



## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ОБРАЗЦА ШАРПИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ

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

Предложен подход к оценке ударной вязкости образца Шарпи на верхнем шельфе в зависимости от степени предварительного пластического деформирования металлопроката. Выполнен анализ полученных аналитических зависимостей и определены основные параметры, характеризующие их изменения. Предложена простая инженерная зависимость, позволяющая оценить изменение ударной вязкости образца Шарпи на верхнем шельфе в зависимости от степени пластического деформирования при изготовлении и монтаже элементов металлоконструкций.

*Ключевые слова:* сварное соединение, ударная вязкость, образцы Шарпи, вязкое разрушение, деформационное старение, верхний шельф, пластическая деформация

При аналитическом подтверждении устойчивой связи между значениями ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже на верхнем шельфе [1] критический угол изгиба образца Шарпи  $\theta_{1к}$  в момент зарождения разрушения оценивали через деформацию  $\varepsilon_f$ , соответствующую потере пластической устойчивости материала  $\varepsilon_B$ :

$$\varepsilon_B = n/(1 - n), \quad (1)$$

где  $n$  — деформационное упрочнение материала.

Как было отмечено в работах [1, 2], угол изгиба  $\theta_{1к}$  образца Шарпи в этом случае можно выразить зависимостью

$$\theta_{1к} = 3\varepsilon_B((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{1/(1+n)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — радиус надреза ( $\rho = 0,25$  мм);  $r$  — расстояние от вершины надреза, соизмеримое с характерным средним размером структурного элемента ( $r = 0,05...0,1$  мм);  $K_v$  — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза образца Шарпи ( $K_v = 3,44$ ) [3];  $\varepsilon_B$  — деформация, соответствующая условному временному сопротивлению материала  $\sigma_B$ .

При принятом допущении было показано хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими результатами.

В данной статье рассматривается возможность оценки относительного изменения ударной вязкости разрушения образца Шарпи в зависимости от степени предварительного пластического деформирования металлопроката. В случае решения этой задачи появляется практическая возможность скорректировать требования к ударной вязкости с учетом ее возможного снижения в зависимости

от прогнозируемого пластического деформирования элемента конструкции, что позволит расширить практическое применение критериев механики разрушения [4] при проектировании и расчете конструкций на прочность и более обоснованно подойти к выбору конструкционных материалов в случае появления пластических деформаций.

Так, например, это может быть полезным при оценке трещиностойкости материала локализованных повреждений магистральных трубопроводов, подвергающихся пластическим деформациям в процессе монтажа, в случаях подвижки грунтов, температурных воздействий и т. д. [5].

Исходя из соотношений (1), (2), работ [1, 2] и задавая истинную кривую деформирования материала степенным законом упрочнения

$$\sigma = \sigma_{0,2}(\varepsilon/\varepsilon_T)^n, \quad (3)$$

удельную работу распространения  $a_v^p$  трещины и зарождения разрушения  $a_v^3$  образца Шарпи при статическом нагружении можно записать в виде

$$a_v^p = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{n/(1+n)}(B - L) \times k_2(\sigma_B(1 + \varepsilon_B))^2 \varepsilon_B / (4\sigma_{0,2}), \quad (4)$$

$$a_v^3 = ((1 + 4r/\rho^3)/K_v^2)(B - L) \times 3k_1(\sigma_B \varepsilon_B(1 + \varepsilon_B)) / (4(1 + n)), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_T$  — деформация, при которой определяется соответствующий условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  материала;  $k_1$  — коэффициент стеснения для образца Шарпи, равный 1,25 [3];  $k_2$  — средний коэффициент стеснения для стандартного образца Шарпи в момент развития разрушения, равный 1,26;  $(B - L)$  — высота образца под надрезом, равная 8 мм [1].



Полная работа разрушения образца Шарпи ( $a_v = a_v^p + a_v^3$ ) в этом случае может быть представлена в виде

$$a_v = \frac{1 + 4r/\rho_v}{K_v^2} (B - L) \sigma_B \varepsilon_B (1 + \varepsilon_B) [k_2 \sigma_B (1 + \varepsilon_B) \times ((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{-1/(1+n^*)} / (4\sigma_{0,2}^{(\varepsilon)} + 3k_1 / (4(1+n^*)))]. \quad (6)$$

Для учета влияния пластических деформаций на изменение работы разрушения образца Шарпи рассмотрим образец, изготовленный из того же материала, но предварительно деформированный на величину  $\varepsilon$  в направлении его длины.

