

## ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ УДАРНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕНАЖЕ И ШАРПИ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ

В. П. ДЯДИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Выполнен краткий анализ основных преимуществ и недостатков стандартных ударных образцов с острым (Шарпи) и круглым надрезами (Менаже). Показано, что для случая их хрупкого разрушения между данными образцами существует устойчивая связь, которая в ряде случаев может быть использована при диагностировании ответственных конструкций для оценки дефектов с позиций механики разрушения.*

*Brief analysis of the main advantages and disadvantages of standard impact samples with sharp (Charpy) and round (Mesnager) notches was performed. It is shown that for the case of their brittle fracture there exists a stable connection between these samples, which in a number of cases can be used at diagnostics of critical structures for assessment of defects in terms of fracture mechanics*

Определение ударной вязкости на стандартных образцах Менаже в странах СНГ применяется до сих пор несмотря на то, что практически во всем мире используется образец Шарпи. При этом основной довод в пользу образца Менаже сводится к тому, что данный радиус закругления (1,0 мм) позволяет более полно охватить исследуемую зону сварного соединения или основного металла. Это дает возможность оценить среднюю интегральную характеристику вязкости сварного соединения при проведении меньшего количества испытаний по сравнению с образцами Шарпи, которые из-за малого радиуса закругления в вершине надреза (0,25 мм) не могут охватить всю исследуемую область.

Вместе с тем отсутствие максимальных областей стеснения материала перед надрезом образца Менаже не позволяет воссоздать реальную картину распределения напряжений в процессе разрушения, присущих трещиноподобному дефекту, которые типичны для сварных конструкций. В этой связи определяемая температура вязко-хрупкого перехода на данном типе образца сдвигается в область более низких температур, что не соответствует реальной картине разрушения сварных элементов.

Из отечественной и зарубежной практики хорошо известно, что предъявляемые требования к величине ударной вязкости образца Шарпи достаточно хорошо согласуются с сопротивлением конструкционных сталей и их соединений возможному росту несплошностей типа трещин, которые контролируются с помощью различных критериев механики разрушения. Иными словами, значения ударной вязкости образца Шарпи характеризуют косвенным образом сопротивление конструкционных материалов и их соединений возможному росту дефектов (трещиностойкость).

Установление возможной связи между данными типами образцов при различных видах разрушения — вязком, квазихрупком и хрупком — позволило бы значительно расширить использование подходов механики разрушения при диагностике сварных конструкций и оценке их дальнейшей работоспособности с учетом выявляемых несплошностей неразрушающими методами контроля.

Случай вязкого разрушения был рассмотрен в работе [1]. В данной статье рассматривается вариант хрупкого разрушения стандартных образцов Менаже и Шарпи.

В отличие от вязкого разрушения, когда в вершине надреза образца достигаются критические значения деформаций  $\epsilon_f$ , хрупкое разрушение возникает при условии достижения локальными растягивающими напряжениями некоторой критической величины, равной сопротивлению микросколу материала  $R_{mc}$  или его макроскопическому эквиваленту — сопротивлению отрыва  $R_\sigma$  [2–5].

Таким образом, условие хрупкого разрушения образца сводится к обеспечению за счет объемности напряженного состояния вблизи надреза деформационного упрочнения и динамического нагружения такой степени перенапряжения, которая позволяет реализовать условие  $\sigma_{\max} \approx R_{mc}$ , где  $\sigma_{\max}$  — максимальные локальные напряжения в образце.

Распределение локальных напряжений на некотором расстоянии от вершины надреза в зависимости от угла прогиба стандартного образца может быть получено с учетом результатов работ [1, 6].

В этом случае связь между углом изгиба образца и величиной локальных напряжений и пластических деформаций при условии степенного закона упрочнения материала описывается выражением:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \frac{\epsilon}{\epsilon_{0,2}} = \frac{K^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho} x\right)} \left(\frac{\theta}{3 \epsilon_{0,2}}\right)^{1+n}, \quad (1)$$



где  $\varepsilon$  — локальная пластическая деформация на расстоянии  $x$  от вершины надреза ударного образца;  $\varepsilon_{0,2}$  — пластическая деформация, соответствующая пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  материала;  $\rho$  — радиус надреза;  $n$  — величина деформационного упрочнения материала;  $K$  — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза радиуса  $\rho$  стандартного ударного образца;  $\theta$  — угол прогиба образца.

