

собственной технологии и оборудования для перехода на водородное энергообеспечение.

В качестве второго примера, демонстрирующего потенциальные возможности применения ТЭ в Белоруссии, можно рассмотреть системы автономного энерго- и тепло обеспечения фермерских хозяйств, небольших городов и поселков, военных объектов и жилых комплексов, промышленных предприятий и медицинских учреждений. Существенное уменьшение затрат на энергообеспечение производственных процессов, жилищно-коммунального хозяйства и объектов социальной

значимости позволило бы уменьшить зависимость нашей страны от экспорта энергоносителей и улучшить экологическую ситуацию во многих городах и населенных пунктах Беларуси.

И, наконец, применение новейших технологий производства водорода на предприятиях нефтехимического комплекса страны (например, на гродненском азоте) позволило бы существенно сократить потребление импортируемого природного газа и улучшить экологическую обстановку во многих промышленных зонах республики.

УДК 620.178.64

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ С ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕМ

П.П. Пётух, С.М. Красневский, Ц.Д. Сорохан, И.И. Герасимчик, Г.О. Яровой

Испытания на ударный изгиб являются важнейшей составляющей метода оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению, как наиболее опасному и происходящему при уровнях действующих напряжений существенно ниже предела текучести материала. Нормативный уровень трещиностойкости ответственных стальных конструкций, таких как, сосуды, работающие под давлением, магистральные трубопроводы, грузоподъемные механизмы и др. оценивается в заводских условиях в основном по величине ударной вязкости, которую определяют при испытаниях на ударный изгиб. Малый размер образца, простота изготовления и проведения испытаний по определению ударной вязкости, достаточно высокая ее чувствительность к изменению свойств материалов способствовали широкому внедрению этой характеристики для оценки качества металла труб и другого оборудования.

В настоящее время характеристики материалов, получаемые при испытаниях на ударный изгиб, являются основополагающими при выборе материалов, расчетах на прочность стальных конструкций и прогнозировании их остаточного ресурса.

Испытания на ударный изгиб проводят по ГОСТ 9454-78, который соответствует аналогичным зарубежным стандартам, например EN 10045-1. Согласно этим стандартам для испытаний используют специальные машины – ударные маятниковые копры.

При этом одним ударом маятника разрушают надрезанный посередине образец, который предварительно располагают на специальных опорах. В результате однократного испытания фиксируют работу разрушения образца A (Дж) или ударную вязкость $KС$ (Дж/см²) – частное от деления работы разрушения на нетто сечение образца в зоне надреза.

Следует отметить, что результаты проведенных испытаний на ударный изгиб, отражают характер перехода материалов элементов металлоконструкций в хрупкое состояние при снижении климатических температур в процессе эксплуатации.

Однако развитие современных методов оценки прочности конструктивных высоконагруженных элементов при наличии дефектов указывает на то, что недостаточно знать одну лишь характеристику ударной вязкости, как величину, характеризующую весь процесс разрушения в целом. Ударная вязкость является интегральной характеристикой материала, зависящей как от его прочностных, так и пластических свойств, по-разному влияющих на трещиностойкость материалов.

Из анализа поведения образца при испытаниях, становится ясно, что процесс разрушения можно разделить на два основных этапа: зарождение трещины и ее развитие (распространение). В соответствии с этим, разделяются и рассчитываются полная работа и ударная вязкость разрушения. На практике это достигается с помощью метода осциллографирования, путем записи диаграммы

всего процесса разрушения образца в специальный файл данных на ПЭВМ.

Основные методические положения проведения испытаний с осциллографированием отражены в литературе [1–3]. Для реализации метода осциллографирования необходимо наличие инструментированного маятникового копра, позволяющего производить высокоточные испытания на ударный изгиб с регистрацией диаграмм динамического разрушения образцов с последующим сохранением и обработкой полученных результатов.