Если пренебречь деформационным старением материала, то исходя из условной кривой деформирования (рис. 1), удельная работа распространения  $a_v^{p(\varepsilon)}$  и зарождения разрушения  $a_v^{3(\varepsilon)}$  образца Шарпи в этом случае могут быть описаны аналогичными зависимостями:

$$a_v^{p(\varepsilon)} = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{n^*/(1+n^*)} (B - L) k_2 \times \sigma_B^{(\varepsilon)} (1 + \varepsilon_B^{(\varepsilon)})^2 \varepsilon_B^{(\varepsilon)} / (4\sigma_{0,2}^{(\varepsilon)}), \quad (7)$$

$$a_v^{3(\varepsilon)} = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2) (B - L) 3k_1 \sigma_B^{(\varepsilon)} \varepsilon_B^{(\varepsilon)} \times (1 + \varepsilon_B^{(\varepsilon)}) / (4(1 + n^*)), \quad (8)$$

где  $\varepsilon_B^{(\varepsilon)} = \varepsilon_B - \varepsilon$ ;  $n^* = \varepsilon_B^{(\varepsilon)} / (1 + \varepsilon_B^{(\varepsilon)})$ ;  $\varepsilon_T^{(\varepsilon)}$  — деформация, при которой определяется соответствующий предел текучести  $\sigma_{0,2}^{(\varepsilon)}$ ;  $\varepsilon_B^{(\varepsilon)}$  — деформация, соответствующая условному временному сопротивлению  $\sigma_B^{(\varepsilon)}$ .

Соответственно общая работа разрушения  $a_v^{(\varepsilon)}$ :

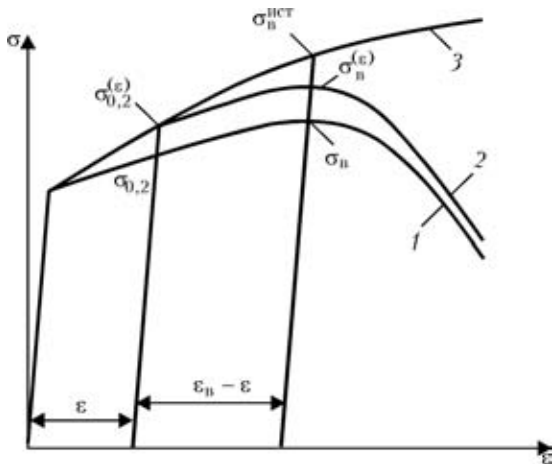


Рис. 1. Условные (1, 2) и истинная (3) диаграммы растяжения в случае предварительного деформирования заготовки на величину  $\varepsilon$

$$a_v^{(\varepsilon)} = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2) (B - L) \sigma_B^{(\varepsilon)} \varepsilon_B^{(\varepsilon)} \times (1 + \varepsilon_B^{(\varepsilon)}) [k_2 \sigma_B^{(\varepsilon)} (1 + \varepsilon_B^{(\varepsilon)}) \times ((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{-1/(1+n^*)} / (4\sigma_{0,2}^{(\varepsilon)} + 3k_1 / (4(1+n^*)))]. \quad (9)$$

Выражая  $\varepsilon_B^{(\varepsilon)}$  через  $\varepsilon_B$  и  $\varepsilon$ , зависимости (7)–(9) могут быть записаны в виде

$$a_v^{p(\varepsilon)} = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{n^*/(1+n^*)} (B - L) \times k_2 (\sigma_B^{(\varepsilon)} (1 + \varepsilon_B - \varepsilon))^2 (\varepsilon_B - \varepsilon) / (4\sigma_{0,2}^{(\varepsilon)}), \quad (10)$$

$$a_v^{3(\varepsilon)} = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2) (B - L) 3k_1 \times \sigma_B^{(\varepsilon)} (\varepsilon_B - \varepsilon) (1 + \varepsilon_B - \varepsilon) / (4(1 + n^*)), \quad (11)$$

$$a_v^{(\varepsilon)} = ((1 + 4r/\rho)/K_v^2) (B - L) \sigma_B^{(\varepsilon)} (\varepsilon_B - \varepsilon) \times (1 + \varepsilon_B - \varepsilon) [(k_2 \sigma_B^{(\varepsilon)} (1 + \varepsilon_B - \varepsilon) \times ((1 + 4r/\rho)/K_v^2)^{-1/(1+n^*)} / (4\sigma_{0,2}^{(\varepsilon)} + 3k_1 / (4(1+n^*)))], \quad (12)$$