Учитывая, что перед возникновением общей текучести вблизи вершины надреза образца возникает область объемного напряженного состояния [1, 7] зависимость (1) в этом случае может быть записана в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0,2}} = \left(1 + \ln\left(1 + \frac{x}{\rho}\right)\right) \frac{K^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho}x\right)} \left(\frac{\theta}{3\varepsilon_{0,2}}\right)^{1+n} \quad (2)$$

Поскольку стеснение в образце Шарпи определяется углом надреза [1,8], максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{\max}$ , при которых реализуется хрупкое разрушение данного типа образца, можно описать зависимостью:

$$\frac{R_{mc}}{\sigma_{0,2}} \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{0,2}} = 2,18 \frac{K_1^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_1}x_1\right)} \left(\frac{\theta_{1k}}{3\varepsilon_{0,2}}\right)^{1+n} \quad (3)$$

где  $\rho_1 = 0,25$  мм — радиус в вершине надреза стандартного ударного образца Шарпи;  $K_1$  — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза стандартного ударного образца Шарпи, равный 3,44;  $\theta_{1k}$  — критический угол прогиба образца Шарпи;  $\varepsilon_f$  — критическая локальная пластическая деформация на расстоянии  $x_1$  от вершины надреза образца;  $x_1$  — расстояние от вершины надреза до точки максимального стеснения образца, которое может быть определено из зависимости [7]:

$$2,18 = 1 + \ln\left(1 + \frac{x_1}{\rho_1}\right) \quad (4)$$

Необходимо отметить, что стеснение образца может реализовываться только в зоне концентрации напряжений, поэтому корректность зависимости (3) достигается при выполнении условия:

$$\frac{K_1^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_1}x_1\right)} \geq 1 \quad (5)$$

Как видно из выражения (4), это условие для образца Шарпи полностью выполняется.

Что касается определения максимальных растягивающих напряжений, которые могут быть достигнуты в образце Менаже, то здесь необходимо отметить следующее. Поскольку теоретически возможное стеснение в образцах с трещи-

ной в соответствии с критерием текучести Треска равно 2,57 [8], можем записать:

$$2,57 = 1 + \ln\left(1 + \frac{x_2}{\rho_2}\right) \quad (6)$$

Расстояние от вершины надреза образца Менаже в этом случае должно быть равно  $x_2 = 3,8$  мм, что в пределах точности используемых зависимостей невозможно из-за нарушения условия:

$$\frac{K_2^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_2}x_2\right)} \geq 1 \quad (7)$$

где  $K_2$  — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза стандартного ударного образца Менаже, равный 2,1;  $\rho_2 = 1,0$  мм — радиус в вершине надреза стандартного ударного образца Менаже;  $x_2$  — расстояние от вершины надреза до точки максимального стеснения образца.

Таким образом, максимальные растягивающие локальные напряжения, при которых может реализоваться условие хрупкого разрушения образца Менаже, должны определяться следующими выражениями:

$$\frac{R_{mc}}{\sigma_{0,2}} \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{0,2}} = \left(1 + \ln\left(1 + \frac{x_2}{\rho_2}\right)\right) \frac{K_2^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_2}x_2\right)} \left(\frac{\theta_{2k}}{3\varepsilon_{0,2}}\right)^{1+n} \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{K_2^2 - 1}{2} \rho_2 \approx 0,85 \text{ мм} \quad (9)$$

где  $\theta_{2k}$  — критический угол прогиба образца Менаже.

Рассмотренные выражения позволяют количественно оценить различие в максимальных стеснениях, возникающих в образцах рассматриваемых типов: для образца Менаже  $\sigma_{\max}/\sigma_{0,2} \approx 1,61$ ; для образца Шарпи  $\sigma_{\max}/\sigma_{0,2} \approx 2,18$ .

Пренебрегая некоторыми изменениями величины  $R_{mc}$  в зависимости от предшествующей разрушению величины пластической деформации, нетрудно сопоставить критические углы прогибов образцов Менаже и Шарпи в температурной области, где в обоих типах образцов реализуется квазихрупкое разрушение (зарождение хрупкой трещины при напряжениях, близких к пределу общей текучести).