По имеющимся сведениям такая испытательная техника, как инструментированные копры, отечественной промышленностью не выпускаются, а высокая стоимость зарубежных аналогов резко ограничивает внедрение перспективного метода исследования. Поэтому с целью решения указанных задач, в лаборатории Прикладной механики ГНУ "ФТИ НАН Б" в рамках государственной научно-технической программы: "Разработать и изготовить приборы для научных исследований" для проведения механических испытаний материалов на ударный изгиб был создан автоматизированный комплекс АК-15/30 на базе маятникового копра PSWO-15/30, а также разработаны программное и методическое обеспечения к нему.

Использование метода осциллографирования при испытаниях позволяет записать полную диаграмму динамического разрушения образца в координатах «усилие сопротивления образца разрушению P – прогиб образца при разрушении S » («усилие – прогиб»). Пример такой диаграммы, записанной с помощью автоматизированного комплекса АК-15/30 при разрушении образца Шарпи с V-образным надрезом, представлен на рис.1. Диаграмма является исходным массивом данных для определения ряда характеристик, используемых при расчетах металлоконструкций на хрупкую прочность методами современной механики разрушения.

Среди критериальных значений, характеризующих состояние материала при разрушении, следует отметить статическую K_{lc} и динамическую K_{Id} трещиностойкости, критическую температуру хрупкости T_k , а также работы, затраченные на различных стадиях разрушения образца: полную работу разрушения A , работу зарождения $A_{зт}$ и распространения $A_{рт}$ трещины.

При стандартных испытаниях на ударный изгиб работа A (Дж), затраченная на разрушение образца, определяется по шкале маятникового копра как разница между энергией маятника до и после

удара:

$$A = \frac{(V_n^2 - V_k^2) \cdot m_m}{2}, \quad (1)$$

где V_n – скорость маятника до удара, V_k – скорость маятника после удара, m_m – масса маятника.

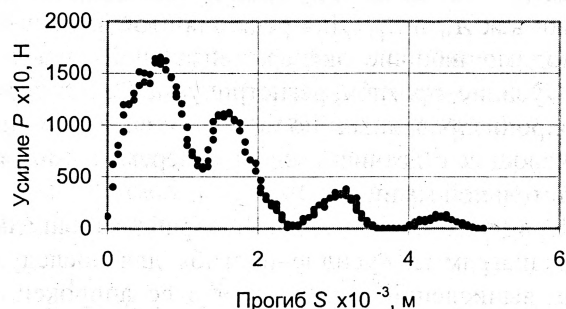


Рис.1. Диаграмма разрушения образца в координатах «усилие–прогиб»

Скорость маятника после удара V_k меньше скорости маятника до удара V_n на величину потерь в скорости, вызванных работой по разрушению, и может быть определена из закона сохранения количества движения (с учетом нулевой скорости образца перед ударом):

$$m_m V_n = m_m V_k + m_{об} V_{об}, \quad (2)$$

где $m_{об}$ – масса образца, $V_{об}$ – скорость образца после удара.

Отсюда скорость маятника после удара:

$$V_k = V_n - m_{об} V_{об} / m_m \quad (3)$$

Полную работу разрушения A можно определить, также, записав полную диаграмму динамического разрушения образца в координатах «усилие сопротивления образца разрушению P – время разрушения образца t » («усилие–время»). В выражении (3) произведение массы образца на его скорость есть импульс силы F , действующей на образец в процессе удара: $I_f = m_{об} V_{об}$. Импульс силы за время ее действия t можно определить как площадь под кривой на диаграмме «усилие–время»:

$$I_f = \int_0^t F(t) dt \quad (4)$$

Подставляя (3) в (1), получим выражение для расчета работы, затраченной на разрушение образца:

$$A = I_f \left(V_m - \frac{I_f}{2m_m} \right). \quad (5)$$

Исходя из того, что работа, затраченная на разрушение образца, включает в себя работу зарождения

дения $A_{зт}$ и работу распространения $A_{рғ}$ трещины в образце можно записать следующее выражение:

$$A = A_{зт} + A_{рғ}. \quad (6)$$

Поэтому использование стандартной шкалы маятникового копра или даже диаграммы «усилие-время» не позволяет определить такие характеристики как $A_{зт}$ и $A_{рғ}$. Для решения этой задачи необходимо наличие экспериментальной диаграммы «усилие-прогиб», регистрируемой с помощью синхронизированных по времени сигналов, поступающих с датчиков силы и перемещения испытательной машины.