где

$$n^* = (\varepsilon_B - \varepsilon) / (1 + \varepsilon_B - \varepsilon). \quad (13)$$

Полученные уравнения позволяют оценить изменение работы разрушения образца Шарпи на разных стадиях вязкого разрушения в зависимости от прочностных характеристик и предварительного пластического деформирования  $\varepsilon$ . В этом случае изменение удельной работы зарождения и распространения вязкого разрушения в образце Шарпи при статическом нагружении, исходя из (4), (5), (10), (11) может быть представлено следующими зависимостями:

$$a_v^3 / a_v^{3(\varepsilon)} = \left( \frac{\sigma_B \varepsilon_B (1 + \varepsilon_B) (1 + n^*)}{\sigma_B^{(\varepsilon)} (\varepsilon_B - \varepsilon) (1 + \varepsilon_B - \varepsilon) (1 + n)} \right), \quad (14)$$

$$a_v^p / a_v^{p(\varepsilon)} = \left( \frac{1 + 4r/\rho}{K_v^2} \right)^{\frac{n}{1+n} - \frac{n^*}{1+n^*}} \times \frac{(\sigma_B (1 + \varepsilon_B))^2 \varepsilon_B \sigma_{0,2}^{(\varepsilon)}}{\sigma_{0,2} (\sigma_B^{(\varepsilon)} (1 + \varepsilon_B - \varepsilon))^2 (\varepsilon_B - \varepsilon)}. \quad (15)$$

Отношение полных работ статического разрушения образца Шарпи, исходя из зависимостей (6), (12), имеет вид

$$a_v / a_v^{(\varepsilon)} = \frac{\sigma_B (1 + \varepsilon_B) \varepsilon_B}{\sigma_B^{(\varepsilon)} (1 + \varepsilon_B - \varepsilon) (\varepsilon_B - \varepsilon)} \times \quad (16)$$



$$\frac{k_2 \sigma_\epsilon (1 + \epsilon_\epsilon) ((1 + 4r / \rho) / K_v^2)^{-1/n} / \sigma_{0,2} + 3k_1 / (1 + n)}{k_2 \sigma_\epsilon^{(\epsilon)} (1 + \epsilon_\epsilon - \epsilon) ((1 + 4r / \rho) / K_v^2)^{-1/n} / \sigma_{0,2}^{(\epsilon)} + 3k_1 / (1 + n^*)}$$

Если не учитывать деформационное старение материала, зависимости (14)–(16) могут быть несколько упрощены. Истинное напряжение  $\sigma_{ист}$  на диаграмме растяжения (см. рис. 1) не зависит от степени предварительного деформирования материала до момента образования шейки [6]. Для точки  $\sigma_B^{ист}$  в этом случае на действительной диаграмме растяжения, соответствующей пределу прочности материала в зависимости от степени предварительного деформирования материала  $\epsilon$ , можно записать следующее равенство:

$$\sigma_B^{ист} = \sigma_B (1 + \epsilon_B) = \sigma_B^{(\epsilon)} (1 + \epsilon_B^{(\epsilon)}) = \sigma_B^{(\epsilon)} (1 + \epsilon_B^{(\epsilon)} - \epsilon). \quad (17)$$

Таким образом, зная начальные прочностные характеристики металла ( $\sigma_B, \epsilon_B$ ) для определения степени его предварительной деформации  $\epsilon$  достаточно определить текущее значение  $\sigma_B^{(\epsilon)}$ . Последнее может быть определено неразрушающими методами контроля (например, по твердости при технической диагностике наиболее нагруженных элементов конструкции).

