

по определению неупругой составляющей сжатия ткани Т-13 / Василевич Ю.В., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Горелый К.А, Малютин Е.В.// Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – №4 (17). – С.63–65.

УДК 620.178.7

Василевич Ю.В., Мойсейчик А.Е., Мойсейчик Е.А.

О ВЗАИМОСВЯЗИ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛИ С ДЕФОРМАЦИОННЫМ ТЕПЛОБРАЗОВАНИЕМ В НАДРЕЗЕ

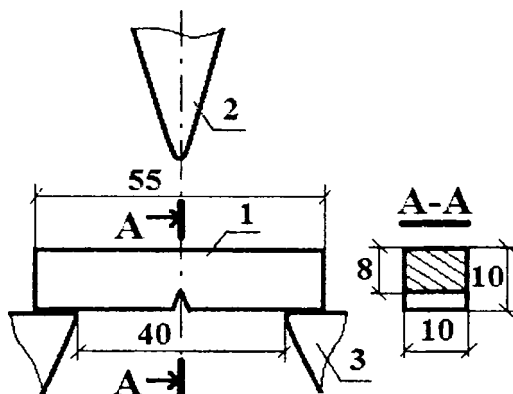
Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье отмечаются недостатки существующей методики определения ударной вязкости при низких температурах по ГОСТ 9454-78. Указывается, что при таких испытаниях лишь качественно регламентируется продолжительность установки охлажденного образца в копер, при отсутствии точных замеров температуры образца в момент удара маятником. Температура образца в этот момент принимается равной температуре охлаждающей среды холодильной камеры. Не учитывается неопределенность вследствие изменения температуры в корне надреза в момент удара из-за вклада деформационного тепла. На основании выполненного анализа делается вывод, что величина экспериментально определяемой ударной вязкости стали зависит не только от ее механических характеристик, но и теплофизических свойств.

Ключевые слова: сталь, ударная вязкость, деформационное тепло

Введение. При выборе и приемосдаточных испытаниях сталей для металлоконструкций их склонность к хрупкому разрушению оценивают по величине ударной вязкости, определяемой в соответствии с ГОСТ 9454-78[1]. Этот способ испытания стали имеет свою историю[2]. Стандартный метод ударных испытаний [1] проявляет комплексное действие на сталь трех факторов: надреза, температуры, скорости приложения нагрузки. Для конструирования конкретных изделий часто необходимо учитывать при ударных испытаниях влияние на сталь и других факторов (толщины элемента, сварочных и др. воздействий) [3]. В соответствии с ГОСТ 9454-78 нагружение испытуемого при данной температуре образца с одним из трех типов надрезов (U,V,T) производят по схеме рис. 1.



1-стандартный образец с надрезом типа U,V,T; 2-нож маятника; 3-опоры копра

Рис. 1 – Схема испытаний образцов на ударную вязкость

При испытаниях с охлаждением ГОСТ 9454-78 лишь качественно регламентирует продолжительность установки охлажденного образца в копер, без точных замеров температуры образца в момент удара маятником копра. При этом температура образца в момент удара принимается равной температуре охлаждающей среды. Дополнительную неопределенность вносит деформационное тепло, возникающее в корне надреза в момент удара. Конкретный тип надреза образца применяется в зависимости от особенностей работы материала в составе конструкции. Так, для строительных металлоконструкций наиболее распространен метод ударных испытаний по Шарпи [4]. При этом нужно

иметь в виду, что тип надреза образца сказывается на величине пластически деформируемой области в корне надреза и количестве выделяющегося деформационного тепла.

Целью статьи является установление взаимосвязи между ударной вязкостью стали и теплообразованием при пластическом деформировании в надрезе.

Работа и нагрузка на образец. Ударная вязкость определяется по выражению (1):

$$K_C = K/A, \quad (1)$$

где K - работа удара; A - начальная площадь поперечного сечения в месте расположения надреза, концентратора (сечение $A-A$).