Первичная математическая обработка записанной диаграммы «усилие-прогиб» для последующих вычислений заключается в ее аппроксимации функциональной зависимостью, которая в заданных пределах области значений аргумента дает максимальное приближение к реальной физической кривой.

Из анализа изображенной на рис. 2 сглаженной диаграммы разрушения следует, что сила сопротивления образца при его прогибе имеет тенденцию возрастания только до определенного момента, который можно условно назвать моментом зарождения (образования) трещины. С началом же продвижения трещины в материале сила сопротивления образца разрушению снижается.

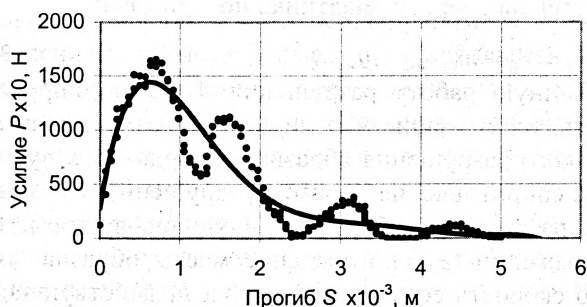


Рис.2. Аппроксимированная диаграмма разрушения образца

Тогда полную работу разрушения образца, работу зарождения трещины и ее распространения можно определять по диаграмме «усилие-прогиб» используя соответственно следующие выражения:

$$A = \int_0^{S_K} F(S) dS, \quad (7)$$

$$A_{зт} = \int_0^{S_{тр}} F(S) dS, \quad (8)$$

$$A_{рғ} = \int_{S_{тр}}^{S_K} F(S) dS, \quad (9)$$

где S_K и $S_{тр}$ – значение максимального прогиба образца при полном разрушении и прогиба при максимальном усилии.

В качестве сравнительного критерия, позволяющего оценить достоверность определения полной работы разрушения образцов A по записанным диаграммам «усилие-время» и «усилие-прогиб» выступает измерительная шкала маятникового копра, с помощью которой регистрируют полную работу при стандартных испытаниях на ударный изгиб [4].

На рис. 3 представлены значения полных работ разрушения образцов A , изготовленных из низколегированных трубных сталей, измеренных по шкале маятникового копра, и работ рассчитанных по диаграммам «усилие-время» ($V_H = 5,6$ м/с, $m_m = 73,5$ Н) и «усилие-прогиб».

Сравнение приведенных на рис.3 графиков позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности определения работы разрушения по сигналам с датчиков, размещенных на маятниковом копре. Следовательно, этот вывод можно распространить и на последующие результаты расчетов работ по зарождению и распространению трещины в процессе разрушения образца.



Рис.3. Полная работа разрушения по шкале маятника и по диаграммам «усилие-время» и «усилие-прогиб»

Приведем пример непосредственного использования результатов получаемых при испытаниях образцов Шарпи (тип 11-14 [4]) с разделением работ разрушения. Как уже было отмечено, одной из основных задач при исследовании фактического состояния металла действующих магистральных трубопроводов, является достоверная оценка возможности его хрупкого разрушения. Известно, что практически во всех конструкциях подобного рода присутствуют дефекты, образующиеся и развивающиеся в процессе всего их жизненного

цикла. Поэтому при испытаниях следует определять удельную работу, затраченную на разрушение образцов с уже сформировавшейся трещиной. Удельная работа $a_{рт}$ определяется как частное от деления работы $A_{рт}$ на площадь поперечного нетто-сечения F_0 образца.

