

УДК 620.178.7:669.14

*А. А. ХМЕЛЕВ, Л. Е. РЕУТ, В. А. СИДОРОВ*

## **УНИВЕРСАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТАЛЕЙ ПО ДИАГРАММАМ ХРУПКОВЯЗКОГО СОСТОЯНИЯ**

*Белорусский национальный технический университет*

*(Поступила в редакцию 19.09.2010)*

Стандартные испытания на ударный изгиб для установления сертификатных значений ударной вязкости, которая является критерием пригодности материала для определенных условий эксплуатации детали, широко применяются на практике как для контроля качества готовых деталей, так и при исследовании случаев аварийных разрушений. Для этих целей, согласно существующим ГОСТ, применяют 20 типов стандартных образцов, для каждого из которых нормативными документами установлены свои оценочные параметры результатов испытаний. Это обстоятельство делает применение ударной вязкости как критерия отбраковки материала крайне неудобным в практическом использовании вследствие больших трудозатрат и времени испытаний. Кроме того, ударная вязкость оценивает лишь косвенно склонность материала к хрупкому разрушению в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, которое имеет место в области концентратора напряжений. Однако при ударном изгибе образцов с острыми надрезами и выращенными усталостными трещинами возникающее в вершине трещины напряженно-деформированное состояние является настолько сложным, что установить эту связь в конкретном и однозначном виде представляется крайне трудной задачей. При этом следует учитывать, что на значение ударной вязкости оказывают влияние не только форма надреза, но также температура и скорость испытания. Поэтому до настоящего времени теоретический анализ ударной вязкости не осуществлен и данные о ней не могут быть использованы в расчетах на прочность.

В настоящей работе предлагается метод теоретической оценки ударной вязкости для малоуглеродистых сталей во всем диапазоне температур их эксплуатации по диаграммам хрупковязкого состояния с использованием сертификатных характеристик прочности и пластичности этих сталей, полученных при их испытаниях на растяжение.

Известны диаграммы хрупковязкого состояния сталей [1], связывающие характеристики энергопоглощения ударных образцов от вязкого до идеально хрупкого разрушения с характеристиками прочности, пластичности и твердости по Бринеллю в широком диапазоне температур испытаний. При этом все упомянутые характеристики исследуются, начиная от исходного состояния сталей, т. е. состояния поставки, до момента появления начальной пластической деформации (пластического повреждения) вплоть до полного их разрушения.

Как известно, основными факторами, приводящими к охрупчиванию малоуглеродистых и низкоуглеродистых сталей, являются снижение температуры эксплуатации и наличие начального пластического повреждения, вызванного технологическими приемами обработки металлов. При этом основным критерием перехода сталей из вязкого в хрупкое состояние считается уровень поглощенной энергии в момент разрушения стандартных образцов при испытании на ударную вязкость.

На рис. 1 приведены диаграммы хрупковязкого состояния стали 20, полученные на образцах с U-образным, V-образным надрезами и с усталостной трещиной, а также их обобщенный вариант в виде зависимости поглощенной энергии разрушенными образцами от тангенса угла их из-

гиба при разрушении. Анализ диаграмм наглядно показывает, что по мере увеличения степени предварительной пластической деформации образцов (ее осуществляли растяжением) и понижения температуры испытания поглощенная энергия снижается, а твердость по Бринеллю растет. Поглощенная энергия снижается также по мере уменьшения остроты надреза. При этом если за хрупкое состояние стали принять состояние, соответствующее минимальному значению поглощенной энергии, то температуру, соответствующую данному состоянию, можно рассматривать как критическую. Однако, как показывают исследования [2], с увеличением степени предварительной пластической деформации температура, соответствующая минимальному уровню поглощенной энергии, также повышается. Для стали 20 в состоянии поставки минимум поглощенной энергии приходится на температуру  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а для той же стали, но с пластическим повреждением порядка 20% со старением хрупкое состояние наступает уже при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, критическую температуру хрупкости нельзя определять по результатам ударных испытаний образцов из стали в состоянии поставки, так как она в значительной степени зависит от наличия в материале любых пластических повреждений и деградации, вызванной другими причинами. Что касается формы надреза, то для разных значений радиусов вплоть до надреза в виде усталостной трещины общая форма диаграмм сохраняется, а уменьшается только их площадь. При этом минимальное значение поглощенной энергии для трех сравниваемых вариантов остается одинаковым. Важная особенность этих диаграмм (рис. 1, а, б, в) заключается также в том, что процесс и закономерность разрушения образцов с любым видом надреза являются одинаковыми, что выражается зависимостью поглощенной энергии от тангенса угла изгиба образцов (рис. 1, г) [3]:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V_0 + a_v K_\phi b h^2 \text{tg} \Theta, \quad (1)$$

