

Обмен опытом

Exchange of Experience

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-68-72

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ИСПЫТАНИИ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ**© Александр Борисович Максимов¹, Игорь Петрович Шевченко², Ирина Сергеевна Ерохина¹**¹ ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Крым; e-mail: aleksandrmks@yandex.ru² ООО «Судостроительный завод «Залив», г. Керчь, Крым.

*Статья поступила 9 января 2018 г. Поступила после доработки 9 января 2018 г.
Принята к публикации 15 февраля 2018 г.*

Предложен метод разделения работы удара на работу зарождения и работу распространения трещины. Он заключается в испытании двух образцов с одинаковыми концентраторами напряжения и различными размерами поперечного сечения в месте надреза. Принимается, что работа зарождения пропорциональна ширине грани образца, на которой возникает трещина, и удельной энергии образования трещины, работа распространения трещины пропорциональна длине ее распространения и удельной энергии распространения трещины. В случае разрушения образца при испытании длина распространения трещины равна ширине образца. На основании данных о работе разрушения двух образцов и их геометрических размеров в месте надреза составляют систему двух линейных уравнений с неизвестными — удельной энергией образования трещины и удельной энергией распространения трещины. Решая эту систему уравнений, находят неизвестные и по ним вычисляют работы зарождения и распространения трещины. Применение аналитического метода позволяет повысить точность по сравнению с графически экстраполяционными методами. Новизна метода состоит в том, что используют один вид надреза на испытываемых образцах, поэтому образование и распространение трещины происходит при одной схеме напряженно-деформированного состояния. Кроме того, используют образцы с различными размерами сечения, что исключает влияние масштабного фактора. Поскольку удельная энергия образования трещины и удельная энергия распространения трещины не зависят от масштабного фактора, то они определяются только свойствами металла. Введение удельной энергии образования трещины и удельной энергии распространения трещины позволяет придать физический смысл работе разрушения трещины.

Ключевые слова: работа удара; работа зарождения трещины; работа распространения трещины; ширина образца; толщина образца; вид надреза образца; масштабный фактор; концентратор напряжения.

DETERMINATION OF THE METAL TOUGHNESS COMPONENTS IN IMPACT-BENDING TEST**© Alexander B. Maksimov¹, Igor P. Shevchenko², Irina S. Erokhina¹**¹ Kerch state Maritime technological University, Kerch, Crimea; e-mail: aleksandrmks@yandex.ru² “Shipbuilding plant “Zaliv”, Kerch, Crimea.

Received January 9, 2018. Revised January 9, 2018. Accepted February 15, 2018.

A method for separating the work of impact into two parts - the work of the crack nucleation and that of crack growth – which consists in testing two samples with the same stress concentrators and different cross-sectional dimensions at the notch site is developed. It is assumed that the work of crack nucleation is proportional to the width of the sample face on which the crack originates and the specific energy of crack formation, whereas the work of the crack growth is proportional to the length of crack development and the specific crack growth energy. In case of the sample fracture upon testing, the crack growth length is assumed equal to the sample width. Data on the work of fracture of two samples and their geometrical dimensions at the site of the notch are used to form a system of two linear equations in two unknowns, i.e., the specific energy of crack formation and specific energy of crack growth. The determined specific energy

values are then used to calculate the work of crack nucleation and work of crack growth. The use of the analytical method improves the accuracy compared to graphical - extrapolative procedures. The novelty of the method consists in using one and the same form of the notch in test samples, thus providing the same conditions of the stress-strain state for crack nucleation and growth. Moreover, specimens with different cross-section dimensions are used to eliminate the scale effects. Since the specific energy of the crack nucleation and specific energy of the crack growth are independent of the scale factor, they are determined only by the properties of the metal. Introduction the specific energy of crack formation and growth makes possible to assign a specific physical meaning to the fracture energy.

Keywords: impact work; work of crack nucleation; work of crack growth; sample width; sample thickness; type of the sample notch; scale factor; stress concentration.

Для испытания металла на ударную вязкость используют стандартные образцы в соответствии с ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Испытания проводят на маятниковом копре, например МК-30 (запас работы удара составляет 300 Дж). Ударная вязкость определяется отношением работы разрушения при испытании на ударный изгиб к площади поперечного сечения образца в месте надреза.

