

УДК 539.4

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.01

ПОБУДОВА КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ РЕЗУЛЬТАТАМИ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ СТАНДАРТНИХ ТА МАЛОРОЗМІРНИХ ЗРАЗКІВ ШАРПІ

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 Світовий досвід показує, що існуюча в Україні на сьогоднішній день нормативна база потребує вдосконалення для більш коректного обґрунтування міцності і довговічності елементів 1-го контуру АЕС. У зв'язку з пошуком додаткових резервів міцності при вирішенні питань продовження строків експлуатації обладнання АЕС в теперішній час продовжують розвиватися та вдосконалюватися різні чисельні і експериментальні методики. Ударні випробування зразків Шарпі є одними з найпростіших та недорогих способів визначення механічних властивостей матеріалів. Використання малорозмірних зразків Шарпі дозволяє зекономити метал, що є актуальним, наприклад, при оцінці радіаційного окрихчення металу корпусу реактора АЕС. Але механічні характеристики, отримані в результаті випробувань, залежать від розміру зразка, тому для отримання коректних результатів необхідно побудувати кореляційні залежності між стандартними та малорозмірними зразками Шарпі. В даній роботі було проведено дві серії ударних випробувань стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків із конструкційної вуглецевої сталі 45 у діапазоні температур $-50 \div +150$ °С. Випробування проводились на інструментальному вертикальному копрі, який може фіксувати повну діаграму деформації та руйнування зразка. Результати цих випробувань можуть бути використані для оцінки міцності та довговічності великомасштабних конструкцій.

Основною задачею даної роботи є побудова кореляційних залежностей між результатами ударних випробувань стандартних та малорозмірних зразків Шарпі.

Проведено аналіз ударних випробувань стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків зі сталі 45. Побудовано апроксимаційні криві в'язко-крихкого переходу за функцією гіперболічного тангенсу Олدفілда з визначенням параметрів функції. Проведено аналіз відомих кореляційних залежностей між результатами випробувань стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків. За методикою ORNL проведено калібровку результатів випробувань малорозмірних зразків зі сталі 45 та здійснено зіставлення з результатами випробувань стандартних зразків Шарпі.

Ключові слова: зразок Шарпі; малорозмірний зразок; кореляційна залежність; енергія деформування та руйнування; крива в'язко-крихкого переходу.

CONSTRUCTION OF CORRELATION DEPENDENCES BETWEEN THE RESULTS OF STANDARD AND SUB-SIZE CHARPY SPECIMENS IMPACT TESTS

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 The object of this paper is a construction of correlation dependences between the results of standard and sub-sized Charpy specimens impact tests.

The world experience shows, that the standard basis available in Ukraine needs improvements for more correct interpreting of strength and durability of the nuclear power-station 1-st contour elements. Nowadays different numerical and experimental methods are being developed and improved for solving the problems of broadening the power-stations equipment operation life looking for the additional margin of safety. Charpy specimens impact tests are one of more simple and inexpensive method to determine the mechanical properties of materials. The use of sub-size specimens for radiation embrittlement estimation of NPP's reactor pressure vessel metal is very relevant due to saving of scarce metal. Material properties obtained from tests depend on the specimen size. It is necessary to build correlation dependences between standard and sub-size Charpy specimens to obtain conservative results. A two series of Charpy specimens impact test from structural carbon steel 45 were carried out in the temperature range of $-50 \div +150$ °C. Tests were conducted on instrumented vertical impact machine, which can record a full diagram of specimen's deformation and fracture. The results of these tests can be used to estimate the strength and durability of large-scale structures.

An analysis of the impact tests results of standard and sub-size Charpy specimens from steel 45 were carried out. Approximation ductile-brittle transition curves from the function of the Oldfield hyperbolic tangency were constructed with definition of function parameters. The analysis of known correlation dependencies between the results of standard and sub-size Charpy specimens impact tests was carried out. The ORNL method was used to calibrate the test results of sub-size specimens from steel 45 and comparison with the results of standard Charpy specimens was fulfilled.

Keywords: Charpy specimen; sub-size specimen; correlation dependence; energy of deformation and fracture; ductile-brittle transition curve.