где первое слагаемое представляет энергию упругой деформации, а второе – энергию пластической деформации в общем объеме поглощенной энергии;  $V_0$  – объем образца;  $\sigma$  – предел упругости материала;  $a_v$  – удельная потенциальная энергия пластической деформации образца, являющаяся константой для каждой конкретной плавки стали;  $K_\phi$  – коэффициент формы образца;  $b$  – ширина образца,  $h$  – высота сечения по надрезу;  $\text{tg} \Theta$  – тангенс угла изгиба образца, измеренный после составления его половинок.

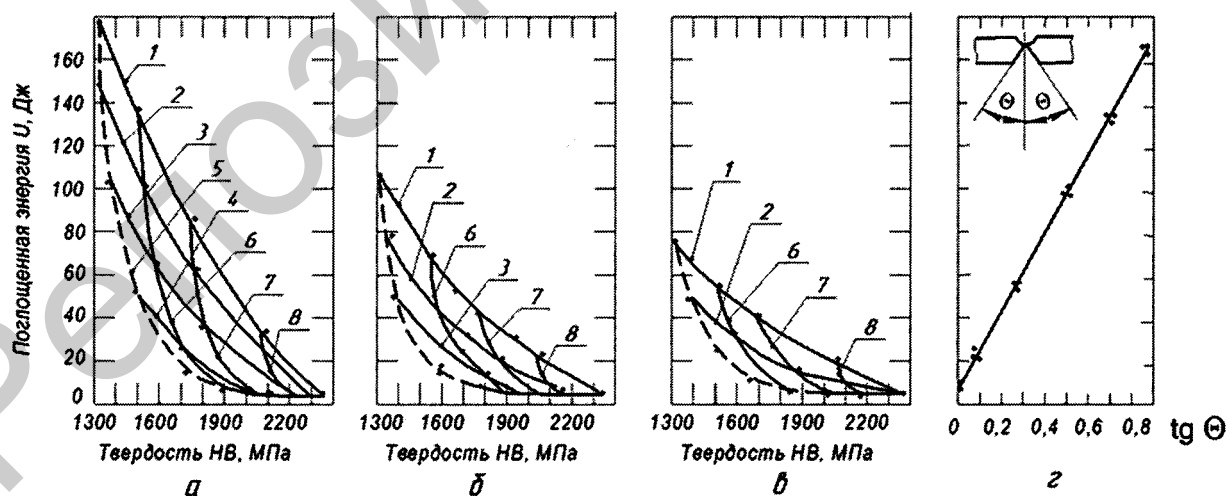


Рис. 1. Диаграммы хрупковязкого состояния стали 20 для образцов с U-образным надрезом (а), V-образным надрезом (б) и с усталостной трещиной (в) по ГОСТ 9454–78 и обобщенный вариант этих диаграмм (г); кривые 1, 2, 3, 4, 5 – температурные испытания соответственно при  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; кривые 6, 7, 8 – уровни предварительной пластической деформации 5%, 10% и начало образования шейки при растяжении соответственно; штриховая линия – снижение поглощенной энергии и повышение твердости стали в состоянии поставки от уменьшения температуры

