



СВЯЗЬ МЕЖДУ УДЕЛЬНЫМИ РАБОТАМИ РАЗРУШЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ УДАРНЫХ ОБРАЗЦОВ С РАЗЛИЧНЫМИ РАДИУСАМИ ЗАКРУГЛЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР

В. П. ДЯДИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассматривается возможность перехода от норм ударной вязкости, установленных на образцах Менаже (образец с круглым надрезом), к аналогичным нормам на образцах типа Шарпи (образец с острым надрезом) для низколегированных и малоуглеродистых конструкционных материалов в области переходных температур. Показано, что использование критерия определения критической температуры хрупкости по проценту волокна в изломе образца Менаже ($F_U \geq 50\%$) с практической точки зрения является более обоснованным, поскольку в данном случае, исходя из представленных результатов исследований, в неявном виде предполагается исключение возможности хрупкого зарождения разрушения образца Шарпи. Отмечено, что использование данной характеристики в первую очередь связано с тем, что между удельной работой разрушения образца Шарпи и процентом волокна в изломе существует линейная зависимость между процентом волокна в изломе образцов при одинаковых температурах испытания в диапазоне от 100 % волокна до 50 % и от 100 % волокна до 20 % соответственно. Библиогр. 4, рис. 3.

Ключевые слова: ударная вязкость, образец Шарпи, образец Менаже, хрупко-вязкое разрушение, переходная область температур

Наибольший практический интерес при определении значения ударной вязкости материала на стандартных образцах представляют те случаи, когда разрушение ударного образца происходит по смешанному механизму: зарождение вязкой трещины с последующим хрупким или хрупко-вязким распространением.

Проблеме сопротивляемости строительных сталей и их сварных соединений хрупким разрушениям посвящено множество работ. Многие авторы предлагают проводить изучение этого вопроса на крупногабаритных образцах по различным методикам. Однако до сих пор основным критерием стойкости конструкционных материалов сопротивлению хрупкому разрушению считается показатель ударной вязкости. Так, в зарубежной практике за основу приняты показатели ударной вязкости, полученные на образцах с V-образным надрезом, тогда как в отечественной до сих пор на образцах с круглым надрезом типа 1 (ГОСТ 19282–73; 19281–73; 6713–75; 5521–76).

Данные разных подходов к оценке вязкости материалов приводят к неоднозначным результатам и выводам (сталь по-разному реагирует на конфигурацию надреза). В связи с этим в последние годы в отечественную нормативную документацию были введены на факультативной основе требования к определению ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом (ГОСТ 19282–73, ГОСТ 6713–75 и др.).

Переход от норм ударной вязкости, установленных на образцах Менаже (образец с круглым надрезом), к аналогичным нормам на образцах типа Шарпи (образец с острым надрезом) для многочисленных конструкционных материалов, из которых ранее были изготовлены конструкции, требует пересмотра большого объема нормативной документации. Данную задачу практически невозможно решить из-за разности принятых критериев к требованиям материалов и их сварных соединений.

Определение переходного коэффициента от одного показателя ударной вязкости к другому экспериментальным путем очень проблематично. Это в первую очередь относится к уже эксплуатируемым конструкционным материалам, для которых отсутствуют экспериментальные данные значений ударной вязкости образцов Шарпи.

Дополнительные трудности возникают также тогда, когда разрушение образцов начинает носить смешанный характер в связи с наблюдаемым бимодальным изменением работы разрушения, связанным с нарушением устойчивого состояния соблюдения условий плоской деформации.

Все это в значительной степени усложняет определение переходного коэффициента, который позволил бы связать показатели ударной вязкости образцов с различными радиусами закругления в переходной температурной области как для эксплуатируемого оборудования, так и для вновь проектируемого.



В данной статье рассматривается вариант упрощенного подхода к связи между удельными работами разрушения стандартных ударных образцов с различными радиусами закругления в данном температурном интервале.