Работа K , затраченная на деформацию и разрушение образца, без учета потерь на трение, будет равна разности потенциальных энергий маятника копра в исходном положении и после удара $K = mg(H_1 - H_2)$, где mg - вес маятника; H_1, H_2 - соответственно, высота подъема маятника до удара по образцу и после удара. Высоты H_1 и H_2 определяются через длину маятника l , угол начального подъема α и угол взлета маятника после удара β : $H_1 = l(1 - \cos\alpha)$; $H_2 = l(1 - \cos\beta)$. Работа маятника, затраченная на трение в подшипниках и трение о воздух, будет равна $A_{тр} = mgl(\cos\beta_0 - \cos\alpha_1)$, где угол β_0 - угол взлета маятника при его свободном падении при отсутствии образца. За счет потерь на трение угол β_0 должен быть несколько меньше начального угла α_1 .

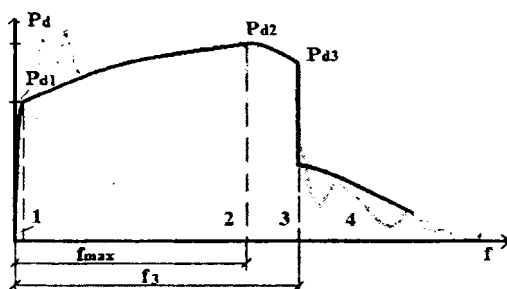


Рис. 2 – Опытная осциллограмма «нагрузка-перемещение» (серый цвет) и ее схематизированное представление (черная линия) для образца с U-образным надрезом из низкоуглеродистой стали

На рис.2 показана типичная осциллограмма, получаемая при испытаниях на ударный изгиб стандартных образцов из стали ВСтЗсп. При пониженных температурах уменьшается площадь области 2 (вплоть до нуля) и при квазихрупком разрушении диаграмма представляется суммой площадей 1,3,4, а при хрупком – 1 и 4 [4]. Диаграмма рисунка 2 подобна соответствующей диаграмме, получаемой при статическом нагружении стандартного образца, но в случае удара время действия нагрузки намного меньше. Высокая ударная вязкость определяется, в основном, площадью 2, соответствующей энергии, затрачиваемой на зарождение разрушения. Энергия, необходимая для развития трещины (область 3) и образования боковых сколов в изломе (область 4) уменьшается с понижением температуры испытания и ростом скорости удара[4].

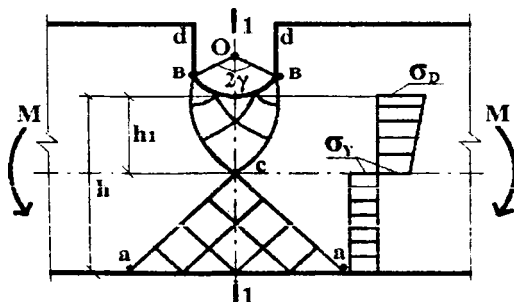


Рис. 3 – Схема пластического течения и распределения изгибных напряжений в ослабленном сечении стандартного образца с U-образным надрезом (стадии нагружения 1 и 2)

Деформирование и теплообразование в образце с U-образным надрезом. Рассмотрим упрощенную модель нагружения стандартного образца с U-образным надрезом (рис. 3) и схематичным полем скольжения в области, примыкающем к сечению 1-1.

Изменение напряженного состояния стандартного образца с *U*-образным надрезом можно проследить при статическом нагружении поперечной силой твердотельной модели (рис.4) и анализе напряженного состояния методом конечного элемента в среде программного комплекса ANSYS. При этом работу материала (сталь ВСтЗсп) моделируем диаграммой с линейным самоупрочнением. Полученные при расчете распределение касательных, нормальных и эквивалентных напряжений (по Мизесу) при статической нагрузке на образец, соответствующей стадии самоупрочнения стали, приведено на рисунках 4, 5, 6.