Исходя из выражений (1), (13) и (17) зависимости (14)–(16) могут быть соответственно упрощены:

$$a_v^3 / a_v^{3(\epsilon)} = \left( \frac{\epsilon_B (1 + n^*)}{(\epsilon_B - \epsilon) (1 + n)} \right) = \frac{\epsilon_B (1 + \epsilon_B) (1 + 2\epsilon_B - 2\epsilon)}{(\epsilon_B - \epsilon) (1 + \epsilon_B - \epsilon) (1 + 2\epsilon_B)}, \quad (18)$$

$$a_v^p / a_v^{p(\epsilon)} = \left( \frac{1 + \frac{4r}{\rho}}{K_v^2} \right)^{1+n} \frac{\epsilon_B \sigma_{0,2}^{(\epsilon)}}{\sigma_{0,2} (\epsilon_B - \epsilon)}, \quad (19)$$

$$a_v / a_v^{(\epsilon)} = \quad (20)$$

$$\frac{\epsilon_\epsilon}{(\epsilon_\epsilon - \epsilon)} \frac{k_2 \sigma_\epsilon (1 + \epsilon_\epsilon) ((1 + 4r / \rho) / K_v^2)^{-1/n} / \sigma_{0,2} + 3k_1 / (1 + n)}{k_2 \sigma_\epsilon^{(\epsilon)} (1 + \epsilon_\epsilon - \epsilon) ((1 + 4r / \rho) / K_v^2)^{-1/n} / \sigma_{0,2}^{(\epsilon)} + 3k_1 / (1 + n^*)}$$

Используя соотношения (3), (17) при  $\epsilon \geq \epsilon_r$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}^{(\epsilon)}$  может быть выражен в виде

$$\sigma_{0,2}^{(\epsilon)} = \sigma_B^{ист} (\epsilon / \epsilon_B)^n = \sigma_B (1 + \epsilon_B) (\epsilon / \epsilon_B)^n. \quad (21)$$

В этом случае, учитывая зависимость (21), выражения (19), (20) дополнительно упрощаются:

$$a_v^p / a_v^{p(\epsilon)} = \left( \frac{1 + \frac{4r}{\rho}}{K_v^2} \right)^{1+n} \frac{\epsilon_B \sigma_{0,2}^{(\epsilon)}}{\sigma_{0,2} (\epsilon_B - \epsilon)}, \quad (22)$$

$$a_v / a_v^{(\epsilon)} = \frac{\epsilon_B}{(\epsilon_B - \epsilon)} \times \quad (23)$$

$$\frac{k_2 \left( \frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{0,2}} \right) (1 + \epsilon_\epsilon) ((1 + 4r / \rho) / K_v^2)^{-1/n} / \sigma_{0,2} + 3k_1 / (1 + n)}{k_2 \left( \frac{\epsilon_\epsilon}{\epsilon} \right)^n ((1 + 4r / \rho) / K_v^2)^{-1/n} / \sigma_{0,2} + 3k_1 / (1 + n^*)}$$

Как видно из выражения (18), относительное изменение работы зарождения вязкого разрушения образца Шарпи при статическом нагружении полностью характеризуется начальной равномерной деформационной способностью металла  $\epsilon_B$  и предварительной деформацией  $\epsilon$ . Общий график относительного изменения работы зарождения образца Шарпи в зависимости от исходного значения равномерной пластической деформации  $\epsilon_B$  и величины  $\epsilon / \epsilon_1$  представлен на рис. 2.

Исходя из зависимости (22) следует, что относительное изменение работы распространения разрушения образца Шарпи зависит от начальных прочностных характеристик металла ( $\sigma_B, \sigma_{0,2}, \epsilon_B$ ), размера зоны  $r$  и величины  $\epsilon$ .