В этом случае, сопоставляя зависимости (3) и (8), получаем:

$$\frac{\theta_{2k}}{\theta_{1k}} \approx (1,58)^{1/(1+n)} \quad (10)$$

Учитывая зависимость (10) и данные работы [1], соотношение между удельными работами за-



рождения хрупкого разрушения образцов Менаже и Шарпи можно выразить зависимостью:

$$\frac{KCU^{(3)}}{KCV^{(3)}} = \frac{k_3}{k_1} \left( \frac{\theta_{2k}}{\theta_{1k}} \right)^{1+n} \approx 1,55, \quad (11)$$

где  $k_1$  — коэффициент стеснения для образца Шарпи, равный 1,25 [9];  $k_3$  — коэффициент стеснения для образца Менаже, равный 1,225 [9];  $KCU^{(3)}$  — удельная работа зарождения хрупкого разрушения образца Менаже;  $KCV^{(3)}$  — удельная работа зарождения хрупкого разрушения образца Шарпи.

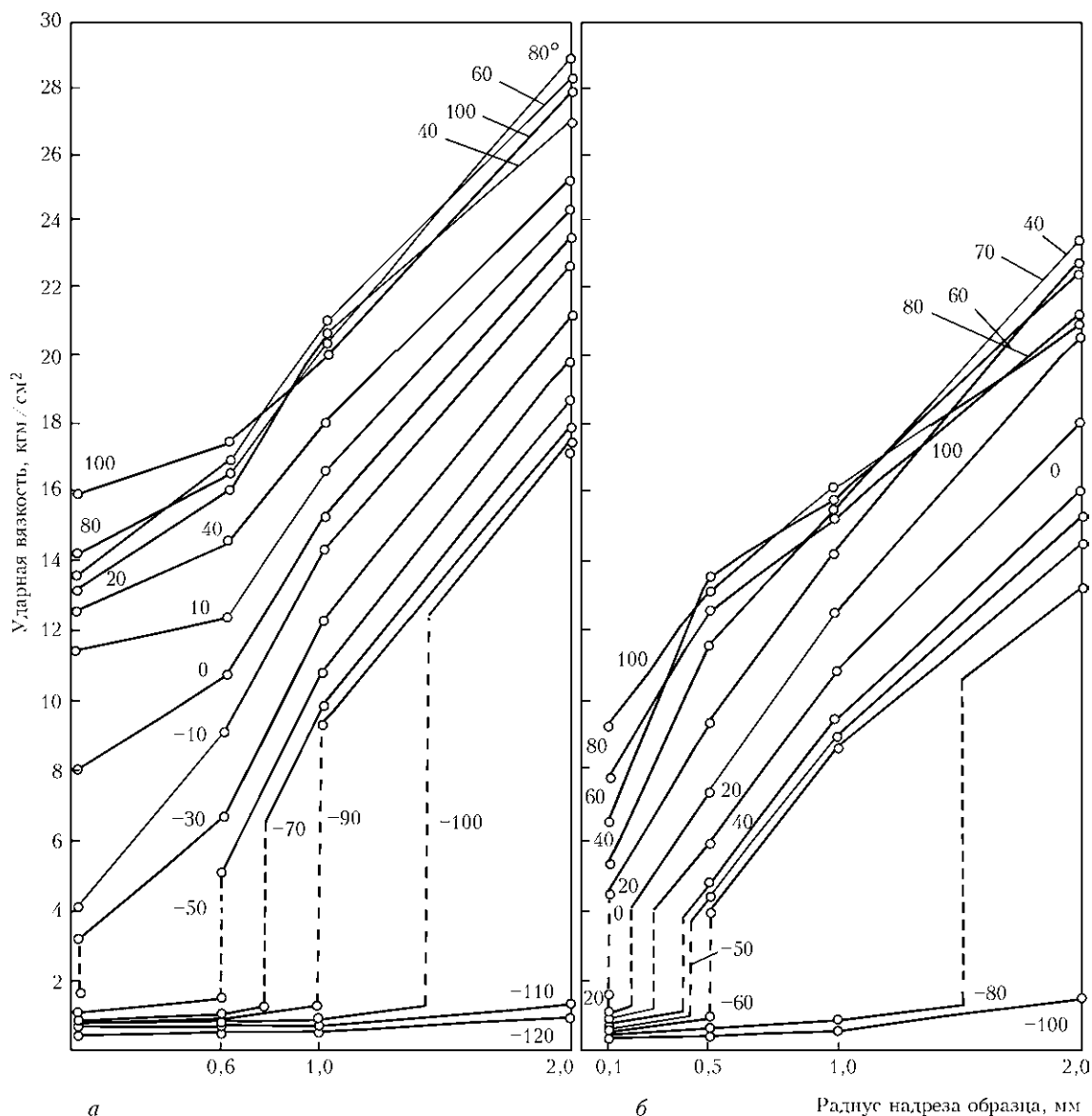
В то же время работа распространения при условии хрупкого разрушения практически равна нулю. Отношение полных удельных работ в этом