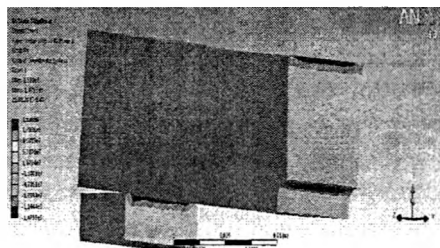


Рис. 4 – Распределение касательных напряжений в окрестности ослабленного сечения стандартного образца с *U*-образным надрезом

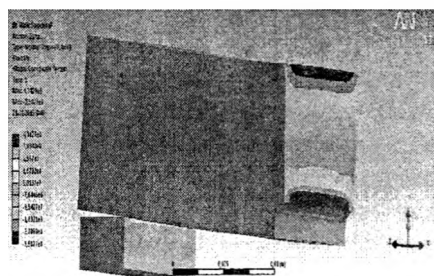


Рис. 5 – Распределение нормальных напряжений в окрестности ослабленного сечения стандартного образца с *U*-образным надрезом

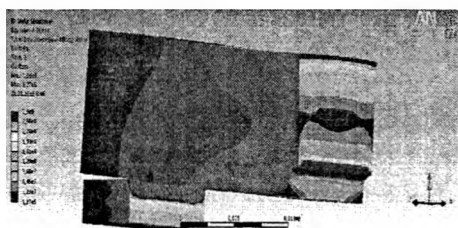


Рис. 6 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в окрестности ослабленного сечения стандартного образца с *U*-образным надрезом

При статическом нагружении такого образца из упруго-пластического тела деформации постепенно развиваются с увеличением нагрузки. При этом упругие области вначале сдерживают деформацию тела и немного охлаждают его [5-7], далее это сдерживающее влияние ослабляется и в некоторый момент наступает пластическое течение, отвечающее предельному состоянию образца. При этом происходит локализация пластических деформаций. На поверхности эти деформации проявляются в форме фигур течения. У надреза пластическое течение происходит не во всем примыкающем к надрезу объеме, а по отдельным поверхностям скольжения. На этих внутренних поверхностях скольжения инициируются деформацией физико-химические реакции, сопровождающиеся выделением тепла. При статическом нагружении средняя по охваченному пластической деформацией объему стали может достигать нескольких десятков градусов [5-7]. При этом источниками тепла являются полосы скольжения, температура нагрева которых значительно выше средней по объему. Термография растянутых стальных образцов показывает, что распределение температуры деформационного нагрева качественно соответствует распределению напряжений как в упругой [8], так и упруго-пластической стадиях работы стали [7].

При динамическом нагружении область, охваченная пластическими деформациями будет меньше.

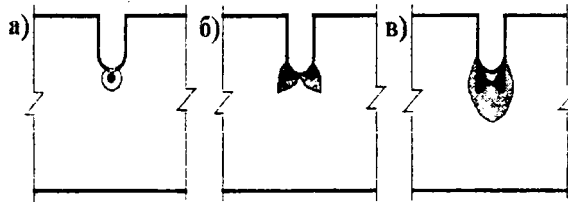


Рис. 7 – Стадии развития пластических деформаций и нагрева у надреза при статическом нагружении: а-начало текучести; б-стадия самоупрочнения; в-стадия предразрушения

Кратковременность нагрузки приводит к адиабатическому нагреву, сопровождающемуся более значительным повышением температуры в окрестности надреза. При этом развитие нагрева в окрестности U-образного надреза, как будет показано в последующих главах, развивается от ядра деформации по направлениям наибольших касательных напряжений. На рис.7 показаны стадии развития пластических деформаций и нагрева у надреза при медленном нагружении. При ударной нагрузке вероятнее всего реализуется стадия а) или частично б) и нагрева в зоне а-с-а не происходит. Если допустить, что нагрев полос скольжения в окрестности надреза возможен на десятки (сотни) градусов, то учитывая высокую скорость нагрева этих участков, в зоне надреза возможно усиление неравномерности деформаций из-за ее температурных составляющих.

Учитывая эпюру напряжений рис.3 можно определить предельный момент, воспринимаемый сечением 1-1 и в первом приближении найти его выражение через ударную вязкость.

Положение нейтральной оси сечения 1-1 и высота растянутой зоны h_1 определяются из условия равновесия (равенства) внутренних растягивающих и сжимающих усилий(2):

$$\sigma_y b h_1 \left(\frac{k_d + 1}{2} \right) - \sigma_y b (h - h_1) = 0, \quad (2)$$

где: b -ширина сечения 1-1 образца; k_d - коэффициент динамичности; $\sigma_d = k_d \sigma_d$.

