

## **Физическая интерпретация характеристик разрушения, определяемых при испытаниях на ударный изгиб образцов типа “Шарпи”**

**С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков**

Институт металлофизики НАН Украины, Киев, Украина

*Показана возможность использования предложенных ранее новых физически обоснованных характеристик вязкости металла и охрупчивающего действия концентратора напряжений для анализа хрупкого разрушения стандартных образцов типа “Шарпи”. Описана методика определения степени охрупчивания металла при ударных испытаниях. Установлено, что пороговые значения удельной работы разрушения KCV, по которым выбраковывается металл, должны корректироваться в зависимости от уровня прочности стали. Для сталей низкой, средней и высокой прочности предложены физически обоснованные пороговые значения KCV.*

**Ключевые слова:** образец “Шарпи”, ударная вязкость, концентрация напряжений, коэффициент вязкости, конструкционная сталь, прочность.

**Введение.** Ранее отмечалось [1], что одной из особенностей современного состояния науки о прочности является отсутствие физически обоснованных характеристик вязкости металлов и сплавов. Применяемые в настоящее время при аттестации металлов характеристики вязкости предложены задолго до появления представлений о физической природе разрушения металлов. Это привело к тому, что в металловедческой практике для оценки качества и выбраковки материала используются одни характеристики, а при расчете элементов конструкций, изготовленных из этого материала, – другие. Классическим примером таких характеристик служат ударная вязкость и трещиностойкость [2]. Указанная проблема может быть решена путем разработки представлений о вязкости металла исходя из “первых принципов”, т.е. из анализа микромеханизма разрушения. Такой подход позволяет предложить набор “элементарных” параметров, одни из которых отражают собственно вязкость металла и имеют однозначную связь с параметрами его микроструктуры, а другие – характеризуют влияние напряженно-деформированного состояния (НДС) материала на способность металла сопротивляться хрупкому (квазихрупкому) разрушению [1]. Из этих параметров, как из элементарных “кирпичиков”, достаточно просто “собрать” характеристики, которые можно использовать как для аттестации материала, так и для расчета элементов конструкций. Например, проведенный ранее [1] анализ силовых условий образования и потери устойчивости зародышевых трещин показал, что в качестве меры вязкости металла и его хрупкой прочности в простейших условиях *одноосного* растяжения могут использоваться коэффициент вязкости  $K_v$  и минимальное напряжение хрупкого разрушения металла (хрупкая прочность)  $R_{mc}$ . Кроме того, предложена новая характеристика – параметр  $E_m$ , который является универсальной мерой охрупчивающего действия произвольного концентратора напряжений. Он показывает,

во сколько раз снижается уровень вязкости  $K_B$  в зависимости от НДС, в котором находится металл в области действия концентратора напряжений. Это позволило с единых позиций (в рамках единого набора параметров) описать охрупчивающее действие конструктивных концентраторов, коротких и классических (длинных) трещин [1, 3].

Поскольку в настоящее время при аттестации материалов и полуфабрикатов широко используется ударная вязкость, имеет смысл применить предложенный подход для описания хрупкого разрушения при стандартных испытаниях на динамический изгиб и установить связь этих характеристик со свойствами металла, определяемыми при одноосном растяжении. Для этого необходимо решить следующие основные задачи:

оценить охрупчивающее действие используемых при испытаниях на ударную вязкость ( $KCV$ ) концентраторов типа “Шарпи”;

установить связь между удельной работой разрушения  $KCV$  и коэффициентом вязкости металла  $K_B$ .