случае будет полностью совпадать с правой частью выражения (11):

$$\frac{KCU}{KCV} \approx 1,55. \quad (12)$$

Полученный результат, на первый взгляд, является несколько неожиданным, поскольку практически совпадает со случаем вязкого разрушения ударных образцов этих типов. Однако, как показывают результаты, приведенные в работе [10], данный вывод вполне закономерен и является аналитическим подтверждением факта существования линейной связи между этими характеристиками при условии хрупкого разрушения ударных образцов (рисунок).

Важно также отметить, что полученный результат для основной массы строительных конструк-



Зависимость ударной вязкости конструкционных сталей от радиуса надреза образца и температуры испытания [10]: а — для стали 15ГС; б — 15ХФ

ций представляет лишь теоретический интерес. Это связано с тем, что температура хрупкого перехода для образца Менаже значительно ниже, чем для образца с острым надрезом, что видно из рисунка.

### Выводы

Получена аналитическая оценка соотношения удельных работ зарождения разрушения образцов Шарпи и Менаже для случая хрупкого разрушения.

Получен переходной коэффициент, позволяющий в первом приближении связать значения ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже для случая хрупкого разрушения.

Отмечены температурные особенности перехода образцов Менаже в хрупкую область по сравнению с ударными испытаниями образцов Шарпи.

1. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 24–29.

2. Нотт Дж. Основы механики разрушения. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
3. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1950. — 255 с.
4. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. — Л.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
5. Мешков Ю. А., Пахаренко Г. А. Структура металла и хрупкость стальных изделий. — Киев: Наук. думка, 1975. — 268 с.
6. Гуренко В. С. Расширение областей применения механики разрушения при оценке трещиностойкости элементов сварных конструкций в условиях статического нагружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ. — Киев, 1997. — 35 с.
7. Ritchie R. O., Knott J. F., Rice J. R. On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel / J. of the mechanics and physics of solids. — 1973. — 21, № 6. — P. 365 — 410.
8. Tetelman A. S., McEvily A. J. Fracture of Structural materials. — New-York, 1967.
9. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. — М.: Машиностроение, — 1956. — С. 324.
10. Владимирский Т. А. К вопросу о разложении ударной вязкости на ее составляющие // Завод. лаб. — 1969. — № 5. — С. 612–615.

Поступила в редакцию  
22.06.2011

## ПОРТАТИВНЫЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ «МАГЭКС»

Намагничивающие устройства «МАГЭКС», разработанные Институтом электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, предназначены для намагничивания изделий при магнитопорошковом контроле конструкций из ферромагнитных материалов и их сварных соединений, а также для получения поля подмагничивания при феррозондовом контроле. Портативные устройства «МАГЭКС» просты, надежны, удобны в полевых условиях, при проведении высотных монтажных работ, при контроле качества внутренней поверхности емкостей, трубопроводов и т.п., особенно в случае повышенных требований электро- и взрывобезопасности.

Область применения намагничивающих устройств «МАГЭКС»: машиностроительный комплекс, судостроение, авиационный, железнодорожный и автомобильный транспорт, предприятия химической, газовой, нефтеперерабатывающей промышленности и энергетики.

Комплекты «МАГЭКС» обеспечивают высокую выявляемость поверхностных и подповерхностных (на глубине до 2 мм) несплошностей всех видов (уровень чувствительности А по ГОСТ 21105–87). Выпускаются в двух модификациях.

«МАГЭКС-1П» предназначен для контроля качества деталей сложной формы, например, крюков подъемных кранов, угловых сварных соединений и труднодоступных зон конструкций. Выполнено в виде двух цилиндрических разнополюсных магнитных полюсов, соединенных гибким магнитопроводом.

«МАГЭКС-2П» предназначен для контроля качества протяженных сварных соединений листовых конструкций, резервуаров, трубопроводов и пр. Намагничивающее устройство передвижное, конструктивно выполнено в виде разнополюсной колесной пары с общей ферромагнитной осью, что значительно увеличивает производительность контроля.

При несколько кратном прокатывании по поверхности детали появляется дополнительная переменная тангенциальная составляющая магнитного поля рассеяния, что повышает выявляемость дефектов.

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины  
e-mail: office@paton.kiev.ua

