

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В ОБРАЗЦЕ ШАРПИ

И. В. МИРЗОВ

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

Предлагаемая модель учитывает изменение предела текучести поперек сварного соединения на основе распределения твердости по Виккерсу. Свойства основного металла (модуль Юнга, предел текучести, кривая деформационного упрочнения) получены в ходе эксперимента по растяжению гладких цилиндрических образцов из стали 10Г2ФБ. Разработанная модель включает критерий вязкого разрушения, связывающий критические деформации с жесткостью напряженного состояния. Корректность модели вязкого разрушения материала проверена путем сравнения диаграммы растяжения гладкого образца в реальном опыте с результатами численного расчета. Получена расчетная зависимость энергозатрат в испытаниях по разрушению образца Шарпи от ширины разупрочненной зоны в диапазоне от 0,5 до 6,0 мм. Проведенные расчеты показывают, что меньшие значения ударной вязкости соответствуют сварным соединениям с меньшей шириной зоны соединения. Установлено, что вариация ширины зоны соединения влияет на величину критического прогиба: чем уже зона соединения, тем при меньшем прогибе инициируется разрушение. Модель может быть использована для изучения напряженно-деформированного состояния сварных соединений, полученных контактной сваркой оплавлением. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, вязкое разрушение, образец Шарпи, сварное соединение, контактная сварка оплавлением, анизотропия

В соответствии с общепринятой мировой практикой к ответственным сварным соединениям независимо от способа сварки предъявляются требования по вязкости разрушения, определяемой в ходе испытаний стандартных ударных образцов.

Разрушение происходит в результате иницирования и роста дефектов в материале. При разрушении бездефектной среды тратится намного больше энергии, чем при развитии уже существующих дефектов. Тщательные исследования структуры соединений, полученных контактной сваркой оплавлением (КСО), показывают, что материал сварного соединения не содержит явных несплошностей, которые можно идентифицировать как дефекты. Этот факт дает повод ожидать высокие значения ударной вязкости и опыты по разрушению сварных образцов без надреза такие ожидания оправдывают: образец не разрушается, а лишь претерпевает сильные пластические деформации [1]. Однако сварные образцы с V-образным надрезом стабильно показывают низкие значения ударной вязкости.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели вязкого разрушения

стандартного образца Шарпи с V-образным надрезом и изучение влияния анизотропии механических свойств в сварном соединении на разрушение образца.

**Методика эксперимента.** Геометрия образцов Шарпи и эксперимент описаны в работе [2]. В данной работе использован тип образцов № 11 — стандартный образец Шарпи с V-образным надрезом.

**Механические свойства материала.** В основу компьютерной модели заложены механические свойства трубной стали 10Г2ФБ, полученные в ходе эксперимента по растяжению гладких образцов Ми12 тип 2 вдоль проката (рис. 1, таблица). Испытания проводили на машине MTS 318.25, программный модуль которой дает возможность получить диаграмму растяжения на всем диапазоне деформаций вплоть до разрушения. Все эксперименты проводили при нормальных условиях ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

В таблице  $E$  — модуль упругости;  $\sigma_T$  — предел текучести;  $\varepsilon_T$  — деформации, соответствующие  $\sigma_T$ ;  $\sigma_B$  — временное сопротивление;  $\varepsilon_B$  — деформации, соответствующие  $\sigma_B$ ;  $(\sigma_B)_{\text{ном}}$  — номинальное временное сопротивление;  $(\varepsilon_B)_{\text{ном}}$  — деформации,

**Механические свойства трубной стали 10Г2ФБ (образцы Ми12 тип 2, вдоль проката)**

Образец	$E$ , ГПа	$\sigma_T$ , МПа	$\varepsilon_T$	$(\sigma_B)_{\text{ном}}$ , МПа	$(\varepsilon_B)_{\text{ном}}$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\varepsilon_B$	$\delta$ , %	$\Psi$	$F$ , мм <sup>2</sup>
1	223	562	$2,52 \cdot 10^{-3}$	668	9,15	729	0,088	19,9	0,75	7,08
2	229	565	$2,47 \cdot 10^{-3}$	Брак	Брак	Брак	Брак	Брак	Брак	8,46
3	Брак	Брак	Брак	651	9,83	715	0,094	21,0	0,74	7,46
4	205	537	$2,62 \cdot 10^{-3}$	647	10,89	717	0,103	23,6	0,77	6,55
Средние значения	219	555	$2,54 \cdot 10^{-3}$	655	9,96	720	0,095	21,5	0,75	7,39