**Определение охрупчивающего действия концентраторов типа “Шарпи”.** В основу предлагаемого подхода положены представления [1], в соответствии с которыми уровень вязкости металла  $K_B$  определяется как отношение минимального напряжения хрупкого разрушения  $R_{mc}$  к величине предела текучести  $\sigma_T$  ( $K_B = R_{mc} / \sigma_T$ ). В условиях одноосного растяжения хрупкое разрушение на пределе текучести имеет место при  $K_B = 1$ . Наличие в образце или изделии концентратора напряжений приводит к тому, что вязкий при одноосном растяжении металл ( $K_B > 1$ ) может разрушиться хрупко, так как уровень вязкости металла в области действия концентратора напряжений снижается в  $E_m$  раз. В общем случае выражение для параметра  $E_m$ , характеризующего охрупчивающее действие концентратора напряжений, таково [1]:

$$E_m = \frac{j(e_i^p / e_T)^n}{K_{ss}}, \quad (1)$$

где  $j$  – создаваемая концентратором жесткость напряженного состояния ( $j = \sigma_1 / \sigma_i$ ;  $\sigma_1$  – максимальное значение растягивающего напряжения в вершине концентратора;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений);  $e_i^p$  – интенсивность пластических деформаций в точке, где инициируется разрушение;  $e_T$  – величина пластических деформаций на пределе текучести;  $n$  – показатель деформационного упрочнения металла;  $K_{ss}$  – коэффициент, который показывает, во сколько раз локальное напряжение разрушения металла в окрестности концентратора напряжений  $\sigma_c$  больше минимального напряжения разрушения  $R_{mc}$  при одноосном растяжении.

Согласно [1], для экспериментального определения значения  $E_m$  при некоторой температуре (например, температуре хладноломкости  $T_x$  – рис. 1) достаточно по данным независимого эксперимента на одноосное растяжение гладких образцов найти величину коэффициента вязкости  $K_B$  при этой температуре. В случае динамического нагружения необходимо определить значение динамического коэффициента вязкости при температуре хладноломкости  $K_B^D(T_x)$ :

$$E_m(T_x) = K_B^D(T_x), \quad (2)$$

где

$$K_B^D(T_x) = \frac{R_{MC}}{\sigma_T^D(T_x)}, \quad (3)$$

$\sigma_T^D(T_x)$  – динамический предел текучести при температуре хладноломкости.

Значение минимального уровня напряжения хрупкого разрушения  $R_{MC}$  может быть определено как при квазистатическом, так и при динамическом нагружении гладких образцов, поскольку в интервале скоростей деформации  $10^{-4} \dots 10^2 \text{ с}^{-1}$  его величина практически не изменяется [4, 5].

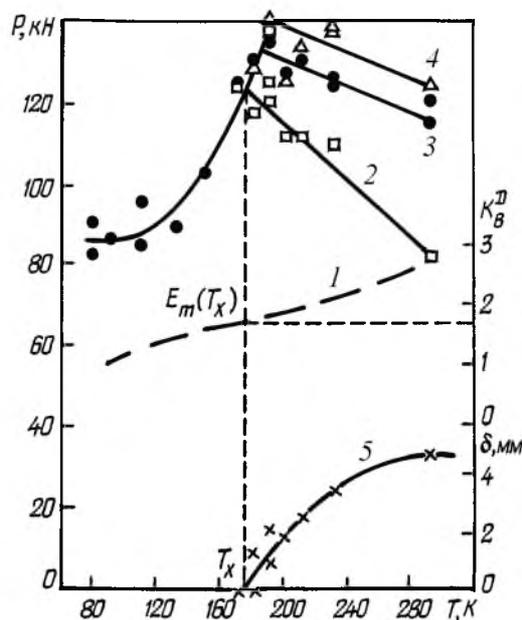


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента вязкости  $K_B^D$  (1) и характеристик разрушения образца типа “Шарпи” при трехточечном динамическом изгибе (сталь Ст. 3кп): 2 – нагрузка общей текучести образца; 3 – разрушающая нагрузка; 4 – максимальное усилие на диаграмме деформирования ( $\delta$  – остаточный прогиб образца (5);  $E_m(T_x)$  – параметр, характеризующий охрупчивающее действие концентратора типа “Шарпи” при температуре хладноломкости  $T_x$ ).