Вступ

В наш час в різних галузях промисловості, зокрема в атомній енергетиці, для визначення критичної температури крихкості застосовуються

ударні випробування зразків Шарпі. Для цього використовується різне обладнання та методики оцінки, що призводить до великого розкиду результатів. Сучасні високошвидкісні системи реєстрації [1] дозволяють отримати більше інформації

за результатами одного випробування, насамперед розділити повну енергію деформування та руйнування на складові. Особливу увагу приділяється використанню різних типів зразків для проведення ударних випробувань.

Використання малорозмірних зразків Шарпі для оцінки радіаційного окрихчування металу корпусів реакторів АЕС є дуже перспективним завдяки економії дефіцитного металу. Існуючі в галузі нормативні документи дійсні лише для стандартних зразків Шарпі. Тому для застосування результатів випробувань малорозмірних зразків необхідна побудова емпіричних кореляційних залежностей [2,3,4]. Кореляційні залежності, які використовуються на сьогоднішній день у світовій практиці, не є універсальними і можуть відрізнятися для різних типів матеріалів.

У даній роботі для побудови кореляційних залежностей було використано результати ударних випробувань стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків зі сталі 45.

Мета. Основною задачею даної роботи є побудова кореляційних залежностей між результатами ударних випробувань стандартних та малорозмірних зразків Шарпі.

Мета роботи

Основною задачею даної роботи є побудова кореляційних залежностей між результатами ударних випробувань стандартних та малорозмірних зразків Шарпі.

Методика випробувань та обробки результатів.

Ударні випробування проводились на інструментованому вертикальному копрі [5], обладнаному багатоканальною системою реєстрації зусиль та деформацій (частота дискретизації 20 МГц), а також системою нагріву та охолодження зразків у широкому діапазоні температур [1]. Для аналізу було обрано результати випробувань в діапазоні температур -50 ... +150°C, при швидкості удару $V_0 = 4,4$ м/с стандартних зразків Шарпі, розміром 55 x 10 x 10 мм (19 зразків), та малорозмірних зразків, розміром 27,5 x 5 x 5 мм (23 зразка) зі сталі 45. [6,7]

Побудова кореляційних залежностей

Для побудови кривої в'язко-крихкого переходу була використана функція гіперболічного тангенсу Олدفілда [8]:

$$E = A + B \cdot \operatorname{th}\left(\frac{T - T_0}{C}\right), \quad (1)$$

де A , B , C та T_0 – це параметри, які графічно зображені на рис. 1.

Згідно з рис. 1 може бути встановлений зв'язок між параметрами функції (1) та загальновідомими

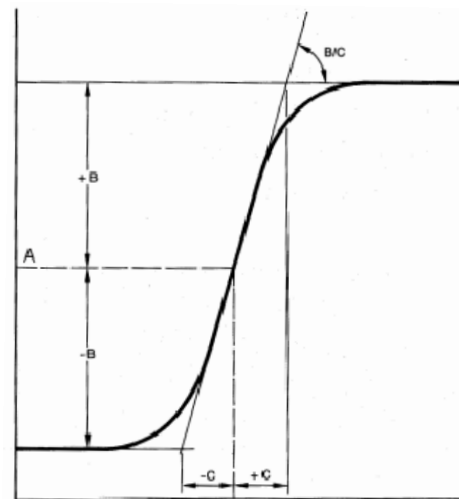


Рис. 1 – Крива функції гіперболічного тангенсу Олدفілда [8]

характеристичними точками кривої в'язко-крихкого переходу:

- енергія верхнього шельфу (USE) = $A + B$,
- енергія нижнього шельфу (LSE) = $A - B$,
- температура в'язко-крихкого переходу ($DBTT$) = T_0 ,
- температура початку в'язко-крихкого переходу = $T_0 - C$,
- кут нахилу кривої = B/C .

На рис. 2 та 3 приведені криві в'язко-крихкого переходу для стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків, відповідно. При цьому для апроксимації даних випробувань застосовану функцію Олدفілда (1).