На рис. 3 приведены графики изменения величины  $a_v^p \sigma_{0,2} / (a_v^{p(\epsilon)} \sigma_B)$  от исходного значения равномерной деформации  $\epsilon_B$ , величины  $\epsilon / \epsilon_B$  и эле-

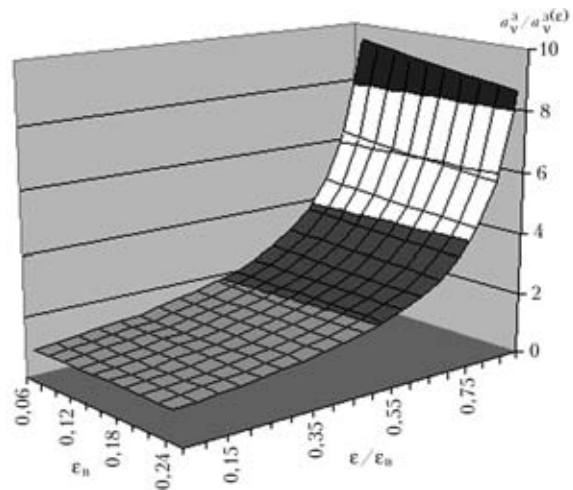


Рис. 2. Относительное изменение работы зарождения вязкого разрушения образца Шарпи ( $a_v^3 / a_v^{3(\epsilon)}$ ) в зависимости от исходного значения равномерной пластической деформации  $\epsilon_B$  и величины  $\epsilon / \epsilon_B$

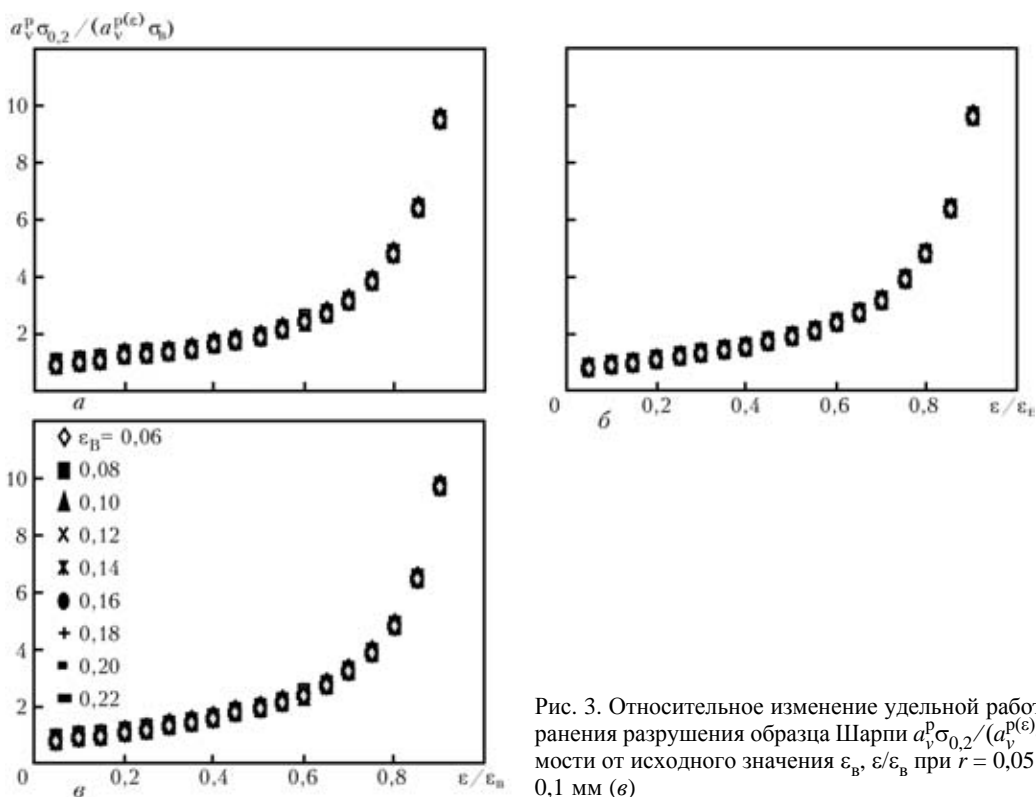


Рис. 3. Относительное изменение удельной работы распространения разрушения образца Шарпи  $a_v^p \sigma_{0,2} / (a_v^{p(\varepsilon)} \sigma_B)$  в зависимости от исходного значения  $\varepsilon_B$ ,  $\varepsilon / \varepsilon_B$  при  $r = 0,05$  (а); 0,07 (б); 0,1 мм (в)

мента  $r$ . Как видно из рисунка, изменение величины  $r$  в представленном диапазоне (0,05...0,1 мм) очень слабо влияет на значения  $a_v^p \sigma_{0,2} / (a_v^{p(\varepsilon)} \sigma_B)$ , что позволяет в ряде случаев для упрощения дальнейших оценок принять ее равным некоторому среднему размеру ( $r \approx 0,06$  мм) [1, 2].