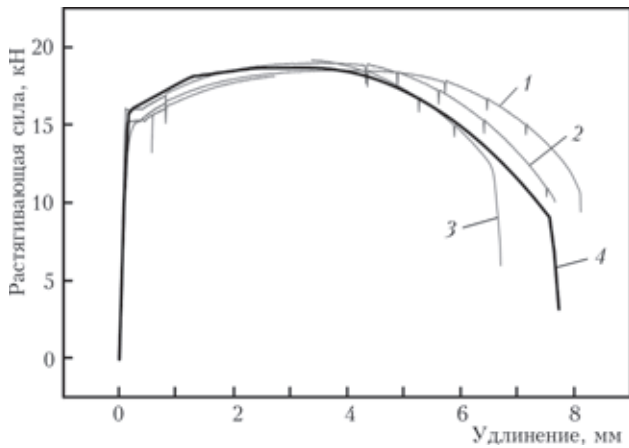


Рис. 1. Диаграммы растяжения гладких образцов Ми12 тип 2 (кривые 1–3 – экспериментальные; 4 – проверочная расчетная)

соответствующие  $(\sigma_{в})_{ном}$ ;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\psi$  – относительное сужение;  $F$  – площадь поперечного сечения шейки после отрыва.

Для линейных участков экспериментальных кривых на рис. 1 и участков деформационного упрочнения получили такие значения механических характеристик материала:

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon) &= E\varepsilon, \sigma \leq \sigma_{\tau}; E = 219 \text{ ГПа}, \sigma_{\tau} = 555 \text{ МПа}, \\ \sigma(\varepsilon) &= A\varepsilon^n, \sigma_{\tau} \leq \sigma \leq \sigma_{в}; A = 853 \text{ МПа}, \\ n &= 0,072, \sigma_{в} = 720 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где  $A, n$  – параметры деформационного упрочнения.

Зависимость механических свойств материала от скорости деформаций  $d\varepsilon/dt = \dot{\varepsilon}$  в численной модели не описана, т. е.  $\frac{\partial \sigma_{\tau}}{\partial \dot{\varepsilon}} = 0, \frac{\partial \sigma_{в}}{\partial \dot{\varepsilon}} = 0$ .

Модель учитывает инерционные силы.

**Критерий вязкого разрушения.** В работе [3] рассматривается зависимость критических деформаций от жесткости напряженного состояния (трехосности)  $j$ :

$$\begin{aligned} j &= -\frac{p}{\sigma_i}, p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \\ \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Утверждается, что при  $j \geq 0,33$  разрушение носит характер нормального отрыва. В работе [4] средняя интенсивность деформаций  $\varepsilon_i$  в шейке гладкого образца в момент инициирования вязкой трещины выражается зависимостью

$$\varepsilon_i = \frac{1}{j} \left( \frac{1}{3} + \ln \left\{ 1 + 0,46 \left[ \ln \frac{F_0}{F} - 0,1 \right] \right\} \right) \ln \frac{F_0}{F}, \quad (2)$$

где  $F_0$  – начальная площадь сечения образца ( $F_0 = \frac{\pi D^2}{4} = 28,3 \text{ мм}^2$ ). Сложность в определении площади сечения шейки  $F$  связана с ее эллиптичностью, так как образцы изготовлены из прокатной

стали. Значения  $F$  были получены в ходе эксперимента по разрыву гладких образцов (таблица).

Таким образом, была найдена связь жесткости напряженного состояния  $j$  с интенсивностью критических деформаций  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{1,05}{j}. \quad (3)$$

Зависимость (3) носит характер обратной пропорциональности и показана на рис. 2 (кривая 1). Точка  $Z$  соответствует значению критических деформаций, усредненных по образцам рис. 1. Кривая 2 – расчетная.

Кривая 2 на рис. 2 и кривая 4 на рис. 1 – это результат расчета растяжения гладкого образца в численной модели, созданной для проверки полученного критерия вязкого разрушения (3). Результат такой проверки свидетельствует о возможности применения критерия (3) для моделирования вязкого разрушения, в том числе стандартного образца Шарпи, полученного КСО.

**Анизотропия механических свойств в сварном соединении.** Изучение структуры сварного соединения КСО обнаружило узкий участок с низким пределом текучести в центральной области [5–10] (рис. 3). Предполагается, что низкая ударная вязкость обуславливается «запиранием» развивающейся в этой области пластической зоны между соседними зонами термомеханического упрочнения (ЗТМУ) [6].

В сварном шве КСО можно выделить несколько характерных участков, отличающихся структурой металла: это плоскость соединения, которая при рассмотрении шлифов часто видна как линия, участок крупного зерна, участок нормализации и участок отпуска [5].