Диаграммы рис. 1 позволяют получить полную картину поведения материала при ударном изгибе для различных условий испытания и могут быть полезны для научных исследований. Однако для практического применения использование диаграмм (рис. 1, а–в) является затруднительным из-за сложной взаимосвязи поглощенной энергии разрушения с прочностными характеристиками материала. В этом отношении наиболее удобна обобщенная диаграмма (рис. 1, г), так как зависимость поглощенной энергии от тангенса угла изгиба образца, измеренного путем совмещения половинок после его разрушения, является единой для всех типов надрезов. Поэтому данную диаграмму можно использовать для получения расчетных зависимостей между поглощенной при разрушении образца энергией и другими механическими характеристиками материала.

В качестве прочностной характеристики материала по оси абсцисс указанных диаграмм принята шкала твердости по Бринеллю. Это связано с тем, что в процессе деформирования стали от упругого состояния и до момента ее разрушения твердость возрастает от величины в состоянии поставки  $HB_0$  до максимального значения  $HB_{max}$ , соответствующего моменту разрушения и определяемого по формуле

$$HB_{max} = HB_0 e^{\Psi_0}, \quad (2)$$

где  $\Psi_0$  – сертификатное значение относительного сужения.

Следует отметить две характерные точки диаграмм (рис. 1). Верхняя левая точка диаграмм соответствует значению поглощенной энергии и твердости по Бринеллю  $HB_0$  для исходного состояния стали при температуре  $+20^\circ\text{C}$ . Значения указанных величин получают только по результатам экспериментальных исследований. При этом, как показано на рис. 2, для данного состояния стали и температуры испытания количество поглощенной энергии при ударном изгибе выше, чем при статическом.

Нижняя правая точка диаграмм включает в себя одновременно три характеристики:

1. Максимальное значение шкалы твердости  $HB_{max}$ , определяемое по формуле (2).
2. Минимальное значение поглощенной энергии, соответствующее значению  $\Psi_0$  и определяемое по формуле

$$U_{min} = \frac{\sigma_b^2}{2E} V_0, \quad (3)$$

где  $\sigma_b$  – сертификатное значение предела прочности;  $V_0$  – объем образца.

Значение  $\Psi_0$  имеет место в образцах, предварительно деформированных растяжением до начала образования шейки. В этом случае предел упругости ударных образцов, прошедших предварительную вытяжку до такого состояния, становится примерно равным пределу прочности деформированной стали. Поэтому минимальное значение поглощенной энергии, представленной формулой (3), можно определить как первое слагаемое в выражении (1), соответствующее энергии упругой деформации. Достоверность формулы (3) для малоуглеродистых и низколегированных сталей подтверждается данными многочисленных экспериментальных исследований и обработкой результатов испытаний [4]. В то же время считая, что разрушающим напряжением

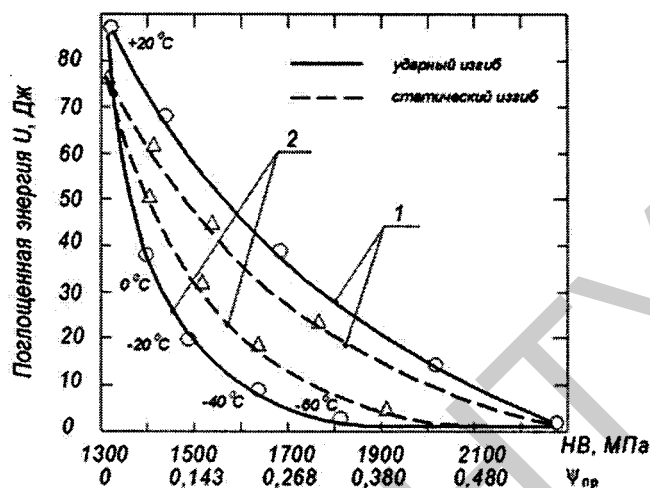


Рис. 2. Сравнение диаграмм хрупковязкого состояния стали ВСтЗпс4 статического и ударного изгиба: 1 – с предварительной пластической деформацией при температуре испытаний  $+20^\circ\text{C}$ ; 2 – без предварительной пластической деформации при температурах испытаний от  $+20^\circ\text{C}$  до  $-20^\circ\text{C}$