Процесс разрушения металла, в частности, при испытании на ударный изгиб состоит из образования и распространения трещины. Работа (A), затраченная на разрушение образца металла, складывается из работы зарождения трещины (A_z) и работы ее распространения (A_p) по образцу.

Работа зарождения и работа распространения трещины — важные характеристики, определяющие служебные свойства металла и влияющие на долговечность конструкции. Поэтому разделение работы удара при испытании на ударную вязкость — актуальная проблема металловедения.

Существует ряд способов разделения работы удара на работу зарождения и работу распространения трещины. По способу Отани [1] используют стандартные образцы при испытании на ударную вязкость. Испытания проводят на маятниковом копре. В результате заранее проведенных испытаний на образцах подбирают такую работу маятника, при которой образуется трещина. Эту работу принимают за работу зарождения трещины. Затем образец с трещиной помещают в специальный красящий раствор, например CuSO_4 , для осаждения на поверхностях трещины красящего осадка. Второй (окончательный) удар определяет работу распространения трещины. На образцах, разрушенных при испытании, видна окрашенная поверхность разрушения. Выбирают тот образец, где длина предварительно нанесенной трещины наименьшая. Работу первого удара на этом образце принимают за работу зарождения трещины, а работу второго удара — за работу распространения трещины. Недостатка-

ми метода Отани являются необходимость предварительного удара и подбор соответствующей работы, которая затрачивается только на образование трещины, наличие окрашивающего раствора, субъективное определение длины окрашенной области. Для получения результата следует использовать несколько образцов. Указанные недостатки способа Отани снижают точность определения работ зарождения и распространения трещины. Кроме того, температура испытания должна быть не ниже минус 30 °C [2].

Известен способ разложения ударной вязкости на работу зарождения и распространения трещины по Лившицу – Рахманову [3 – 5]. Образцы исследуемого материала при одинаковом сечении под надрезом нагружают до разрушения изгибающим ударом, определяют для каждого образца поглощенную энергию и работу зарождения трещины. Находят зависимость поглощенной энергии от работы зарождения трещины, а работу распространения трещины определяют экстраполяцией данной зависимости на значение, соответствующее нулю работе зарождения трещины.

По способу Б. А. Дроздовского [6] испытывают образцы с V-образным надрезом с заранее образованной с помощью вибратора усталостной трещиной. Считается, что при разрушении образца вся работа динамического излома расходуется на распространение трещины. При таком испытании определяют работу распространения трещины. Работу зарождения трещины рассчитывают как разность между работой разрушения при изгибе образца без усталостной трещины и работой ее распространения.

Недостатки способа Дроздовского: трещина образуется путем циклического нагружения, которое может изменить исходные свойства материала; субъективный выбор длины трещины, которая принимается за критическую.

Наиболее распространенным и технически простым решением разделения ударной вязкости на работу зарождения и распространения трещины является способ А. П. Гуляева [7]. Способ заключается в следующем. Подготавливают две группы стандартных образцов с одинаковыми

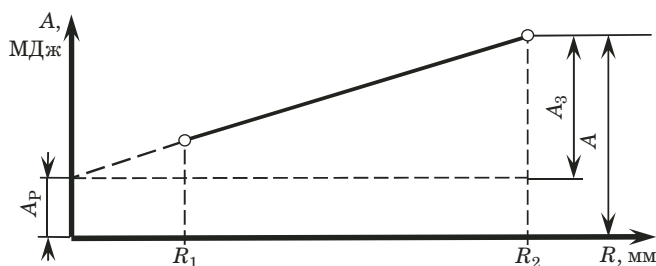


Рис. 1. Схема определения работы образования и распространения трещины по способу А. П. Гуляева

поперечными сечениями и длинами на ударную вязкость:

первая группа — с U-образным концентратором напряжений радиусом $R = 1$ мм (тип 1, ГОСТ 9454–78) и вторая группа — с V-образным концентратором напряжений радиусом $R = 0,25$ мм (тип 11, ГОСТ 9454–78). Образцы первой и второй групп испытывают на ударный изгиб при одинаковой температуре и определяют работу разрушения при U-образном и V-образном концентраторах напряжений. Затем графическим построением определяют зависимость работы удара от радиуса концентратора напряжений (рис. 1). Экстраполируя полученную зависимость при $R = 0$, получают значение работы удара, которое принимают за работу распространения трещины (A_p). Затем, вычитая из работы разрушения образца (A) работу распространения трещины при U-образном надрезе концентратора напряжений, находят работу зарождения трещины (A_3):

$$A_3 = A - A_p. \quad (1)$$

Этот способ имеет следующие недостатки.