Зная начальные прочностные характеристики металла ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\varepsilon_B$ ), уравнение (23) вполне пригодно для практической оценки изменения вязкости разрушения образца Шарпи в зависимости от степени предварительной деформации.

Следует отметить, что прямое экспериментальное определение величины  $\varepsilon_B$  в инженерной практике встречает некоторые затруднения. В частности, при поставке материала заводом-изготовителем гарантируются только минимальные значения механических характеристик  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , и, как следствие, требования к степени однородной деформации оказываются неопределенными. В связи с этим прямое использование величины  $\varepsilon_B$  при оценке прочностных свойств и проектировании конструкций не применяется (в данном случае в сертификатах приводятся только значения относительного удлинения, которое имеет ограничение снизу, что позволяет косвенно судить о пластической способности материала). Для устранения данного недостатка в работе [7] при установлении корреляционной зависимости между сертификатными значениями  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  и величиной  $\varepsilon_B$  исследовано семь наиболее широко используемых конструкционных сталей с различными начальными

механическими свойствами и формами поведения кривой деформирования. В результате выполненных исследований получена упрощенная корреляционная зависимость (числовые коэффициенты округлены до сотых значений):

$$n = -0,18 + 0,22 \sigma_B / \sigma_{0,2}, \tag{24}$$

где  $n$  определяется из выражения (1). Как следует из (24), показатель деформационного упрочнения в данном случае имеет ограничение снизу, равное 0,04 ( $\varepsilon_B \approx 0,041$ ), что примерно соответствует деформации при определении условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  с поправкой на пластичность 0,2 %.

Принимая во внимание (24), появляется возможность графического анализа выражения (23) в зависимости от пластических свойств  $\varepsilon_B$  и относительного предварительного пластического деформирования  $\varepsilon / \varepsilon_B$  материала. На рис. 4 графически представлен общий характер изменения зависимости (23) с учетом выражений (1), (13) и (24).

Как видно из рис. 4, при увеличении относительной предварительной деформации  $\varepsilon / \varepsilon_B$  свыше 50 % отмечается значительное падение вязкости разрушения образца Шарпи. Косвенным подтверждением последнего служат также экспериментальные данные, полученные в работе [8]. Кроме того, значительное падение вязкости образца Шарпи может иметь место и при малых значениях предварительной пластической деформации материала  $\varepsilon$ , если последний имеет низкий запас пластичности.

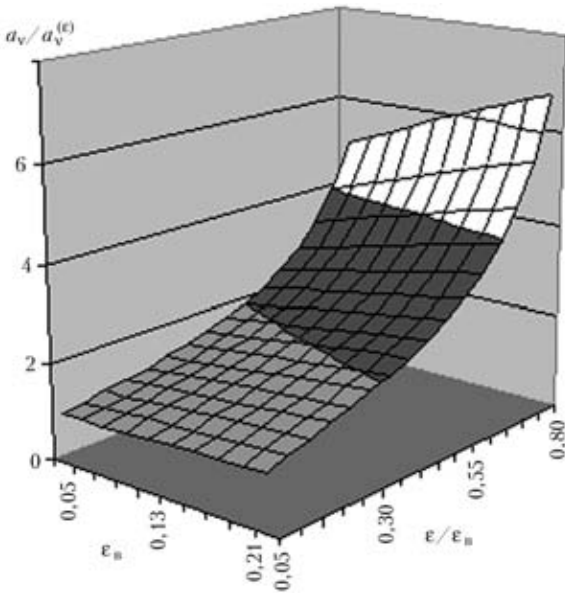


Рис. 4. Расчетные значения относительного изменения работы вязкого разрушения образца Шарпи  $a_v/a_v^{(e)}$  в зависимости от степени предварительной пластической деформации  $\epsilon/\epsilon_B$ .