Учитывая результаты работ [1–4], можно сопоставить удельную работу зарождения вязкой трещины образца Менаже с удельной работой хрупкого разрушения образца Шарпи:

$$\left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_T}\right)^{1+n} = \frac{K_2^2 4(1+n)}{\left(1 + \frac{4}{\rho_2} r_*\right) (B-b) k_3 \sigma_T 3\varepsilon_T} a_{U_B}^3, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T}\right)^{1+n} = \frac{4(1+n) E \cdot 2,18 \cdot 1,18}{3(B-b) k_1 \sigma_T^2} a_{V_{xp}}^3, \quad (2)$$

где ε_L – деформация Людерса на площадке текучести материала; ε_f – критическая локальная пластическая деформация на расстоянии r_* от вершины надреза образца Шарпи; ε_T – деформация на пределе текучести материала; σ_T – предел текучести материала; ρ_2 – радиус надреза в образце Менаже ($\rho_2=1,0$ мм); r_* – расстояние от вершины надреза, принимаемое равным среднему характерному размеру структурного элемента ($r_*=0,06$ мм); n – величина деформационного упрочнения материала; K_2 – коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза образца Менаже ($K_2=2,1$); k_1 – коэффициент стеснения для образца Шарпи, равный 1,25; k_3 – коэффициент стеснения для образца Менаже, равный 1,225; $(B-b)$ – высота образца под надрезом, равная 8 мм; E – модуль упругости.

Откуда, принимая хрупкую работу распространения в образце Шарпи $a_{V_{xp}}^p = 0$, следует:

$$\frac{a_{U_B}^3}{a_{V_{xp}}^3} = \frac{a_{U_B}^3}{a_{V_{xp}}^3} = 2,57 \frac{1 + \frac{4}{\rho_2} r_*}{K_2^2} \frac{k_3}{k_1} \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_L}\right)^{1+n}, \quad (3)$$

где $a_{V_{xp}}$ – удельная работа разрушения образца Шарпи при условии вязкого зарождения разрушения с последующим его хрупким развитием.

Выражение (3) позволяет аналитическим путем выявить значительное повышение переходного коэффициента, связующего показатели ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже, в некоторой области температур, когда реализуется условие хрупкого разрушения образца Шарпи. Экспериментальное подтверждение данного факта видно из рис. 1. Вместе с тем необходимо отметить, что, с одной стороны, в зависимости (3) не учитываются возможные работы вязкого распространения разрушения образцов Менаже и Шарпи, которые,

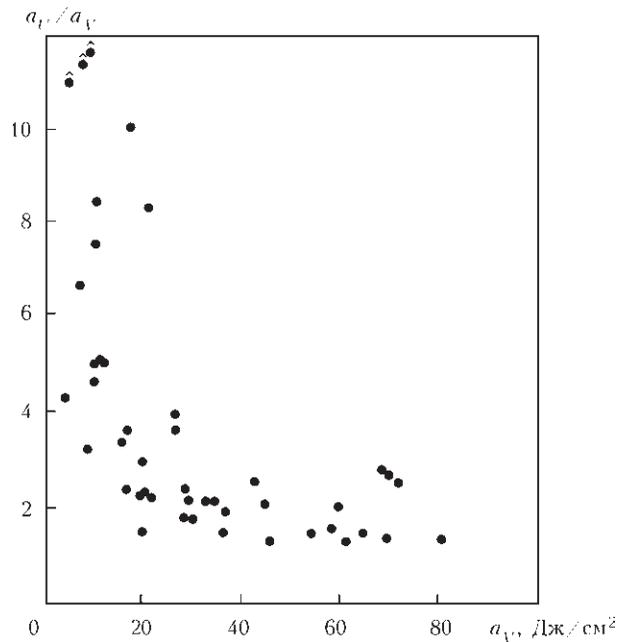


Рис. 1. Зависимость a_U/a_V от величины a_U для сварных соединений, выполненных проволоками Св-08А, Св-10Г2, Св-08Г2С и Св-10ГСМТ под флюсом Ан-43