в надрезе испытуемого образца является значение истинного предела прочности  $S$ , правомерность применения значения  $\sigma_b$  в выражении (3) подтверждается известной формулой

$$S = \frac{\sigma_b}{1 - \Psi}, \quad (4)$$

так как значение (3) соответствует состоянию стали при нулевом значении  $\Psi_0$ , при котором  $S = \sigma_b$ .

3. **Максимальное значение уровня пластического повреждения  $\Psi_{пр}$** , предшествующее моменту разрушения. При этом, как видно из рис. 2, минимальные значения поглощенной энергии для диаграмм ударного и статического изгиба совпадают. Параметры кривых, соединяющих указанные точки диаграмм, служат базой для универсального метода оценки состояния конструкций способом измерения твердости локально деформированных зон.

Известно [5], что большинство трещин возникает и развивается в максимально пластически поврежденных зонах, появляющихся в результате технологической обработки сталей. Анализ диаграмм хрупковязкого состояния показывает, что обработка с применением пластического деформирования металла, такая как холодная гибка, правка, сварка, значительно снижает исходную пластичность металла и переводит его из вязкого в хрупкое состояние, особенно при отрицательных температурах. Прежде всего, это касается локально деформированных зон конструкции, которые с переходом в хрупкое состояние и становятся зонами будущего возникновения и развития трещин. Определить положение таких зон и оценить их состояние можно по измерению твердости. В указанных зонах трещины возникают и растут по точкам максимальных значений твердости, которая возрастает по мере накопления уровня пластического повреждения.

Замерив контрольную твердость  $HB_k$  на испытуемом (например, аварийном) элементе конструкции, можно определить значение остаточного сужения  $\Psi_k$ , соответствующее уровню накопленной пластической деформации в контрольной зоне [3]:

$$\Psi_k = \ln \frac{HB_k}{HB_0}. \quad (5)$$

Тогда оставшийся запас пластичности локально деформированных зон конструкций составит

$$\Psi_{ост} = \Psi_0 - \Psi_k. \quad (6)$$

Известно [5], что если предварительная пластическая деформация в металле составляет  $\Psi_k \geq 0,4$ , то состояние металла в контрольной локально деформированной зоне будет соответствовать состоянию металла в ниспадающей части диаграммы растяжения, характерному для вязкого разрушения. В этом состоянии в зонах с максимальной твердостью возникают внутренние микро- и макротрещины, которые в дальнейшем увеличивают свои размеры под действием рабочей нагрузки.

Кроме того, как видно из зависимостей (рис. 1, 2), минимальное значение поглощенной энергии, определяемое правой крайней точкой диаграмм, является почти постоянным на протяжении всего нижнего участка и составляет порядка 1,5–2,0 Дж. Образцы в этом состоянии разрушаются хрупко без заметных пластических деформаций как при статическом нагружении, так и при ударном изгибе. Возникающая при этом пластическая деформация, предшествующая хрупкому разрушению, является столь незначительной, что позволяет использовать теорию упругости для расчета напряженного состояния в области надреза. Следовательно, с достаточной степенью точности можно утверждать, что процесс разрушения в этом состоянии подчиняется законам линейной механики разрушения, особенно для образцов с усталостной трещиной. Тогда условия разрушения можно отобразить применяемой здесь моделью, определяя значение критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1c}$  и не прибегая к изготовлению и испытанию специальных контрольных образцов.