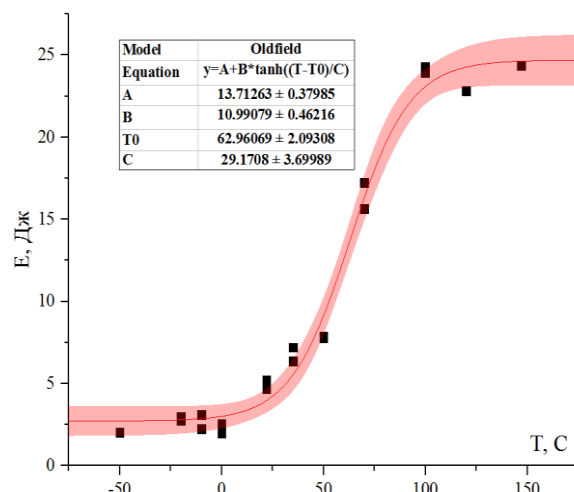


Рис. 2 – Результати випробувань стандартних зразків Шарпі та апроксимація кривої в'язко-крихкого переходу за функцією Олدفілда для стандартних зразків Шарпі

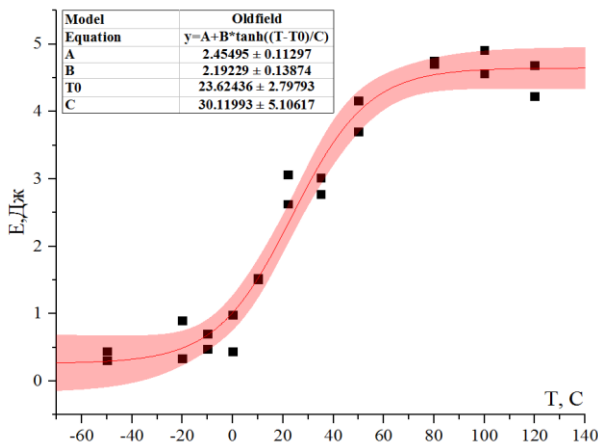


Рис. 3 – Результати випробувань малорозмірних зразків та апроксимація кривої в'язко-крихкого переходу за функцією Олдфілда

У табл. 1 приведено значення параметрів функції Олдфілда для двох типів зразків. Усі параметри було розраховано з довірчим інтегралом 95% ($\pm 2\sigma$). На рис. 2 та 3 95% довірчий інтервал показаний рожевим кольором.

Таблиця 1 – Значення параметрів функції Олдфілда для двох типів зразків

E, Дж	A, Дж	B, Дж	T ₀ , °C	C, °C	USE Дж	LSE Дж
Стандартні	13,7 ± 0,4	11,0 ± 0,5	62,9 ± 2,1	29,2 ± 3,7	24,7 ± 0,9	2,7 ± 0,9
Малорозмірні	2,5 ± 0,1	2,2 ± 0,1	23,6 ± 2,8	30,1 ± 5,1	4,7 ± 0,2	0,3 ± 0,2

З табл. 1 видно, що значення енергії верхнього шельфу для двох типів зразків відрізняються у 5,3 рази, тоді як енергії нижнього шельфу відрізняються у 9 разів. Також розкид даних випробувань для малорозмірних зразків дещо вищий, ніж для стандартних зразків Шарпі.

У існуючих на сьогоднішній час кореляційних залежностях між результатами ударних випробувань зразків двох типів у якості калібруючих коефіцієнтів використовуються відношення енергій на верхньому та/або нижньому шельфі. Так у роботі [9] автори пропонують ORNL методику калібровки результатів для усієї кривої в'язко-крихкого переходу. При цьому спочатку перетворюються значення енергій руйнування малорозмірних зразків, після чого здійснюється температурний зсув. Це дає змогу побудувати криву в'язко-крихкого переходу, співставну з кривою для стандартних зразків Шарпі. Перетворення значень енергій здійснюється за залежністю:

$$NF = (1 - STA(T) \cdot NF_{LSE}) + STA(T) \cdot NF_{USE} \quad (2)$$

де $STA(T)$ – це частка в'язкого руйнування, яка визначається за результатами фрактографічного аналізу поверхонь зламів зразків і змінюється від 0 (абсолютно крихке руйнування) до 1 (абсолютно в'язке руйнування) зі збільшенням температури випробування. NF_{USE} та NF_{LSE} - відношення енергій руйнування на верхньому та нижньому шельфі відповідно:

$$NF_{USE} = \frac{USE_{Charpy}}{USE_{Sub-size}} \quad (3)$$

$$NF_{LSE} = \frac{LSE_{Charpy}}{LSE_{Sub-size}} \quad (4)$$

Зсув температур випробувань малорозмірних зразків здійснюється за рівнянням:

$$T = T_{Sub-size} + T_K \quad (5)$$

де T_K - критична температура крихкості.

Ця методика була застосована з коефіцієнтами кореляції для сталі 45 до результатів випробувань малорозмірних зразків для співставлення з результатами випробувань стандартних зразків Шарпі. На рис. 4 показано співставлення скорегованих даних випробувань малорозмірних зразків з даними випробувань стандартних зразків Шарпі та апроксимуючі криві за функцією Олдфілда.