Серия проведенных испытаний на ударный изгиб образцов с усталостной трещиной (тип 15 [4]), изготовленных из прилегающих к зонам разрушения металла (сталь 17ГС, сталь 17Г1С) ряда разрушившихся магистральных трубопроводов, позволила установить, что при хрупких разрушениях максимальное значение работы $a_{рт}$ не превышает 10 Дж/см², а случае вязкого разрушения $a_{рт}$ всегда больше 12 Дж/см². Характеры изломов (хрупкий, вязкий) образцов, в большинстве своем соответствуют изломам, отмеченным при разрушениях реальных трубопроводов. Исходя из этого, для исключения возможности хрупкого разрушения, значение $a_{рт}$, определяемое при испытаниях образцов Шарпи с оцилографированием, должно быть не менее 12 Дж/см².

В настоящее время для определения статической трещиностойкости K_{Ic} (критического коэффициента интенсивности напряжений (ККИН) при статической нагрузке) материала в условиях плоской деформации, существуют надежные и апробированные методики. Однако для конструкционных сталей при толщинах от 3 до 40 мм возможности определения K_{Ic} в условиях климатических температур существенно ограничены высокой пластичностью этих сталей при малых скоростях деформирования. Поэтому для сталей низкой и средней прочности наиболее приемлемо определять ККИН при динамическом нагружении K_{I_d} , соблюдая условие плоской деформации. Эффективным способом определения K_{I_d} для трубных сталей в широком диапазоне температур являются испытания образцов Шарпи на ударный изгиб с записью полной диаграммы динамического разрушения (см. рис. 1). При этом для корректности, необходимо учитывать, что в результате регистрации кратковременного процесса разрушения образцов первый пик на диаграммах «усилие-время» или «усилие-прогиб» представляет собой не только характеристику процесса разрушения, но и характеристику локального удара в системе «маятник – образец – опорная рама копра». Таким образом, измеряемая в первом кратком периоде нагружения (около 10 мкс) нагрузка на маятнике в основном зависит от реакции массы образца и его упругих свойств. При испытаниях это влияние особенно значимо в случае хруп-

кого разрушения образцов. Второй и третий пики на диаграмме разрушения представляют собой функцию, как первичного удара, так и поведения материала образца при разрушении. Известно, что при испытаниях образцов с усталостной трещиной со скоростью нагружения $V_n = 5,6$ м/с величина динамической составляющей, обусловленная инерционными силами, может составлять до 50% от регистрируемого максимального усилия [5]. Наличие указанного явления обуславливает необходимость введения инерционной поправки при расчете K_{I_d} . Для определения величины инерционной поправки при поперечном ударном изгибе используется следующая формула:

$$Q_{и} = \frac{17}{35} \cdot m_{об} \cdot \frac{V_n^2}{2f_{max}}, \quad (10)$$

где $Q_{и}$ – расчетное инерционное усилие, f_{max} – прогиб образца при максимальной нагрузке.

Исходя из проведенного анализа серии записанных с помощью автоматизированного комплекса АК-15/30 диаграмм разрушения низколегированных трубных сталей установлено, что величина прогиба образца при максимальной нагрузке варьируется в достаточно узком диапазоне значений (от 0,6 до 0,8 мм). Отсюда величина инерционного усилия $Q_{и}$, для исследованного массива результатов испытаний, составляет не более 653 Н (не более 4% от максимального усилия). Этот результат позволяет считать, что при имеющихся исходных параметрах (жесткость, скорость, масса и др.) система «образец – молот – опорная рама копра» находится при ударе в квазиравновесном состоянии. Поэтому полученные при расчете нагрузки, с учетом инерционной поправки отражают величину реального усилия, действующего на образец, и могут быть использованы для расчетов. В частности, для определения K_{I_d} испытываются образцы с усталостными трещинами. При этом для расчета используется следующая формула [5]:

$$K_{I_d} = Y \cdot \frac{1,5 \cdot P_p \cdot L \cdot \sqrt{l}}{t \cdot b^2}, \quad (11)$$

где P_p – разрушающая нагрузка, Н, определяемая с учетом инерционной поправки ($P_p = P_{max} - Q_{и}$), l – длина трещины, мм, t и b – толщина и высота образца мм, соответственно, Y – безразмерная функция отношения l/b .

