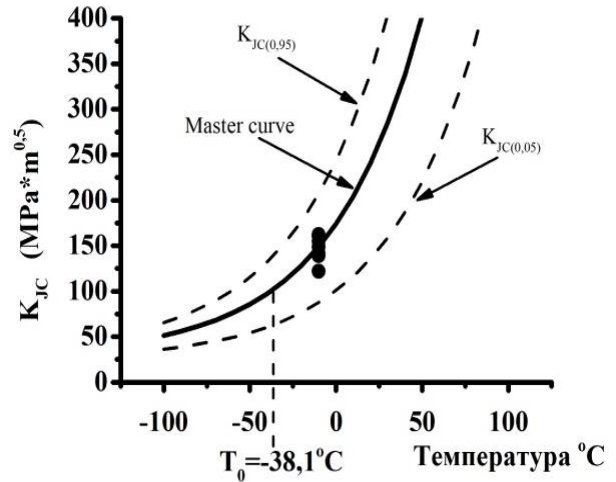


Рис. 3 – Майстер крива та визначена референсна температура для сталі 22К

Визначення характеристик тріщиностійкості за результатами ударних випробувань зразків Шарпі

Температурні криві тріщиностійкості, отримані за результатами ударних випробувань зразків Шарпі зі сталі 22К за відомими кореляційними методами [3-9], показані на рис.4. Аналіз результатів показав, що ці методи дають значний розкид значень характеристик тріщиностійкості, тому можуть бути застосовані лише для відповідних типів матеріалів, а отже вони не є універсальними.

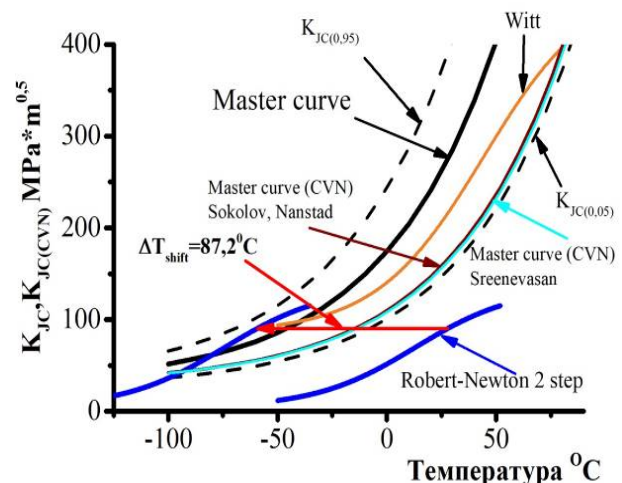


Рис. 4 – Температурні криві тріщиностійкості для сталі 22К, отримані за результатами ударних випробувань зразків Шарпі з використанням відомих кореляційних методів

За кожною діаграмою руйнування стандартних зразків Шарпі зі сталі 22К було

визначено параметри для аналітичних методів Schindler [10] та Chaouadi [11]. Аналіз отриманих результатів показав суттєві відмінності розрахованих значень $K_{JC(CVN)}$ з експериментальною Майстер кривою (рис. 5).

Отже, розглянуті кореляційні та аналітичні методи визначення характеристик тріщиностійкості за результатами ударних випробувань зразків Шарпі дають значні похибки і не є універсальними.

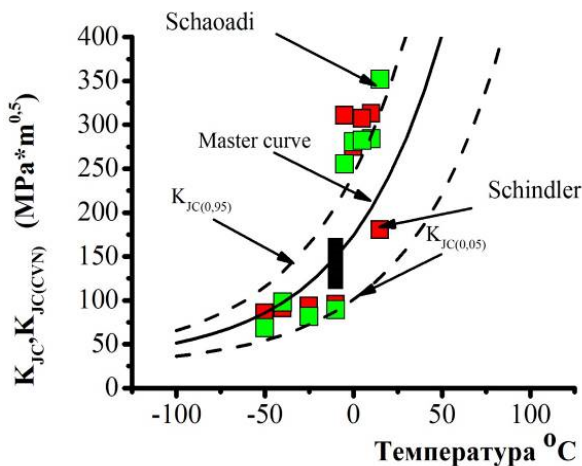


Рис. 5 – Співставлення експериментальної Майстер кривої та температурних залежностей тріщиностійкості, розрахованих за аналітичними методами для сталі 22К