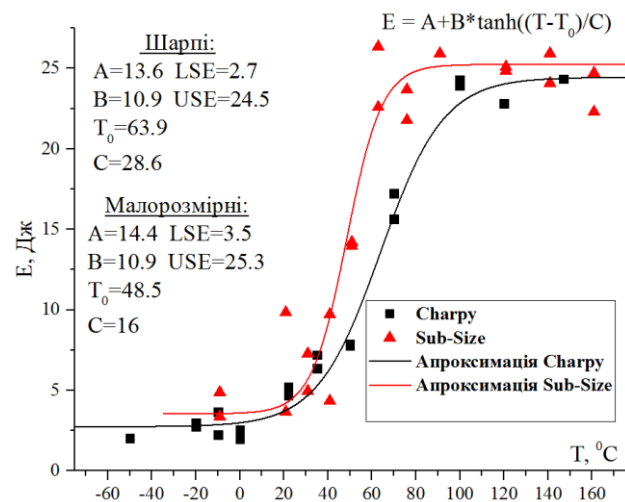


Рис. 4 – ORNL кореляція результатів випробувань малорозмірних зразків і співставлення з результатами випробувань стандартних зразків Шарпі

Як видно, співставлення кривих достатньо близьке, насамперед на верхньому та нижньому шельфі. Але температурний зсув достатньо великий і складає близько 15 °C. Також видно, що відрізняється кут нахилу кривих. Ці відмінності пов'язані з тим, що на другому етапі калібровки кривих, методики температурного зсуву має бути дещо складніша, ніж

запропонована в роботі [9]. Також у рівняння (5) має бути додана корекція кривизни кривих у вигляді коефіцієнта $C_{Charpy}/C_{Sub-size}$. Таким чином, запропонована кореляційна залежність має бути вдосконалена, але для цього потрібні додаткові дослідження з використанням різних типів матеріалів.

Висновки

- Проведено аналіз ударних випробувань стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків зі сталі 45. Побудовано апроксимаційні криві в'язко-крихкого переходу за функцією гіперболічного тангенсу Олдфілда з визначенням параметрів функції.
- Проведено аналіз відомих кореляційних залежностей між результатами випробувань стандартних зразків Шарпі та малорозмірних зразків. За методикою ORNL проведено калібровку результатів випробувань малорозмірних зразків зі сталі 45 та здійснено зіставлення з результатами випробувань стандартних зразків Шарпі.

Список літератури

1. **Кондряков, Е. А.** Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях / **Е. А. Кондряков, В. М. Жмака, В. В. Харченко и др.** // *Проблемы прочности*. – 2005. – № 3. – С. 140 – 146.
2. **Wallin, K.** Fracture mechanics based scaling criteria for miniature and sub-size charpy-v specimens / **K. Wallin, T. Planman and M. Valo** // *Elsevier Sci. Ltd. and ESIS*. – 2002. – P.279-286. – doi:10.1016/S1566-1369(02)80031-0.
3. **Chernobaeva, A. A.** Scale factor of standard and mini Charpy specimens from VVER-1000 RPV materials/ **A. A. Chernobaeva, K. I. Medvedev, D. A. Zhurko, et. al.** // *Int. J. Pres. Ves. Piping*. – 2016. – 145. - P. 23-28. – doi: 10.1016/j.ijpvp.2016.06.005.
4. **Schill, R.** Correlation between Charpy-V and Sub-Size Charpy Tests Results for an Un-Irradiated Low Alloy RPV Ferritic Steel / **R. Schill, P. Forget and C. Sainte Catherine** // *ECF 13*. – 2002. – P. 54-68.
5. **Харченко, В. В.** Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности / **В. В. Харченко, Е. А. Кондряков, В. Н. Жмака, А. А. Бабуцкий** // *Надёжность и*

- долговечность машин и сооружений*. – 2006. – №27. – С. 121-130.
6. ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. – 05.01.2005.
 7. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 01.01.79.
 8. **Oldfield, W.** Curve fitting impact test data: a statistical procedure / **W. Oldfield** // *ASTM Standardization News*. – 1975. – P. 24-29.
 9. **Sokolov, M. A.** An Improved Correlation Procedure for Subsize and Full-Size Charpy Impact Specimen Data/ **M. A. Sokolov, D. J. Alexander** // *NUREG*. – CR-6379, ORNL-6888. – 1997.