Экспериментальные исследования предусматривали проведение низкотемпературных механических испытаний образцов типа “Шарпи” как на статический, так и на динамический трехточечный изгиб. По результатам этих испытаний определяли температуру хладноломкости  $T_x$ . Кроме того, в интервале температур 77...293 К осуществляли испытания гладких образцов на одноосное статическое и динамическое растяжение. Испытания проводили на разрывной машине “Instron 1251”. Скорость нагружения при динамическом изгибе составляла 0,36 м/с, при статическом –  $0,36 \cdot 10^{-4}$  м/с.

Объектом исследований служили технически чистое железо и стали Ст. 3кп, 10ХСНД, 09Г2Д, 09Г2С, 09Г2ФБ в отожженном состоянии. Подробно методика экспериментальных исследований описана в работе [6]. Эти испытания позволяли кроме стандартных механических характеристик определить минимальное напряжение хрупкого разрушения  $R_{мс}$ , построить температурную зависимость коэффициента вязкости металла и найти его значения при температуре хладноломкости образца типа “Шарпи” в условиях статического и динамического нагружения (рис. 1).

Т а б л и ц а 1

Характеристики разрушения металла в условиях статического одноосного растяжения и трехточечного изгиба

Материал	$R_{мс}$ , МПа	$T_x$ , К	$\sigma_T$ , МПа	$n$	$E_m^0(T_x)$	$j / K_{ss}$	
Технически чистое железо	900	128	530	0,16	1,70	1,18	
Стали	Ст. 3кп	980	133	640	0,15	1,53	1,08
	10ХСНД	1000	113	570	0,11	1,75	1,36
	09Г2Д	1360	108	780	0,15	1,74	1,23
	09Г2С	1420	103	920	0,09	1,54	1,25
	09Г2ФБ	1530	93	850	0,12	1,80	1,36
Среднее значение					$1,68 \pm 0,01$	$1,24 \pm 0,09$	

Представленные в табл. 1 результаты статических испытаний на одноосное растяжение и трехточечный изгиб позволяют найти значение отношения  $j / K_{ss}$ , которое при фиксированной относительной нагрузке (в данном случае  $P_F / P_{GY} = 1$ ) также должно быть постоянным\*. С этой целью в выражении (1) в качестве значения  $e_i^p$  принимали критическую деформацию  $e_c$ . Для сталей в первом приближении можно принять  $e_c \approx 0,02$  [7],  $e_T \approx 0,002$ . При такой величине локальной деформации в очаге разрушения среднее значение отношения  $j / K_{ss}$  равно 1,24. Подставляя его в (1), получаем приближенное выражение для параметра, характеризующего охрупчивающее действие концентратора типа “Шарпи”:

$$E_m(T_x) \approx 1,24 \cdot 10^{n(T_x)}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что исследованные стали имеют близкие значения показателей деформационного упрочнения при соответствующих  $T_x$ , поэтому и величины  $E_m$  для этих сталей практически не отличаются и составляют в среднем  $E_m(T_x) \approx 1,68 \pm 0,10$ . Аналогично определены значения  $E_m$  по результатам испытаний в условиях динамического нагружения:

\* Строго это утверждение справедливо для идеально пластичного материала. При наличии деформационного упрочнения имеет место некоторое влияние величины показателя деформационного упрочнения  $n$  на  $j$ , однако, в первом приближении им можно пренебречь.

$E_m(T_x) \approx 1,67 \pm 0,10$ . Следует отметить, что аналогичные испытания малоуглеродистой стали на маятниковом копре были проведены в работе [8]. Обработка данных этой работы позволяет получить близкое значение параметра  $E_m(T_x) \approx 1,71$ . Кроме того, в [8] показано, что в первом приближении значение  $T_x$  можно определять на серийных копрах без записи диаграммы нагружения. Для этого достаточно построить температурную зависимость изменения величины утяжки образца. Согласно [8], максимальная температура, при которой утяжка образца типа “Шарпи” равна нулю, является верхней оценкой температуры хладноломкости  $T_x$ .