Как отмечалось в работе [1], полученные квазистатические зависимости по оценке работ разрушения ( $a_v, a_v^p, a_v^3$ ) образца Шарпи можно распространить и на случай динамического нагружения.

Для оценки правомерности принятых выше допущений и подходов к оценке работы разрушения образца Шарпи [2] выполнена экспериментальная проверка полученных зависимостей на примере листового проката из стали 09Г2С-Ш толщиной 70 мм.

Для исключения влияния неоднородности свойств металлопроката в направлении толщины исследовали слой металла толщиной 14 мм, находящийся на глубине 15 мм от поверхности листа. Схема вырезки и расположение образцов представлены на рис. 5. Подготовленные плоские образцы МИ-7 подвергали различной равномерной пластической деформации на 5, 7,5 и 10 %, после чего часть заготовок выдерживали в печи при температуре 150 и 250 °С в течение часа для определения влияния деформационного старения на прочностные характеристики металла. В дальнейшем из полученных заготовок изготавливали образцы на растяжение МИ-12 и ударную вязкость МИ-50.

Время после предварительной деформации плоских заготовок, выдержки их в печи и проведении стандартных испытаний на растяжение и ударный изгиб составило 20 суток.

Результаты испытаний на растяжение образцов МИ-12, изготовленных из исследуемых заготовок, приведены в табл. 1. Определение деформации осуществлялось на базе 30 мм при помощи датчиков перемещения.

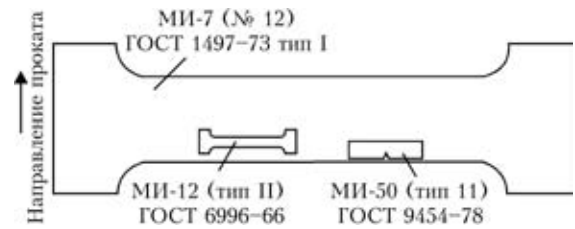


Рис. 5. Схема вырезки и расположение образцов

Т а б л и ц а 1. Прочностные характеристики исследуемой заготовки из стали 09Г2С-Ш после различных видов обработки

Степень деформирования, %	$\sigma_{0,2}^{(\epsilon)}$ , МПа	$\sigma_B^{(\epsilon)}$ , МПа	$\epsilon_B^{(\epsilon)}$ , %	$\delta$ , %	$\sigma_B^{ист}$ , МПа
$\epsilon = 0$	280	450	0,190	39,1	535
$\epsilon = 5$	392	475	0,145	35,6	544
$\epsilon = 7,5$	435	483	0,106	28,6	534
$\epsilon = 10$	474	502	0,096	26,6	550
$\epsilon = 5, 150\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ ч}$	393	471	0,134	34,4	534
$\epsilon = 7,5, 150\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ ч}$	424	474	0,126	32,2	534
$\epsilon = 10, 150\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ ч}$	465	496	0,090	27,9	540
$\epsilon = 5, 250\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ ч}$	421	475	0,115	34,4	530
$\epsilon = 7,5, 250\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ ч}$	465	498	0,106	29,6	550
$\epsilon = 10, 250\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ ч}$	493	512	0,070	23,7	548

Как видно из табл.1, истинное напряжение  $\sigma_B^{ист}$  в точке потери пластической устойчивости практически не зависит от предварительного деформирования и степени деформационного старения металла, что, в свою очередь, позволяет в дальнейшем несколько расширить область использования выражения (17) (в данном случае имеется в виду первая часть равенства  $\sigma_B(1 + \epsilon_B) = \sigma_B^{(\epsilon)}(1 + \epsilon_B^{(\epsilon)})$ ).

Значения ударной вязкости образцов Шарпи по нижнему разбросу данных приведены в табл. 2.

