

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА С-ОБРАЗНЫХ И ТОРООБРАЗНЫХ ОБРАЗЦАХ С НАДРЕЗОМ

В. И. Астафьев

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),  
vlast@ssu.samara.ru*

В докладе изложена методика определения трещиностойкости (вязкости разрушения) тонкостенных криволинейных трубопроводов линий подачи горючего авиационных двигателей, энергетических установок и ЖРД, нагруженных внутренним давлением.

Существующий в настоящее время отечественный стандарт ГОСТ 25.506-85 по определению характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) материалов при статическом нагружении не рассматривает возможность использования при испытаниях С-образных или торообразных образцов с надрезом [1], максимально моделирующих условия разрушения подобных трубопроводов. Следует отметить, что испытания на внецентренное растяжение С-образных образцов с надрезом включены в стандарт ASTM E 399-83 и более поздние редакции этого стандарта [2]. Однако размеры образцов допускают реализацию испытаний в соответствии с этим стандартом лишь для трубопроводных систем достаточно большого диаметра ( $d > 150$  мм). В связи с этим возникает проблема при испытаниях на трещиностойкость трубопроводных систем малого и среднего диаметра ( $d = 50-70$  мм). Материалами данных трубопроводов, как правило, являются стали и сплавы, обладающие значительным сопротивлением развитию трещин, что приводит к накоплению пластических деформаций в трубопроводе перед его разрушением. Следовательно, возникает задача о разработке методики испытаний тонкостенных трубопроводных систем малого и среднего диаметра, базирующейся на подходах механики упруго-пластического разрушения.

Основной характеристикой механики упруго-пластического разрушения является величина  $J_c$  – критическое значение  $J$ -интеграла Черепанова-Райса [3]. Учитывая, что  $J = -\partial U / \partial l$ , где  $U$  – упругая энергия тела с трещиной  $l$ , для изгибаемого моментом  $M$  тонкого криволинейного стержня с трещиной глубиной  $l$  в среднем поперечном сечении можно записать, что

$$K_l = \sqrt{EJ} = M \sqrt{\frac{\beta_M}{hI_0} \left( \frac{I_0}{I_1} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина стенки трубопровода,  $I_0$  и  $I_1$  – момент инерции поперечного сечения С-образного или торообразного образца для испытаний в ненадрезанном состоянии и с надрезом глубиной  $l$  относительно нейтральной оси,  $\beta_M$  – эмпирический поправочный коэффициент, зависящий от способа приложения нагрузки (при трехточечном изгибе криволинейного образца  $\beta_M = 1.32$ ).

Таким образом, процедура испытаний на трещиностойкость трубопроводных систем малого и среднего диаметра следующая.

1. Для С-образных образцов -

- из стенки трубопровода в поперечном направлении к ее оси вырезаются кольца шириной  $B=(6-8)h$ , из которых изготавливаются С-образные образцы на трехточечный изгиб диаметра  $d$  ( $d$  - диаметр трубопровода в поперечном направлении) с начальной стрелой прогиба  $d_0=(0.3-0.4)d$  и центральным эррозионным надрезом  $l_0=(0.4-0.5)h$ ,
- образцы нагружаются на трехточечный изгиб с записью диаграммы нагрузка  $P$  - уменьшение стрелы прогиба  $\Delta=d_0-d$ ,
- по предельному значению приложенной нагрузки  $P_c$  вычисляется соответствующее предельное значение изгибающего момента  $M_c$  в ослабленном сечении образца, по которому в соответствии с формулой (1) вычисляется  $K_{Ic}$  - трещиностойкость или вязкость разрушения материала вдоль оси трубопровода.

2. В случае торообразных образцов –

- из торообразного коллектора изготавливаются криволинейные образцы на трехточечный изгиб двойной кривизны  $d$  и  $D$  ( $d$  - диаметр трубопровода в поперечном направлении,  $D$  – диаметр трубопровода в окружном или меридиональном направлении) с поперечным эррозионным надрезом  $l_0=(0.4-0.5)d$ ,
- образцы нагружаются на трехточечный изгиб с записью диаграммы нагрузка  $P$  - уменьшение стрелы прогиба  $\Delta=D_0-D$ ,
- по предельному значению приложенной нагрузки  $P_c$  вычисляется соответствующее предельное значение изгибающего момента  $M_c$  в ослабленном сечении образца, по которому в соответствии с формулой (1) вычисляется  $K_{Ic}$  - трещиностойкость или вязкость разрушения материала в поперечном к оси направлении трубопровода.

Вычисление  $K_{Ic}$  по изложенной процедуре в случае хрупкого разрушения, когда диаграмма  $P(\Delta)$  является линейной вплоть до момента разрушения образца. В случае упруго пластического разрушения, когда в ослабленном сечении образца предвзя его разрушение будет происходить упруго-пластическое деформирование линейную зависимость изгибающий момент - изменение кривизны в ослабленном сечении, использованную при выводе формулы (1), необходимо заменить нелинейной зависимостью, основанной на нелинейной диаграмме для упруго-пластического деформирования.

На основе изложенной методики и соотношения (1) для тонкостенного коллектора их жаропрочного сплава ЭИ были определены значения его трещиностойкости. Эти значения показали, что металл коллектора обладает высокой стойкостью к развитию в нем поверхностных осевых трещин, а также остановке поверхностных трещин, если произойдет их прораствание и они превратятся в сквозные. Эта ситуация в тонкостенных трубопроводных системах известна как «утечка перед разрушением» (LBB=leak before break) и активно используется при проектировании трубопроводных систем АЭС [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
2. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Plain-Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials (ASTM E 1304-97) // Annual book of standards. – Philadelphia: 2005. – 11 p.
3. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
4. Гетман, А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 258 с.