1. Принимается, что работа образования трещины не зависит от вида концентратора напряжения. Это допущение приближенное, так как не учитывает различие схем напряженно-деформированного состояния в месте концентратора напряжений (надрезе). При U-образном и V-образном надрезах схемы напряженно-деформированного состояния различные [2].

2. Предполагается линейная зависимость между работой удара и величиной радиуса надреза концентратора напряжения.

3. Графическая экстраполяция определения работы распространения трещины имеет субъективную и объективную погрешности. Наличие субъективной составляющей погрешности при графической экстраполяции искажает получаемый результат.

4. Работа образования трещины определяется не независимо, а из полученных ранее дан-

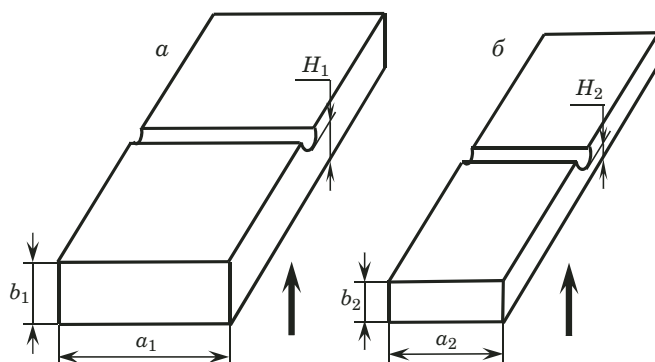


Рис. 2. Форма образцов для испытания на ударный изгиб. Стрелка — направление удара маятника копра

ных: работы удара и работы распространения трещины в соответствии с формулой (1).

Цель работы — разработка метода разделения работы удара при испытании на изгиб на работу зарождения и работу распространения трещины, позволяющего расширить технологические возможности применения и повысить точность получаемых результатов.

Из исследуемого материала изготавливали образцы для испытания на ударный изгиб с одинаковыми надрезами, но разными площадями поперечного сечения в месте концентратора напряжений.

Площадь поперечного сечения первого образца (рис. 2, а) в месте концентратора напряжений (надреза) составляет $S_1 = a_1 H_1$, а для второго образца (рис. 2, б) — $S_2 = a_2 H_2$, где a и H — ширина и высота образца в месте надреза. При испытании на ударный изгиб работа разрушения первого образца составляет A_1 , а второго образца — A_2 . Работу разрушения образца представим как сумму работ зарождения (A_3) и распространения (A_p) трещины:

$$A = A_3 + A_p. \quad (2)$$

Тогда для первого образца

$$A_1 = A_{31} + A_{p1}, \quad (3)$$

для второго образца

$$A_2 = A_{32} + A_{p2}. \quad (4)$$

Работа зарождения трещины зависит от качества материала и длины стороны, по которой производится удар ножа маятникового копра (см. рис. 2, размер a), и может быть представлена как

$$A_3 = \alpha a, \quad (5)$$

где α — удельная энергия образования трещины [Дж/м].

Тогда работа зарождения трещины для первого образца составит

$$A_{з1} = a_1 \alpha, \quad (6)$$

для второго образца —

$$A_{з2} = a_2 \alpha. \quad (7)$$

Работа распространения трещины зависит от качества материала и от площади, проходимой трещиной через образец (см. рис. 2, размеры α и H):

$$A_p = \alpha H \beta, \quad (8)$$

где β — удельная энергия распространения трещины [Дж/м²].

Тогда работа распространения трещины для первого образца будет равна

$$A_{p1} = a_1 H_1 \beta, \quad (9)$$

для второго образца —

$$A_{p2} = a_2 H_2 \beta. \quad (10)$$

С учетом уравнений (6), (7), (9), (10) для первого и второго образцов получим систему двух уравнений с двумя неизвестными — α и β :

$$\begin{cases} A_1 = a_1 \alpha + a_1 H_1 \beta, \\ A_2 = a_2 \alpha + a_2 H_2 \beta. \end{cases} \quad (11)$$

Решая эту систему уравнений, получаем значения α и β .