Таким образом, по результатам испытаний на динамический изгиб можно определять величину коэффициента вязкости металла. Для этого необходимо найти значение  $T_x$ . Более того, располагая значением  $E_m(T_x)$ , можно оценить уровень вязкости металла, которую он будет иметь при этой температуре, но в условиях *квазистатического* нагружения. Действительно, выразив в (3) динамический предел текучести  $\sigma_T^D$  через величину  $\sigma_T$  при квазистатическом нагружении ( $\sigma_T^D = \delta_U \sigma_T$ , где  $\delta_U$  – коэффициент чувствительности  $\sigma_T$  к скорости деформации) и подставив это значение в (2), получим

$$K_B = \delta_U E_m(T_x). \quad (5)$$

Для типичных конструкционных сталей увеличение скорости деформации с  $10^{-4}$  до  $10^2 \text{ с}^{-1}$  приводит к росту предела текучести в 1,10...1,30 раза [9]. Это означает, что при  $T = T_x$  вязкость металла составляет

$$K_B(T_x) \approx (1,10...1,30) \cdot 1,24 \cdot 10^n(T_x). \quad (6)$$

Чтобы получить *верхнюю оценку* величины  $K_B^{\max}(T_x)$  для сталей разных классов прочности, достаточно располагать значениями  $n$  при квазистатическом нагружении в условиях комнатной температуры (табл. 2). Располагая этими значениями вязкости, с помощью зависимостей (4) [3], (11) и (22) [1] можно определить, какого типа концентраторы (конструктивные концентраторы, короткие усталостные трещины или макротрещины) способны вызвать хрупкое разрушение металла, при какой температуре и относительной величине номинальных напряжений ( $(\sigma_N / \sigma_T) < 1$  или  $(\sigma_N / \sigma_T) > 1$ ) оно произойдет.

Т а б л и ц а 2

**Верхняя оценка коэффициента вязкости металла  $K_B^{\max}(T_x)$  при температуре хладноломкости образца типа “Шарпи” в условиях динамического нагружения сталей низкой, средней и высокой прочности**

Стали	$\delta_U$	$n$	$E_m^{\max}(T_x)$	$K_B^{\max}(T_x)$
Низкопрочная	1,3	0,10	1,56	2,03
		0,20	1,97	2,56
Среднепрочная	1,2	0,07	1,46	1,75
		0,10	1,56	1,87
Высокопрочная	1,1	0,05	1,39	1,53
		0,07	1,46	1,60

Таким образом, предложенный подход значительно расширяет информативность стандартных испытаний на ударную вязкость и позволяет непосредственно использовать результаты этих испытаний для оценки опасности разрушения элементов конструкций. Аналогично могут быть определены значения  $E_m(T_x)$  для образцов других типов (“Менаже”, образцов с усталостными трещинами и образцов, используемых при испытаниях падающим грузом), что позволяет сопоставлять результаты этих испытаний.

**Связь между коэффициентом вязкости металла  $K_v$  и его ударной вязкостью  $KCV$**  Вторым аспектом рассматриваемой проблемы является обоснование величины нижнего порога ударной вязкости, по которой должна проводиться выбраковка материала. Для конструкционных сталей в качестве такого порога используется значение  $KCV = 30$  Дж/см<sup>2</sup>, полученное эмпирическим путем по данным эксплуатации стальных изделий в течение многих лет. Создание новых сплавов, особенно высокопрочных, требует коррекции порогового значения  $KCV$ . Так, например, в настоящее время в ряде случаев при аттестации судостроительных сталей с пределом текучести  $\sigma_{0,2} = 720 \dots 950$  МПа используются более высокие значения  $KCV$  ( $\approx 40 \dots 50$  Дж/см<sup>2</sup>) [10].