в свою очередь, могут быть оценены по процентному содержанию волокна в изломах. С другой стороны, определение переходного коэффициента, связывающего показатели ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже, в некоторой области температур, когда значение ударной вязкости образца с U-образным надрезом близки к его регламентируемому значению ($a_U \approx 30$ Дж/см²), может встречать значительные трудности в связи с различием переходных температур зарождения хрупкого разрушения рассматриваемых типов образцов. Это хорошо видно на рис. 2, где приводится сопоставление значений ударной вязкости образцов Менаже и величины переходного коэффициента при одинаковых температурах испытания.

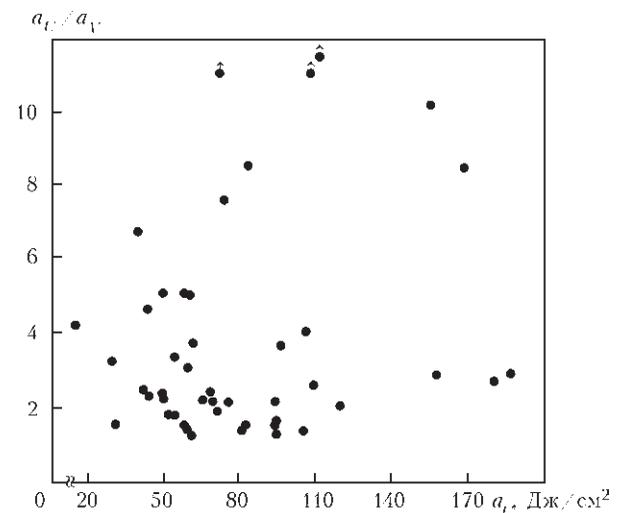


Рис. 2. Зависимость характеристики a_U/a_V от величины a_U для сварных соединений, выполненных проволоками Св-08А, Св-10Г2, Св-08Г2С и Св-10ГСМТ под флюсом Ан-43



Как видно из рисунка, значение переходного коэффициента, в зависимости от ударной вязкости a_U , характеризуется значительным разбросом, что ставит под сомнение возможность определения данной характеристики напрямую от величины a_U . Вместе с тем сопоставление значений переходного коэффициента от ударной вязкости a_V при одинаковых температурах показывает на возможность установления такой зависимости.

Однако в данном случае, необходимо будет решать обратную задачу.

В то же время хрупкое разрушение образца Шарпи может происходить при температурах, когда еще возможно вязкое развитие трещины в образце Менаже, что приводит к неоднозначной оценке критической температуры хрупкости конструктивных материалов по критерию: $a_U \geq 30$ Дж/см².

В этой связи использование критерия определения критической температуры хрупкости по проценту волокна в изломе образца Менаже ($F_U \geq 50\%$), с практической точки зрения является более обоснованным, поскольку в данном случае, исходя из результатов исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, в неявном виде предполагается исключение возможности хрупкого зарождения разрушения образца Шарпи. Так, на рис. 3 представлены данные сопоставления процента волокна в изломах образцов Менаже и Шарпи при одинаковых температурах испытания для различных сварных соединений.

Таким образом, подводя итог сказанному выше, следует отметить, что для определения величины переходного коэффициента по результатам испытаний образцов Менаже, необходимо рассматривать еще некоторые дополнительные

характеристики, которые позволили бы учитывать особенности перехода к хрупкому зарождению трещины в образцах данных типов.

Одной из таких дополнительных характеристик можно рассматривать процентное содержание волокна в изломах.

Предпочтение в выборе данной характеристики в первую очередь связано с тем, что между удельной работой разрушения образца Шарпи и процентом волокна в изломе существует линейная зависимость, которая подтверждается значительным объемом литературных данных.

В то же время, как видно из рис. 3, при условии вязкого зарождения разрушения образцов Менаже и Шарпи наблюдается линейная зависимость между процентом волокна в изломе образцов при одинаковых температурах испытания в диапазоне от 100 % волокна до 50 % и от 100 % волокна до 20 %, соответственно.