Работы зарождения и распространения трещин для первого и второго образцов вычислим соответственно по формулам (6), (7) и (9), (10).

Метод опробовали на образцах листовой стали марки А32 толщиной 10 мм. Размеры сечения образцов в месте надреза варьировали в интервалах (мм) $6 < a < 10, 6 < H < 8$ (см. рис. 2). Все образцы имели U-образный концентратор напря-

жения (надрез). Образцы испытывали на ударный изгиб на маятниковом копре МК-30 с определением работы разрушения образца при температуре минус 40 °С. В таблице представлены исходные геометрические данные двух партий образцов с размерами сечений в месте надреза $6 \cdot 10^{-3}$ м и $10 \cdot 8 \cdot 10^{-3}$ м² и данные по работе удара. Подставляя эти данные в систему алгебраических уравнений (11), получим

$$\begin{cases} 82 = 6\alpha + 6 \cdot 6\beta, \\ 170 = 10\alpha + 10 \cdot 8\beta. \end{cases} \quad (12)$$

Решая эту систему уравнений, определим значения удельной энергии образования трещины (α) и удельной энергии распространения трещины (β) (см. таблицу). Подставив значения α и β в уравнения (6), (7), (9), (10), получим работу зарождения и работу распространения трещины в образцах. Различие значений работ зарождения и распространения трещины для других пар типоразмеров образцов составляет не более 10 %.

Для сравнения определяли работы образования и распространения трещины по способу А. П. Гуляева. Из того же материала, что использовали в предлагаемом методе, изготавливали две партии образцов — типа 1 по ГОСТ 9454–78 ($8 \times 10 \times 55$ мм) с U-образным концентратором напряжения, где радиус надреза $R = 1,0$ мм, и типа 11 по ГОСТ 9554–78 с V-образным надрезом, где $R = 0,25$ мм. Испытания на ударный изгиб проводили на копре МК-30 при температуре минус 40 °С. По полученным значениям работы удара строили ее зависимость от радиуса надреза (рис. 3). При экстраполяции при $R = 0$ получена работа удара, равная 120 МДж. Это значение согласно способу А. П. Гуляева принято за работу распространения трещины. Работу образования трещины вычисляли как разность работы удара образца с U-образным концентратором напряжения (170 МДж) и работы распространения трещины (120 МДж). Таким образом,

Исходные данные и результаты испытаний образцов на ударный изгиб

№ пп.	Работа удара A , МДж	Размеры* образцов, $\times 10^{-3}$ м		Удельная энергия зарождения трещины α , МДж/м	Удельная энергия распространения трещины β , МДж/м ²	Работа зарождения трещины A_z , МДж	Работа распространения трещины A_p , МДж
		ширина (a)	высота (H)				
1	83,0	6	6	4,2	1,6	25,2	57,6
2	170,0	10	8	4,2	1,6	42,0	128,0
Образец тип I по ГОСТ 9454							
3	170,0	10	8	—	—	50,00	120,0
Образец тип II по ГОСТ 9554							
4	120,0	10	8	—	—	—	120,0

* Размеры образца в месте надреза.

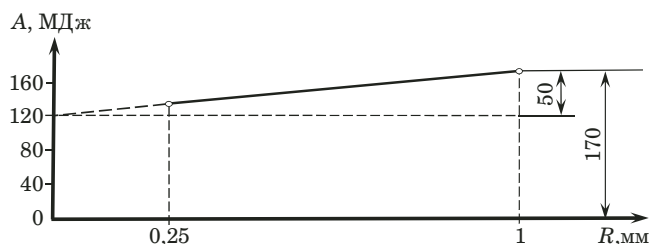


Рис. 3. Пример определения работы образования и распространения трещины по способу А. П. Гуляева

работа зарождения трещины — 50 МДж. Различие результатов по способу А. П. Гуляева и предлагаемому методу составило не более 10 %.

В предлагаемом методе введены понятия удельной энергии зарождения и удельной энергии распространения трещины. Эти понятия характеризуют физическое состояние металла и не зависят от геометрических размеров, т.е. составляющие ударной вязкости приобрели конкретный физический смысл.