В рамках предложенного подхода эта проблема может быть решена, если установить связь между величиной  $KCV$  и коэффициентом вязкости  $K_v$ , поскольку знание последнего позволяет ответить на вопрос, какой концентратор и при какой температуре представляет опасность для изделия из рассматриваемого материала. Сложность этой задачи заключается в том, что  $KCV$  зависит не только от вязкости металла, но и от величины предела текучести. Однако для сталей одного класса прочности можно установить корреляцию между  $KCV$  и  $K_v$ . На рис. 2 это проиллюстрировано на примере двух классов сталей: низкопрочных ( $\sigma_{0,2} \leq 500$  МПа) и высокопрочных ( $\sigma_{0,2} \geq 1000$  МПа). Как видно, низкопрочные стали при  $KCV \approx 20 \dots 30$  Дж/см<sup>2</sup> обладают высокими уровнями вязкости ( $K_v \geq 2$ ), которые, согласно [1, 3], обеспечивают безопасное (по отношению к хрупкому разрушению) нагружение до  $\sigma_N = \sigma_T$  силовых элементов с конструктивными концентраторами и трещиноподобными дефектами. В то же время высокопрочные стали при вдвое большем уровне ударной вязкости ( $KCV \approx 50 \dots 70$  Дж/см<sup>2</sup>) имеют малую вязкость ( $K_v \approx 1,2 \dots 1,6$ ). Это свидетельствует о том, что в данном случае столь существенный рост  $KCV$  получен не за счет увеличения вязкости металла, а вследствие больших значений предела текучести металла.

Таким образом, если пороговые значения  $KCV \approx 20 \dots 30$  Дж/см<sup>2</sup> для низкопрочных сталей можно рассматривать как вполне обоснованные, то для высокопрочных сталей даже при  $KCV \approx 75$  Дж/см<sup>2</sup> уровень вязкости металла  $K_v$  недостаточен, чтобы противостоять охрупчивающему действию трещиноподобных дефектов. Однако для сталей этого класса повышение  $K_v$  до значений, равных примерно 1,8, связано со значительными технологическими трудностями, поэтому целесообразно ограничиться величиной  $KCV \approx 75$  Дж/см<sup>2</sup>, учитывая, что соответствующие значения  $K_v$  обеспечивают нечувствительность металла к конструктивным концентраторам [1].

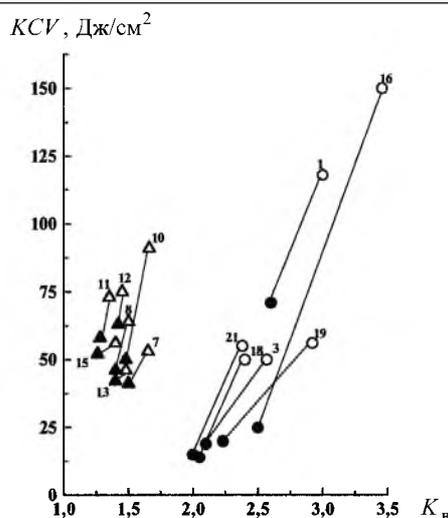


Рис. 2. Связь между величиной ударной вязкости  $K_{CV}$  и коэффициентом вязкости  $K_b$  [11] при  $T = 293$  К ( $\circ$ ,  $\Delta$ ) и  $213$  К ( $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ) для низкопрочных (1 – 30; 3 – 15ГС; 16 – 1Х13; 18 – 3Х13; 19 – 4Х13; 21 – 2Х13) и высокопрочных (7 – 30ХГСА ( $\sigma_{0,2} = 1360$  МПа); 8 – 30ХГСА ( $\sigma_{0,2} = 1440$  МПа); 10 – 30ХГСНА ( $\sigma_{0,2} = 1200$  МПа); 11 – 30ХГСНА ( $\sigma_{0,2} = 1210$  МПа); 12 – 50ХФА; 13 – 40Х2СВА; 15 – 42Х2ГСНМ) сталей.

Анализ приведенных в работе [11] данных по  $K_b$  и  $K_{CV}$  позволяет рекомендовать для сталей средней прочности ( $\sigma_{0,2} \approx 500 \dots 1000$  МПа) пороговое значение  $K_{CV} \approx 50$  Дж/см<sup>2</sup>.