На основании проведенных экспериментальных исследований, с привлечением дополнительных литературных данных для ряда сварных соединений, было сделано предположение о возможности описания такой связи следующей зависимостью:

$$F_U = 0,62F_V + 37,5. \quad (4)$$

Значения текущих работ разрушения образцов данных типов в общем виде могут быть выражены следующими зависимостями:

$$a_V = a_V^3 + a_V^p, \quad (5)$$

$$a_U = a_U^3 + a_U^p, \quad (6)$$

где a_V^3 и a_U^3 – текущие удельные работы зарождения разрушения образцов Шарпи и Менаже; a_V^p и a_U^p – удельные работы распространения в образцах при соответствующей температуре испытания.

Необходимо отметить, что рассматриваемые характеристики зависят от ряда параметров и меняются от температуры, что не позволяет выразить их в простой аналитической форме.

Вместе с тем, учитывая наличие линейной связи между процентом волокна в изломе и удельной работой разрушения образца Шарпи, зависимость (5) может быть заменена более простым выражением:

$$a_V = \left(a_V^{\max} - a_{V_{xp}} \right) F_V + a_{V_{xp}}, \quad (7)$$

где F_V – доля волокна в изломе.

Выражение (7), хотя и является чисто эмпирическим, имеет ряд важных достоинств, поскольку позволяет оценивать текущие значения ударной вязкости во всем температурном диапазоне вне зависимости от характера и вида разрушения.

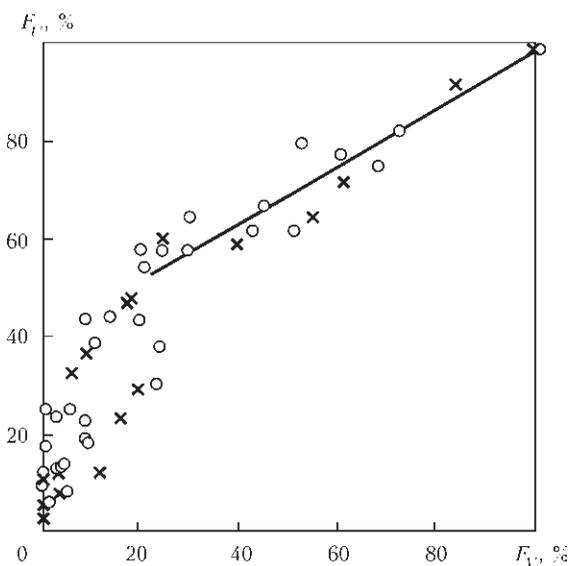


Рис. 3. Зависимость процента волокна в изломах образцов Менаже и Шарпи для сварных соединений, выполненных проволоками Св-08А, Св-10Г2, Св-08Г2С и Св-10ГСМТ под флюсом Ан-43

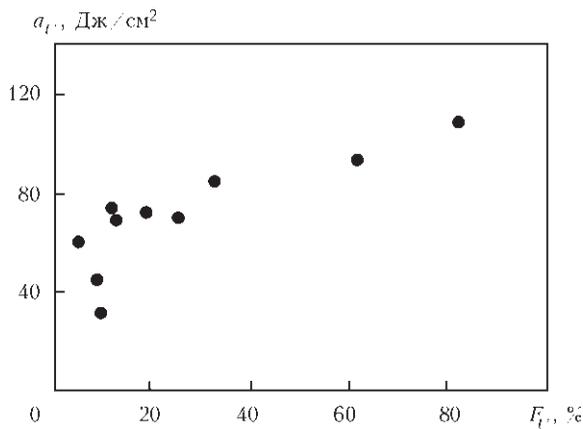


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от процентного содержания волокна в изломе образца Менаже для сварного соединения, выполненного проволокой Св-08А под флюсом Ан-43

Что касается текущей удельной работы разрушения образца Менаже, то, как показывают практические исследования изменения данной характеристики, в достаточно широком диапазоне температур наблюдается незначительное ее падение при изменении процента волокна в изломе (рис. 4).