На рис. 6 представлен график изменения ударной вязкости KV на верхнем шельфе в зависимости от степени предварительного деформирования  $\epsilon$ , там же приведены расчетные значения по формуле (23) с учетом выражения (24). В связи с тем, что ударные испытания проводили на копре с запасом энергии 300 Дж, а вязкость разрушения KV образца Шарпи при  $\epsilon = 0\%$  на верхнем шельфе значительно превысила это значение, расчетные

Т а б л и ц а 2. Результаты ударных испытаний стали 09Г2С-Ш

Степень деформирования, %	KV, Дж, при температуре, °С						
	+20	0	-20	-30	-40	-60	-80
$\epsilon = 0$	>300	>300	>300	240	187,2	165,5	7,2
$\epsilon = 5$	293,4	>300	216	184,2	175,2	18,6	6,0
$\epsilon = 7,5$	224,4	204	213,6	184,2	81,6	4,8	3,0
$\epsilon = 10$	201,6	283,8	192	153,6	4,8	4,8	4,8

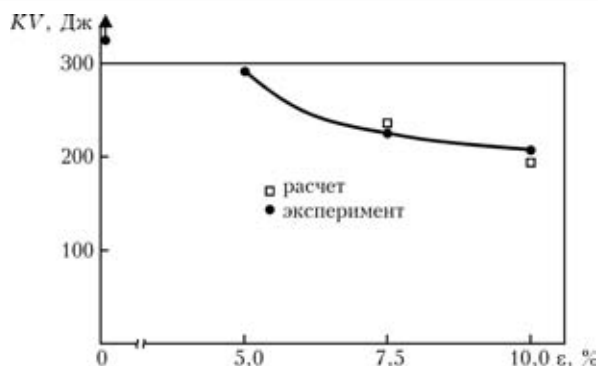


Рис. 6. Изменение ударной вязкости  $KV$  образца Шарпи на верхнем шельфе в зависимости от степени предварительного деформирования

данные по формуле (23) приведены относительно экспериментальных данных при  $\epsilon = 5\%$ .

Как видно из рис. 6, расчетные значения  $KV$  достаточно хорошо согласуются с экспериментальными, что свидетельствует о возможности использования данного подхода для корректировки требований к ударной вязкости на верхнем шельфе в случае возможного пластического деформирования элементов металлоконструкций.

Кроме того, обнаруженная слабая зависимость истинного напряжения  $\sigma_B^{ист}$  в точке потери пластической устойчивости от предварительного деформирования и степени деформационного старения металла ( $\sigma_B(1 + \epsilon_B) \approx \sigma_B^{(\epsilon)}(1 + \epsilon_B^{(\epsilon)})$ ) по всей видимости позволяет в дальнейшем несколько расширить область использования полученных выражений и на зону термического влияния сварных соединений.

## Выводы

1. Получены аналитические зависимости, позволяющие оценить относительное изменение удельной работы зарождения и распространения вязкого разрушения в образцах Шарпи в зависимости от пластического деформирования  $\epsilon$ ,  $\epsilon_B$  и структурного параметра  $r$ .

2. Предложено простое выражение для определения возможного снижения ударной вязкости образца Шарпи на верхнем шельфе в зависимости от величины пластического деформирования металлопроката.

1. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 24–29.
2. Гиренко В. С. Расширение областей применения механики разрушения при оценке трещиностойкости элементов сварных конструкций в условиях статического нагружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1997. — 35 с.
3. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Пер. с англ. И. А. Нечая, И. П. Сухарева, Б. Н. Ушакова. — М.: Мир, 1977. — 302 с.
4. Лобанов Л. М., Гиренко В. С., Дядин В. П. Стандартные механические испытания и трещиностойкость элементов сварных конструкций в условиях статического нагружения // Механіка руйнування металів і міцність конструкцій. — Львів, 1999. — Т. 1, вип. 2.
5. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
6. Русинко К. Н. Теория пластичности и неустановившейся ползучести. — Львов: Вища шк., 1981. — 148 с.
7. Дядин В. П. Разработка метода оценки сопротивления материалов и сварных соединений стабильному росту трещин в условиях статического нагружения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1998. — 20 с.
8. Потак Я. М. Хрупкие разрушения стали и стальных деталей. — М., 1955. — 389 с.

An approach is proposed to evaluation of upper shelf impact toughness of a Charpy sample depending on the degree of plastic pre-deformation of metal rolled stock. The derived analytical dependencies have been analyzed, and the main parameters have been determined, characterizing their change. A simple engineering dependence is proposed, which allows evaluation of the change of upper shelf impact toughness of a Charpy sample depending on the degree of plastic deformation in fabrication and assembly of metal structure elements.

Поступила в редакцию 29.09.2005