## Выводы

1. Разрушение образца типа “Шарпи” в условиях общей текучести происходит при уровне вязкости металла  $K_b \approx (1,10 \dots 1,30) \cdot 1,24 \cdot 10^n$ .

2. Величина нижнего порога ударной вязкости, используемая при аттестации металлов и сплавов, должна корректироваться в зависимости от уровня их прочности, а также типа дефектов, которые могут присутствовать в конструкции. Для низкопрочных сталей ( $\sigma_{0,2} < 500$  МПа) значение  $K_{CV} \approx 20 \dots 30$  Дж/см<sup>2</sup> обеспечивает безопасное нагружение металла при наличии в нем конструктивных концентраторов напряжений и трещиноподобных дефектов типа коротких усталостных трещин. Для сталей средней прочности ( $500 \leq \sigma_{0,2} \leq 1000$  МПа) таким пороговым значением является  $K_{CV} \approx 50$  Дж/см<sup>2</sup>, в то время как для высокопрочных сталей ( $\sigma_{0,2} > 1000$  МПа) только уровень ударной вязкости  $K_{CV} \approx 75$  Дж/см<sup>2</sup> гарантирует нечувствительность металла к конструктивным концентраторам напряжений ( $\alpha_\sigma \leq 3,0 \dots 3,5$ ).

## Резюме

Показано можливість використання запропонованих раніше нових фізично обґрунтованих характеристик в'язкості металу та окрихчуваної дії концентратора напружень з метою аналізу крихкого руйнування стандартних зраз-

ків типу “Шарпі”. Описано методику оцінки ступеню окрихчення металу при ударних випробуваннях. Показано, що порогові значення питомої роботи руйнування *KCV*, за якими вибраковують метал, необхідно коригувати в залежності від рівня міцності сталі. Для сталей низької, середньої та високої міцності запропоновано фізично обґрунтовані порогові значення *KCV*.

1. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С., Никоненко Д. И. Механика и физика квазихрупкого разрушения поликристаллических металлов в условиях концентрации напряжений. Сообщ. 3. Вязкость металлов и сплавов // Пробл. прочности. – 2000. – № 1. – С. 72 – 92.
2. Hahn G. T. Influence of microstructure on brittle fracture toughness // Met. Trans. – 1984. – 12A. – P. 947 – 957.
3. Мешков Ю. Я. Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев: Наук. думка, 1981. – 238 с.
4. Даль В., Бельхе П. Диаграмма деформации // Статическая прочность и механика разрушения сталей: Сб. науч. тр. / Пер. с нем. под ред. В. Даля, В. Антона. – М.: Металлургия, 1986. – С. 51 – 131.
5. Походня И. К., Швачко В. И., Шиян А. В. и др. О природе хрупкого разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений при испытаниях на ударный изгиб // Автомат. сварка. – 1988. – № 5. – С. 1 – 4.
6. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С. О физической природе прочности ОЦК-металлов в области температур вязко-хрупкого перехода // Металлофизика и новейшие технологии. – 1994. – 16, № 11. – С. 31 – 34.
7. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С. Механика и физика квазихрупкого разрушения поликристаллических металлов в условиях концентрации напряжений. Сообщ. 1. Экспериментальные закономерности // Пробл. прочности. – 1997. – № 4. – С. 5 – 16.
8. Копельман Л. А. Сопоставление результатов испытаний низкоуглеродистой стали на ударный изгиб и одноосное растяжение // Автомат. сварка. – 1975. – №12. – С. 7 – 11.
9. Resenfield A. R. and Hahn G. T. Numerical descriptions of the ambient low-temperature, and high-strain rate flow and fracture behavior of plain carbon steel // Trans. ASME. – 1966. – 59. – P. 962 – 980.
10. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Никоненко Д. И. и др. Ударная вязкость судостроительных сталей и оценка их склонности к хрупкому разрушению // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 1997. – № 3. – С. 27 – 30.
11. Мешков Ю. Я., Сердитова Т. Н. Разрушение деформированной стали. – Киев: Наук. думка, 1989. – 160 с.

Поступила 18. 02. 99