Механические свойства материала при удалении от линии сплавления непрерывно меняются. Основываясь на распределении микротвердости по Виккерсу поперек сварного соединения (рис. 3) можно получить значения предела текуче-

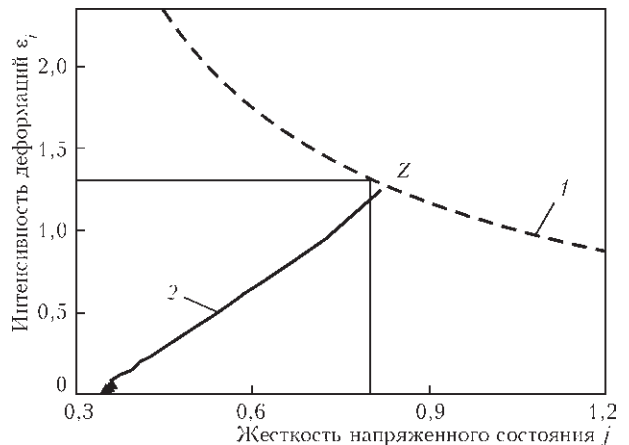


Рис. 2. Связь интенсивности деформаций с жесткостью напряженного состояния: 1 – предельное состояние; 2 – расчетная кривая

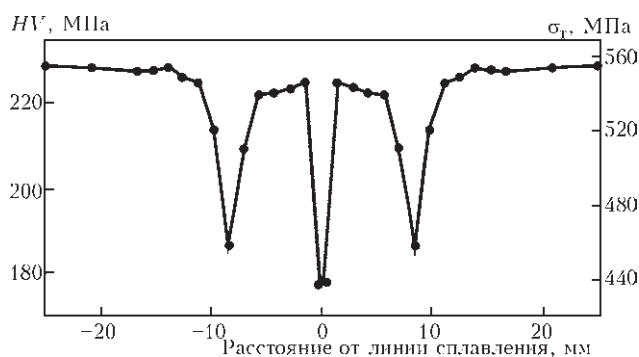


Рис. 3. Распределение микротвердости по Виккерсу и предела текучести поперек сварного соединения

сти в различных сечениях моделируемого образца Шарпи. Согласно данным работы [11] предел текучести связан с микротвердостью по Виккерсу линейно. Для стали 10Г2ФБ  $\sigma_T \approx 2,45 HV$ .

В плоскости соединения обнаруживается значительное падение предела текучести (рис. 3), участок которого можно назвать зоной соединения (ЗС). При разрушении образца Шарпи пластическая область локализуется в ЗС, чем и обусловлено снижение значений ударной вязкости у сварных образцов, полученных КСО.

**Результаты.** Были проведены расчеты вязкого разрушения стандартного образца Шарпи для нескольких значений ширины ЗС. Величина энергии разрушения и критические прогибы образца приведены на рис. 4, 5.

Связь полной энергии разрушения сварного образца Шарпи с шириной ЗС нелинейна и тем меньше, чем меньше ширина ЗС (рис. 4).

В работе [12] прогиб образца Шарпи в момент инициирования трещины – критический прогиб – используют как характеристическую величину для сравнения напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов. Расчеты показали, что чем уже ЗС, тем при меньшем прогибе инициируется разрушение (рис. 5).

Корректность разработанной модели вязкого разрушения образца Шарпи была проверена

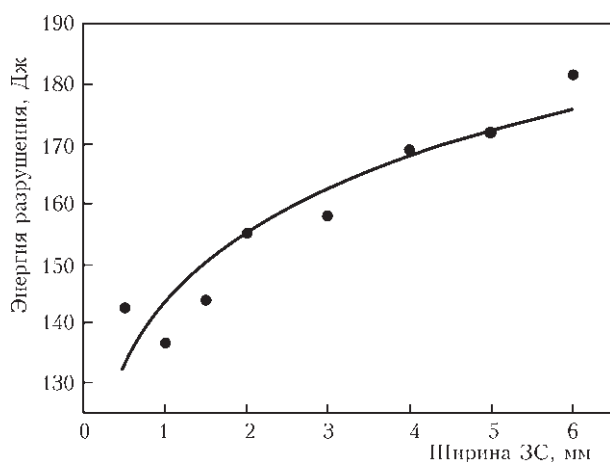


Рис. 4. Расчетная зависимость энергии разрушения сварного образца Шарпи от ширины зоны соединения

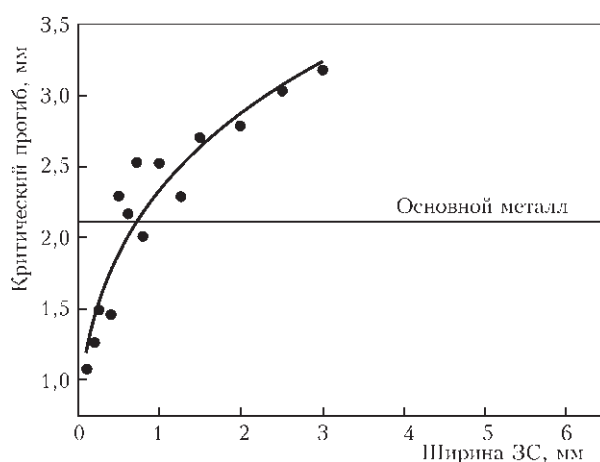


Рис. 5. Результаты расчетов критического прогиба сварного образца Шарпи при вариации ширины ЗС

на образцах, изготовленных из основного металла: и эксперимент, и расчетная модель показывают значения энергии разрушения на уровне 294...300 Дж.