Преимущества предлагаемого метода:

все параметры (a , H , A) измеряются объективно: размеры сечения — измерительным инструментом, работа удара — по измерительному механизму маятникового копра;

значения работ образования и распространения трещины — независимые между собой величины, определяемые только по работе удара из системы уравнений (11);

применение аналитического метода расчета работ образования и распространения трещины вместо графического метода повышает точность вычисления этих величин;

для испытаний применяют образцы с одинаковыми концентраторами напряжений (U-образный или V-образный), поэтому образование и распространение трещины происходит при одной схеме напряженно-деформированного состояния;

используются образцы с разными размерами площади поперечного сечения, что позволяет оценить значения удельной энергии образования и удельной энергии распространения трещины на листовом прокате разной толщины; это расширяет технологические возможности способа, так как исключает масштабный фактор.

Таким образом, разработанный метод определения составляющих ударной вязкости металла при испытании на ударный изгиб позволяет:

1) сравнивать значения удельных энергий зарождения и распространения трещины для образцов с разными размерами геометрического

сечения в месте надреза: шириной в интервале от 6 до 10 мм и высотой от 6 до 9 мм, что исключает масштабный фактор.

2) вычислять искомые характеристики более точно, чем графическими экстраполяционными методами.

3) применять на образцах концентраторы напряжений одинакового типа, поэтому образование и распространение трещины происходит в одинаковых напряженно-деформированных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Otani M. Study of sensitivity of welded joints to cut at dynamic tests of double strike / J. Railway Engineering Research. 1957. Vol. 14. N 11. P. 503 – 529.
2. Пашков Ю. И., Иванов М. А. К вопросу оценки трещиностойкости труб по ударной вязкости и пробе DWTT / Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия». 2014. Т. 14. № 4. С. 52 – 58.
3. Лившиц Л. С., Рахманов А. С. Об определении ударной вязкости при низких температурах и склонности металла к зарождению и развитию трещин / Заводская лаборатория. 1953. Т. 19. № 2. С. 51 – 54.
4. А.с. 1559267 СССР. Способ определения ударной вязкости материала / Л. С. Лившиц, А. С. Рахманов. — Оpubл. 23.04.90. Бюл. № 15.
5. Бакши О. А., Моносов А. Н., Кукин А. Г. Метод определения составляющих ударной вязкости / Заводская лаборатория. 1969. Т. 35. № 5. С. 615 – 619.
6. Дроздовский Б. А. О применении статического изгиба образцов с надрезом для количественной оценки кристалличности в изломе стали / Заводская лаборатория. 1946. Т. 12. № 4. С. 489 – 499.
7. Гуляев А. П. Чистая сталь. — М.: Металлургия, 1975. — 194 с.
8. Пат. 2621373 Российская Федерация. Способ определения составляющих ударной вязкости металла / Максимов А. Б. — № 2016123916; заявл. 15.06.16; опубл. 02.06.17. Бюл. № 16.

REFERENCES

1. Otani M. Study of sensitivity of welded joints to cut at dynamic tests of double strike / J. Railway Engineering Research. 1957. Vol. 14. N 11. P. 503 – 529.
2. Pashkov Yu. I., Ivanov M. A. To the question of evaluation of crack resistance of pipes impact strength and the sample DWTT / Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurg. 2014. Vol. 14. N 4. P. 52 – 58 [in Russian].
3. Livshits L. S., Rakhmanov A. S. On determination of impact strength at low temperatures and the tendency of the metal to the birth and development of cracks / Zavod. Lab. 1953. Vol. 19. N 2. P. 51 – 54 [in Russian].
4. USSR Inventor's Certificate 1559267SSSR. The method of determining the toughness of the material / L. S. Livshits, A. S. Rakhmanov // Publ. 23.04.90. Byull. N 15.
5. Bakshi O. A., Monosikov A. N., Kukin A. G. Method of determining components of toughness / Zavod. Lab. 1969. Vol. 35. N 5. P. 615 – 619 [in Russian].
6. Drozdovskii B. A. On the application of static bending notched specimen for the quantitative evaluation of the crystallinity on fracture of steel / Zavod. Lab. 1946. Vol. 12. N 4. P. 489 – 499 [in Russian].
7. Gulyaev A. P. Pure steel. — Moscow: Metallurgiya, 1975. — 194 p. [in Russian].
8. RF Pat. 2621373. The method of determining the components of the toughness of the metal at test for impact strength / Maksimov A. B. // Publ. 02.06.2017. Byull. N 16.