Вивчення можливості застосування кореляційних залежностей, розроблених для інших матеріалів, показали про неможливість використання кореляційних коефіцієнтів для сталі 22К, запропонованих у оглянутих методах. Тому необхідно розробити нову кореляційну залежність на основі отриманих результатів випробувань компактних зразків та зразків Шарпі.

Для розробки нової кореляційної залежності було складено таблицю значень енергії руйнування E_{CVN} , питомої енергії руйнування KCV та критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jcmed} при однакових значеннях температури. Залежності між параметрами K_{Jcmed} та енергією руйнування E_{CVN} та між параметрами K_{Jcmed} та питомою енергією руйнування KCV апроксимували лінійною, поліноміальною, степеневою та експоненціальною функціями. Розрахунки статистичних параметрів показали, що найбільш точно залежність між енергією руйнування E_{CVN} та критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{Jcmed} при однакових значеннях температури описує функція $y(x) = a \cdot e^{b \cdot x}$. Отримана кореляційна залежність має наступний вигляд:

$$K_{IC} = 113,2 \cdot e^{0,155 \cdot E_{CVN}} \quad (4)$$

де E_{CVN} в Дж, K_{IC} в $MPa \cdot m^{1/2}$

Розраховані параметри нової кореляційної залежності було перевірено на предмет відповідності області допустимих значень K_{IC} згідно стандарту ASTM E 1921 [2]. Як показано на рис.6, отримана кореляційна залежність дає гарну збіжність з результатами випробувань СТ зразків зі сталі 22К.

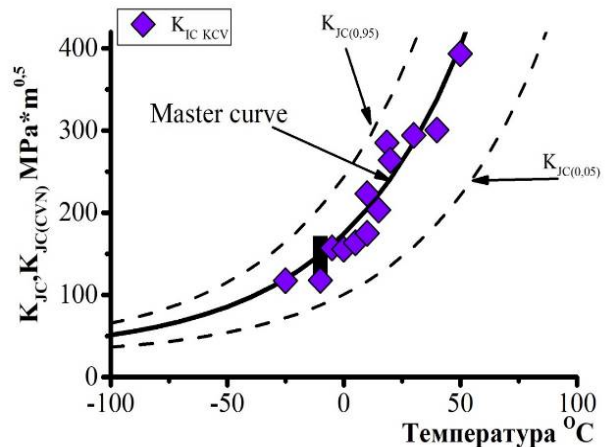


Рис. 6 – Температурні залежності K_{IC} отримані за новою кореляційною залежністю

Висновки

Визначено характеристики тріщиностійкості за результатами випробувань компактних зразків та ударних випробувань зразків Шарпі зі сталі 22К з використанням різних методик.

Запропонована нова експоненціальна кореляційна залежність для визначення характеристик тріщиностійкості для сталі 22К за результатами ударних випробувань зразків Шарпі.

Список літератури

1. ASTM E 1820 01 Standard test method for measurement of fracture toughness. Instead of ASTM E 1820 99a; Introduced 10.06.2001. ASTM International. 2001. 46.
2. ASTM E 1921-03 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. Instead of ASTM E 1921 02 Introduced 01.11.2003. ASTM International. 2003. 20.
3. Rolfe S. T. and Novak S. R. Slow-bend K_{Ic} testing of medium-strength high-toughness steels. In: Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. 1970. 124-159. doi: 10.1520/STP33665S.
4. Wullaert A. R., Ireland R. D., and Tetelman S. A. *Int. ASM Symp.* 1974. 255.
5. Schroeder M., Ortman R., Scukina E. Korrelationen zwischen Kennwerten des Kerbschlagbiegeversuchs