Тогда $h_1 = 2h / (3 + k_d)$. При падении с высоты $(H_1 - H_2) = \Delta H$ маятник копра за время Δt производит удар по образцу силой $F_d = m \sqrt{2g\Delta H} / \Delta t$, которая вызовет в сечении 1-1 изгибающий момент (3):

$$M_d = \frac{m l \sqrt{2g\Delta H}}{4\Delta t} = \frac{b h l (KC)}{n f_y}, \quad (3)$$

где: KC - ударная вязкость; $n = 1 + 2 \left(\frac{f_p}{f_y} - 1 \right)$; $f = f_y + f_p$ - величина полного прогиба образца,

представляющего сумму прогиба при упругой и пластической стадиях работы материала.

Изгибающий момент M (рис.3) может быть выражен как момент внутренних усилий по выражению

$$M = \sigma_y b h^2 N(k_d),$$

где: $N(k_d) = \frac{1}{2} + \frac{k_d - 1}{3} + \frac{(k_d + 1)^2}{4}$. Из условия $M_d \leq M$ получаем, что

$$KC \leq \sigma_y \left(\frac{2h}{3 + k_d} \right) n N(k_d) f_y. \quad (4)$$

Учитывая зависимость ударной вязкости, предела текучести, коэффициента динамичности, пластической составляющей прогиба от температуры среды и от внутреннего деформационного нагрева получим из выражения (4), что при фиксированных форме образца и типе надреза, скорости нагружения и температуре среды t безразмерный критерий

$$KC(t) / \sigma_y(t) f_y \leq n(t) \cdot const \quad (5)$$

где в основном $n(t)$ зависит от способности металла образца производить при фиксированной скорости нагружения и температуре среды большее количество деформационного тепла и быстро его

распределять в примыкающие к источнику тепла объемы. Способность металла быстрее или медленнее распределять тепло определяется его температуропроводностью [9]. Это означает, что безразмерный критерий в левой части неравенства (5) будет функцией температуропроводности. Для металлов с высокой способностью отводить тепло (золото, медь, алюминий) не должно быть резкого провала в ходе температурной зависимости ударной вязкости. Для сталей такой провал наблюдается и он определяет по существующим нормам работоспособность стали при низкой температуре. Практическое применение выражения (4) для оценки работоспособности в настоящее время затруднено вследствие отсутствия в справочной литературе теплофизических характеристик в температурных диапазонах, соответствующих аналогичным данным по механическим свойствам для разных марок сталей (экспериментально исследован ход температурных кривых ударной вязкости, предела текучести, а ход теплопроводности и теплоемкости в справочной и специальной литературе не освещен).

Заключение. Таким образом, величина экспериментально определяемой ударной вязкости стали зависит не только от ее механических характеристик, но и теплофизических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9454-78. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных комнатной и повышенных температурах.- М.: Издательство стандартов. - 1990. - 14с.
2. Финни И. Исторические этапы развития современного представления о хрупкопластическом переходе в сталях/ И. Финни, Р. Мейвил//Современное машиностроение.-Сер.Б.-1990.-№6.-С.42-47.
3. Мэттьюз У. Роль ударных испытаний при оценке вязкости разрушения материалов//В кн.: Ударные испытания металлов. Под ред. Дроздовского Б.А.и Морозова Е.М.- М.:Мир,1973.-С.13-29.
4. Тылкин М.А., Большаков В.И., Одесский П.Д. Структура и свойства строительной стали.- М.: Металлургия, 1983. - 287с.
5. Лукин Е.С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту. Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд.техн.наук.- Якутск:ИФТПС РАН,2005г.-23с.
6. Реморов,В.Е.Научно-методические основы исследования трещиностойкости металла по тепловому эффекту пластической деформации в зоне разрушения: автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук/ В. Е. Реморов. - Новокузнецк, 1998. - 41 с.
7. Мойсейчик Е.А. О деформационном теплообразовании в элементах стальных строительных конструкций из низкоуглеродистой стали/ Мойсейчик Е.А., Шафрай С.Д.// Известия вузов. Строительство.- 2012- № 7-8.-С.101-109.