Это связано с тем, что в данном диапазоне температур удельная работа зарождения вязкого разрушения в образце Менаже доминирует над работой распространения. Последнее не дает возможности описать такую связь простой линейной зависимостью во всем температурном диапазоне ввиду резкого «перелома» кривой при переходе к хрупкому зарождению разрушения для широкого класса материалов.

Вместе с тем, учитывая специфику производства ряда оборудования, где используются одинаковые марки сталей, такая задача вполне может быть решена. Для этих случаев по аналогии с (7) может быть получено выражение вида:

$$a_U = \left(a_U^{\max} - a_{U_{xp}} \right) \psi(F_U) + a_{U_{xp}}, \quad (8)$$

где $\psi(F_U)$ – функция доли волокна в изломе образца Менаже.

Такие выражения, с одной стороны, при их практическом использовании являются несколько ограниченными, поскольку в ряде случаев могут отсутствовать значения a_U^{\max} , $a_{U_{xp}}$.

The paper considers the possibility of transition from impact toughness norms determined on Mesnager samples (sample with a round notch) to similar norms on Charpy type samples (sample with a sharp notch) for low-alloyed and low-carbon structural materials in the transition temperature range. It is shown that application of the criterion of determination of critical brittleness temperature by fibre percentage in the fracture of Mesnager sample ($F_u \geq 50\%$) is more substantiated from the practical view point, as in this case, proceeding from the presented investigation results, elimination of the possibility of brittle initiation of Charpy sample fracture is implicitly implied. It is noted that application of this characteristic is primarily related to the fact that there is a linear dependence between specific work of fracture of Charpy sample and fibre percentage in the fracture of a Charpy sample at the same testing temperatures in the range from 100% of fibre to 50% and from 100% of fibre to 20%, respectively

Keywords: impact toughness, Charpy sample, Mesnager sample, brittle-ductile fracture, transition temperature range

Но, с другой стороны, появляется возможность определения связи в переходной области температур между текущими значениями ударной вязкости образцов Менаже и Шарпи:

$$\frac{a_U}{a_V} = \frac{\left(a_U^{\max} - a_{U_{xp}} \right) \psi(F_U) + a_{U_{xp}}}{\left(a_V^{\max} - a_{V_{xp}} \right) F_V + a_{V_{xp}}}. \quad (9)$$

Такой подход может быть использован, например, для уточнения требований к ударной вязкости к баллонам кислородного производства, поскольку при их производстве используется практически одна марка стали (ДС).

Выводы

Показано, что использование критерия определения критической температуры хрупкости по проценту волокна в изломе образца Менаже ($F_U \geq 50\%$), с практической точки зрения является более обоснованным, поскольку в данном случае, предполагается исключение возможности хрупкого зарождения разрушения образца Шарпи.

Показано, что между удельной работой разрушения образца Шарпи и процентом волокна в изломе существует линейная зависимость между процентом волокна в изломе образцов при одинаковых температурах испытания в диапазоне от 100 % волокна до 50 % и от 100 % волокна до 20 %, соответственно

Наличие данной линейной связи может быть использовано для сравнения значений ударной вязкости образцов в переходной области температур.

1. Шишкин В. Ю., Макурин В. А., Ефимов П. И. О форме надреза в ударных образцах и значениях ударной вязкости // Зав. лаборатория. – 1987. – № 3. – С. 71–74.
2. Баско Е. М. Влияние остроты надреза на ударную вязкость и критические температуры хрупкости строительных сталей // Там же. – 1989. – № 7. – С. 73–77.
3. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. – 2004. – № 4. – С. 24–29.
4. Дядин В. П. Особенности испытания ударных образцов Менаже и Шарпи при хрупком разрушении // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011 – № 4. – С. 44–47.

Поступила в редакцию
15.03.2014