- und der dynamischen Bruchzähigkeit. *Neue Hutte*. 1985. 30. 115.
- Roberts R., Newton C. *Interpretative Report on Small-scale Test Correlations with K_{IC} -data*. Welding Research Council, New York, 1991. 265.
 - Sattari-Far I., Wallin K. *Application of Master Curve Methodology for Structural Integrity Assessments of Nuclear Components*. Swedish Nuclear Power Inspectorate. 2005. 186 p.
 - Sokolov M. A., Alexander D. J. An Improved Correlation Procedure for Subsize and Full-Size Charpy Impact Specimen Data. *NUREG*. - CR-6379, ORNL-6888. 1997. 298 p. doi:10.2172/463630.
 - Sreenivasan P. R. Estimation of ASTM E-1921 reference temperature from Charpy tests: Charpy energy-fracture toughness correlation method. *Engng Fract Mech*. 2008. 29–45. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.08.007.
 - Schindler H. J. Estimation of the dynamic J-R-curve from a single impact bending test. *11th Europ. Conf. on Fracture, Poitiers*, France. 1996. 2007-2012.
 - Chaouadi R. J., Puzzolante L. Procedure to Estimate the Crack Resistance Curve from the Instrumented Charpy V-notched Impact Test. *ICF-12, Toronto, Canada*. 2009.
 - Кондряков Е. А., Жмака В. М., Харченко В. В. и др., Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях. *Проблемы прочности*. 2005. № 3. С. 140 - 146.
 - Харченко В. В., Кондряков Е. А., Жмака В. Н., Бабуцкий А. А. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности. *Надёжность и долговечность машин и сооружений*. 2006. № 27. С. 121-130.
 - ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. 05.01.2005.
 - ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. - Введ. 01.01.79.
 - Rolfe S. T. and Novak S. R. Slow-bend K_{IC} testing of medium-strength high-toughness steels. In: Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463. *American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA*, 1970, 124–159, doi: 10.1520/STP33665S.
 - Wullaert A. R., Ireland R. D., and Tetelman S. A. *Int. ASM Symp.*, 1974. 255 p.
 - Schroeder M., Ortmann R., Scukina E. Korrelationen zwischen Kennwerten des Kerbschlagbiegeversuchs und der dynamischen Bruchzähigkeit. *Neue Hutte*, 1985, 30, 115.
 - Roberts R., Newton C. *Interpretative Report on Small-scale Test Correlations with K_{IC} -data*. Welding Research Council, New York, 1991, 265 p.
 - Sattari-Far I., Wallin K. Application of Master Curve Methodology for Structural Integrity Assessments of Nuclear Components. *Swedish Nuclear Power Inspectorate*, 2005. 186 p.
 - Sokolov M. A., Alexander D. J. An Improved Correlation Procedure for Subsize and Full-Size Charpy Impact Specimen Data. *NUREG*. - CR-6379, ORNL-6888, 1997. 298 p., doi:10.2172/463630.
 - Sreenivasan P. R. Estimation of ASTM E-1921 reference temperature from Charpy tests: Charpy energy-fracture toughness correlation method. *Engng Fract Mech.*, 2008, 29–45, doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.08.007.
 - Schindler H. J. Estimation of the dynamic J-R-curve from a single impact bending test. *11th Europ. Conf. on Fracture, Poitiers*, France, 1996, 2007-2012.
 - Chaouadi R. J., Puzzolante L. Procedure to Estimate the Crack Resistance Curve from the Instrumented Charpy V-notched Impact Test. *ICF-12, Toronto, Canada*, 2009.
 - Kondryakov E. A., Zhmaka V. M., Kharchenko V. V. i dr Sistema izmereniya deformatsiy I usilyy pri dinamicheskikh ispytaniyakh. *Problemy prochnosti*, 2005, 3, pp. 140 - 146.
 - Kharchenko V. V., Kondryakov E. A., Zhmaka V. N., Babutskiy A. A. Instrumentirovanny koper dlya udarnykh ispytaniy: osnovnyye elementy. analiz rabotosposobnosti. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy*, 2006, 27, pp. 121-130.
 - ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. - 05.01.2005.
 - HOST 9454-78 Металлы. Метод усрытanyia на удapныi yzghyb pry ponyzhennykh, komnatnoi y povyshennykh temperaturakh. - Vved. 01.01.79.