References (transliterated)

1. **Kondryakov, E. A., Zhmaka, V. M., Kharchenko, V. V., et al.** Sistema izmereniya deformatsiy i usily pri dinamicheskikh ispytaniyakh. *Problemy prochnosti*, 2005, 3, 140-146.
2. **Wallin, K., Planman, T. and Valo, M.** Fracture mechanics based scaling criteria for miniature and sub-size charpy-v specimens. *Elsevier Sci. Ltd. and ESIS*, 2002, 279-286, doi: 10.1016/S1566-1369(02)80031-0.
3. **Chernobaeva, A. A., Medvedev, K. I., Zhurko, D. A., et al.** Scale factor of standard and mini Charpy specimens from VVER-1000 RPV materials. *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 2016, 145, 23-28, doi:10.1016/j.ijpvp.2016.06.005.
4. **Schill, R., Forget, P. and Sainte, Catherine C.** Correlation between Charpy-V and Sub-Size Charpy Tests Results for an Un-Irradiated Low Alloy RPV Ferritic Steel. *ECF 13*, 2002, 54-68.
5. **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, 121-130.
6. ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method, 05.01.2005.
7. GOST 9454-78 Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennykh. komnatnoy i povyshennykh temperaturakh, Vved. 01.01.79.
8. **Oldfield, W.** Curve fitting impact test data: a statistical procedure. *ASTM Standardization News*, 1975, 24-29.
9. **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.

Сведения об авторах (About authors)

Кравчук Андрій Васильович – 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 – 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. Побудова кореляційних залежностей між результатами ударних випробувань стандартних та малорозмірних зразків Шарпі / **А. В. Кравчук, С. О. Кондряков** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 3-7. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.01.

Please cite this article as:

Kravchuk, A., Kondriakov, E. Construction of correlation dependences between the results of standard and sub-size Charpy specimens impact tests. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **45** (1321), 3-7, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кравчук, А. В. Построение корреляционных зависимостей между результатами ударных испытаний стандартных и малоразмерных образцов Шарпи / **А. В. Кравчук, Е. А. Кондряков** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 3-7. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.01.

АННОТАЦИЯ Мировой опыт показывает, что существующая в Украине на сегодняшний день нормативная база нуждается в совершенствовании для более корректного обоснования прочности и долговечности элементов 1-го контура АЭС. В связи с поиском дополнительных резервов прочности при решении вопросов продления сроков эксплуатации оборудования АЭС в настоящее время продолжают развиваться и совершенствоваться различные численные и экспериментальные методики. Ударные испытания образцов Шарпи являются одними из самых простых и недорогих способов определения механических свойств материалов. Использование малоразмерных образцов Шарпи позволяет экономить металл, является актуальным, например, при оценке радиационного охрупчивания металла корпуса реактора АЭС. Но механические характеристики, полученные в результате испытаний, зависят от размера образца, поэтому для получения корректных результатов необходимо построить корреляционные зависимости между стандартными и малоразмерными образцами Шарпи. В данной работе было проведено две серии ударных испытаний стандартных образцов Шарпи и малоразмерных образцов с конструкционной углеродистой стали 45 в диапазоне температур $-50 \div +150$ °С. Испытания проводились на инструментальном вертикальном копре, который может фиксировать полную диаграмму деформации и разрушения образца. Результаты этих испытаний могут быть использованы для оценки прочности и долговечности крупномасштабных конструкций.

Основной задачей данной работы является построение корреляционных зависимостей между результатами ударных испытаний стандартных и малоразмерных образцов Шарпи.

Проведен анализ ударных испытаний стандартных образцов Шарпи и малоразмерных образцов из стали 45. Построены аппроксимационные кривые вязко-хрупкого перехода по функции гиперболического тангенса Олдфилда с определением параметров функции. Проведен анализ известных корреляционных зависимостей между результатами испытаний стандартных образцов Шарпи и малоразмерных образцов. По методике ORNL проведена калибровка результатов испытаний малоразмерных образцов из стали 45 и осуществлено сопоставление с результатами испытаний стандартных образцов Шарпи.

Ключевые слова: образец Шарпи; малоразмерный образец; корреляционная зависимость; энергия деформирования и разрушения; кривая вязко-хрупкого перехода.

Поступила (received) 30.11.2018