Для минимального значения поглощенной энергии в 1,5–2,0 Дж, рассчитанного по формуле (3), величина общего разрушающего напряжения составляет 389–449 МПа, что практически

совпадает со стандартными значениями предела прочности малоуглеродистых сталей, полученными при испытаниях на растяжение, и еще раз подтверждает достоверность формулы (3). Для указанных значений напряжений коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  без учета градуированного коэффициента равен

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi l} = (389-449) \sqrt{3,14 \cdot 0,002} = (30,82-35,6) \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}, \quad (7)$$

что практически совпадает со справочными значениями  $K_{Ic}$  для малоуглеродистых сталей.

Следует отметить, что определение значений  $K_{Ic}$  по предложенной методике существенно упрощает эту операцию по сравнению с определением по стандартным методикам. Использование стандартных методик затруднено из-за необходимости изготовления специальных образцов, точного измерения параметров, входящих в расчетные формулы, наличия жестких требований к критериям. При этом любое отклонение измеряемых величин от нормативных требований приводит к значительным ошибкам. Отмеченные трудности приводят к тому, что величины коэффициентов интенсивности напряжений, определенные различными авторами, значительно расходятся.

Таким образом, рассмотренные диаграммы хрупковязкого состояния служат дополнением к диаграммам растяжения сталей для оценки свойств материалов по энергопоглощению при разрушении. Диаграммы представлены для широкого спектра температур испытаний, различных уровней пластического деформирования (повреждения) сталей, вызванного технологическими приемами обработки, и позволяют исследовать поведение материала от состояния поставки до полного разрушения. Важная особенность диаграмм хрупковязкого состояния заключается в том, что они устанавливают конкретную зависимость между поглощенной энергией при разрушении и твердостью по Бринеллю. Это важно для текущего контроля качества металла, а также выявления и устранения причин, приводящих к охрупчиванию материала, особенно в локальных зонах концентрации деформаций и напряжений, потенциально являющихся зонами возникновения и развития трещины. База для неразрушающего метода оценки состояния конструкции – установленная взаимосвязь между твердостью и пластичностью сталей. Замеряя с помощью портативных приборов твердость локально деформированных зон конструкций, можно обнаружить потенциальную зону возможного возникновения трещины и траекторию ее развития, а также определить уровень накопленной пластической деформации и оставшийся запас пластичности материала. Это позволит полностью контролировать состояние конструкции в процессе эксплуатации и обеспечит ее надежное функционирование.

Диаграммы хрупковязкого состояния являются также полезными и для теоретического определения коэффициента интенсивности напряжений, который в практике расчетов рассматривается как силовой критерий трещиностойкости материала. Установленная взаимосвязь между этим параметром и минимальным значением поглощенной при разрушении энергии, которое является одинаковым как для ударного, так для статического нагружения, позволяет определить коэффициент интенсивности напряжений с помощью простой формулы и с достаточной степенью точности.

#### Литература

1. Жданович Г. М., Хмелев А. А. // Проблемы прочности. 1981. № 1. С. 85–89.
2. Хмелев А. А., Сидоров В. А. Механика разрушения. Мн., 2007.
3. Хмелев А. А., Реут Л. Е. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2009. № 2. С. 71–75.
4. Барсом Дж., Рольф С. В сб.: Ударные испытания металлов. М., 1973. С. 277–296.
5. Хмелев А. А., Сидоров В. А. В сб.: Теоретическая и прикладная механика. Мн., 2002. С. 181–185.

*A. A. HMELEV, L. E. REUT, V. A. SIDOROV*

#### UNIVERSAL ESTIMATION OF QUALITY OF STEELS UNDER DIAGRAMS OF FRAGILE-VISCOUS CONDITION

#### Summary

Based on diagrams of fragile-viscous condition of low-carbon steels, a nondestructive method of control of condition of a design for detection of places of possible occurrence and development of cracks is offered. The interrelation between hardness of steels and degree of their plastic damage, and also between hardness and quantity of the absorbed energy is established at shock destruction. Formulas for theoretical definition of the absorbed energy are offered at shock destruction of samples, and also for definition of level of the saved up plastic deformation and the remained stock of plasticity of a material. A formula for calculation of factor of intensity of pressure is offered.