References (transliterated)

- ASTM E 1820 01 Standard test method for measurement of fracture toughness. Instead of ASTM E 1820 99a ; Introduced 10.06.2001. ASTM International. 2001. 46.
- ASTM E 1921-03 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. Instead of ASTM E 1921 02 Introduced 01.11.2003. ASTM International. 2003. 20.

Відомості про авторів (About authors)

Кравчук Андрій Васильович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, м.Київ, УКРАЇНА; ORCID: 0000-0002-5885-2375; e-mail: kravchuk.a@ipp.kiev.ua.

Andriy Kravchuk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Junior Researcher, Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5885-2375; e-mail: kravchuk.a@ipp.kiev.ua.

Кондряков Євгеній Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, м.Київ, УКРАЇНА; ORCID: 0000-0003-2805-5786; e-mail: kondryakov@ipp.kiev.ua

Ievgen Kondriakov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2805-5786; e-mail: kondryakov@ipp.kiev.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кравчук А. В., Кондряков Є. О. Визначення характеристик тріщиностійкості для сталі 22К за результатами випробувань зразків різних типів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 3 (9). С. 20-25. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.03.

Please cite this article as:

Kravchuk A., Kondriakov E. Determination of fracture toughness for steel 22k from the results of tests of different types specimens. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 3 (9), pp. 20–25, doi:10.20998/2413-4295.2021.03.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кравчук А. В., Кондряков Е. А. Определение характеристик трещиностойкости для стали 22К по результатам испытаний образцов различных типов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 3 (9). С. 20-25. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.03.

АННОТАЦИЯ В настоящее время в различных отраслях промышленности, в частности в атомной энергетике, для определения характеристик трещиностойкости рядом со стандартными испытаниями компактных образцов, довольно дорогими и сложными, разрабатываются методы определения этих характеристик по результатам ударных испытаний образцов Шарпи с установлением зависимостей между ударной вязкостью (энергией разрушения) и критическим коэффициентом интенсивности напряжений (*J*-интегралом). В работе проанализированы корреляционные и аналитические методы, авторы которых считают их универсальными для определенного класса сталей. Корреляционные методы делятся на одноэтапные и двухэтапные. Одноэтапные методы позволяют по известным значениям энергии разрушения получить значение критического коэффициента интенсивности напряжений. Двухэтапные методы на первом этапе предлагают расчет динамического критического коэффициента интенсивности напряжений, на втором - сдвиг по температуре и получение статического коэффициента интенсивности напряжений. Аналитические методы по диаграмме ударного разрушения образца позволяют построить *J*-*R* кривую и по ней рассчитать значение *J*-интеграла. Проведена серия испытаний на трещиностойкость СТ образцов с теплостойкой стали 22К, определена референсная температура T_0 по одностепенной методике стандарта ASTM-1921 и построена Мастер кривую. Проведена серия ударных испытаний стандартных образцов Шарпи в диапазоне температур $-50...+100^{\circ}\text{C}$ с использованием инструментированного вертикального копра, оборудованного высокоскоростной системой регистрации. По результатам ударных испытаний образцов Шарпи определены характеристики трещиностойкости с использованием различных методов. Установлено, что как аналитические, так и корреляционные методы не могут быть универсальными и использоваться для определения характеристик трещиностойкости стали 22К. Поэтому была предложена новая экспоненциальная корреляционная зависимость между энергией разрушения образца Шарпи и критическим коэффициентом интенсивности напряжений для теплостойкой стали 22К

Ключевые слова: образец Шарпи; СТ образец; ударный изгиб; трещиностойкость; коэффициент интенсивности напряжений; Мастер кривая

Надійшла (received) 30.08.2021