На рис. 4 представлены температурные зависимости K_{I_d} , полученные при испытаниях на ударный изгиб образцов с усталостной трещиной

(сталь 17ГС) и рассчитанные по формуле (11). Для сравнения, там же, приведены значения K_{Ic} при статическом нагружении по схеме трехточечного изгиба для этой же стали на образцах такого же типа.

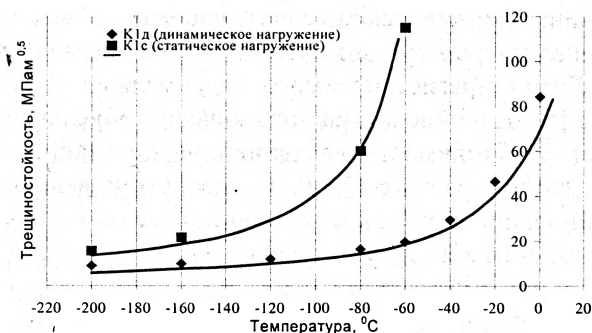


Рис.4. Температурные зависимости статической и динамической трещиностойкости материала (сталь 17ГС)

На рис. 5 показаны температурные зависимости предельных деформаций (прогибов $f_{пр}$) при динамическом нагружении испытанных образцов. По характеру кривой (увеличение прогиба с ростом температуры) видно, что область разрушений с ограниченной пластической деформацией, в которой оправдано использование зависимости (10), лежит при температурах ниже 0°C . Определение значений K_{Ic} для этой же стали на однотипных образцах правомерно при температурах ниже минус 120°C , так как лишь в этом температурном диапазоне выполняется условие плоской деформации в вершине развивающейся трещины при разрушении.

Таким образом, испытания на ударный изгиб с регистрацией диаграммы динамического разрушения позволяют на более качественном уровне оценивать склонность материалов к хрупким разрушениям. Получать основные критериальные характеристики исследуемого материала, исполь-

УДК 629.113-585

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ В УПРАВЛЕНИИ СЦЕПЛЕНИЯМИ АВТОМОБИЛЕЙ

Ю.М. Захарик, к.т.н., завод "МАЗ-Кунава"

Разработка микропроцессорной системы управления сцеплениями (МПСУС) является одним из этапов создания автоматически управляемого сцепления. Известны системы управления на основе аналоговых вычислительных устройств. Од-

нако, при использовании микропроцессорной техники за счет более точной реализации оптимальных, достаточно сложных законов управления улучшаются статические и динамические характеристики системы управления. Реализация

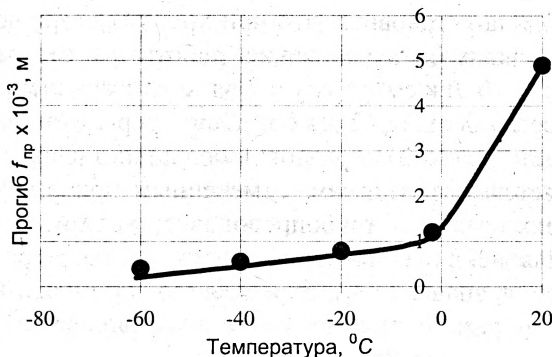


Рис.5. Температурная зависимость предельных прогибов $f_{пр}$ образцов при разрушении (сталь 17ГС)

Литература

1. Значковский О.Я., Новиков Н.В. //Проблемы прочности 1972. №12. С.55-57.
2. Житенев В.В., Маркочев В.М.//Заводская лаборатория 1980. №10. С.956-959.
3. Караев А.Б., Сугирбеков Б.А.// Заводская лаборатория 1989. Т. 55, №3. С.48-52.
4. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Сугирбеков Б.А.//Заводская лаборатория 1989. №11. С.89-91.