### Выводы

На основании полученных экспериментальных данных определены механические свойства основного металла стали 10Г2ФБ и коэффициент в выражении (3), описывающий связь критических деформаций с жесткостью напряженного состояния.

Предлагаемая модель вязкого разрушения образца Шарпи учитывает изменение предела текучести материала вдоль образца, основанное на распределении твердости в сварном соединении КСО. Модель включает критерий вязкого разрушения и позволяет отследить инициирование и рост трещины во времени, т. е. получить динамическую картину НДС при вязком разрушении образца. Численная модель экспериментально верифицирована на гладких образцах и образцах Шарпи, изготовленных из основного металла стали 10Г2ФБ.

Получена расчетная зависимость энергозатрат в ударных испытаниях от ширины разупрочненной ЗС в диапазоне от 0,5 до 6,0 мм. Проведенные расчеты показывают, что меньшие значения ударной вязкости соответствуют сварным соединениям с меньшей шириной ЗС (рис. 4).

Установлено, что вариация ширины ЗС влияет на величину критического прогиба: чем уже ЗС, тем при меньшем прогибе инициируется разрушение (рис. 5).

Разработанная модель может быть использована для изучения НДС образцов Шарпи, изготовленных из сварных соединений КСО.

1. К методологии контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян,





- Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 3–9.
2. *ГОСТ 9454–78*. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 01.01.1979
  3. *Teng X., Wierzbicki T.* Numerical simulation of the Taylor test with fracture // Impact & Crashworthiness Lab, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
  4. *Копельман Л. А.* Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978 – 232 с.
  5. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением / Отв. ред. В. К. Лебедев. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
  6. *Особенности испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов и др.* // Автомат. сварка. – 2008. – № 10. – С. 5–11.
  7. *Lobanov L.* Welded Structures. Taylor & Francis, 1997. – 300 p.
  8. *INNOTRACK* Integrated Project no. TIP5-CT-2006-031415. D4.6.1 – The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails. – 2008/11/07.
  9. *Tatsumi K., Mineyasu T., Minoru H.* Development of SP3 Rail with High Wear Resistance and Rolling Contact Fatigue Resistance for Heavy Haul Railways. JFE TECHNICAL REPORT No. 16 (Mar. 2011).
  10. *Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach / K. Saita, K. Karimine, M. Ueda et al.* // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. – 2013. – № 12. P. 84–92.
  11. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
  12. *Siewert T. A.* Pendulum impact machines: procedures and specimens for verification // ASTM International. – 1995. – 298 p.

Proposed model allows for the change of yield point across the welded joint based on Vickers hardness distribution. Base metal properties (Young's modulus, yield point, deformation strengthening curve) were determined during the experiment on stretching smooth cylindrical samples from 10G2FB steel. Developed model includes tough fracture criterion, correlating critical deformations with stressed state stiffness. Correctness of the model of tough fracture of material was verified by comparison of the diagram of smooth sample stretching in a real experiment with the results of numerical computation. Calculated dependence of energy input in rupture testing of Charpy sample on softened zone width in the range from 0.5 up to 6.0 mm was derived. Presented calculations show that impact toughness values correspond to welded joints with narrower joint zone. It is established that variation of joint zone width affects the extent of critical sagging: the narrower the joint zone the smaller the sagging at which fracture is initiated. The model can be used to study the stress-strain state of welded joints produced by resistance welding. 12 References, 1 Table, 5 Figures.

*Keywords* : computer modeling, tough fracture, Charpy sample, welded joints, flash-butt welding, anisotropy

Поступила в редакцию  
31.01.2014



**7.04 – 10.04 2015 г.**  
Место проведения: Беларусь, Минск,  
проспект Победителей, 20/2  
Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

### Направления экспозиций

- ▶ Материалы для сварки, наплавки и пайки
- ▶ Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- ▶ Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- ▶ Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- ▶ Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- ▶ Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- ▶ Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- ▶ Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- ▶ Научное и информационное обеспечение сварки
- ▶ Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- ▶ Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- ▶ Сертификация сварочного оборудования.

Выставка проводится одновременно  
с международными специализированными выставками «Металлообработка»,  
«Порошковая металлургия» и международным специализированным салоном  
«Защита от коррозии. Покрyтия».

Руководитель проекта: Федорова Елена Владимировна  
тел.: +375 17 226 98 58, 226 90 83 факс: +375 17 226 98 58, 226 99 36; e-mail: e\_fedorova@solo.by