

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СЕВЕРА

докт.техн.наук Большаков А.М.

Учреждение РАН Институт физико-технических проблем Севера
им.В.П.Ларионова Сибирского отделения РАН (г.Якутск, Россия)

Актуальность проблемы. Проблема оценки надежности и ресурса металлоконструкций, работающих в условиях низких климатических температур, на сегодняшний момент является наиболее актуальной задачей обеспечения техногенной безопасности сложных технических систем. Вопросы повышения безопасности опасных промышленных объектов путем предотвращения хрупких разрушений их элементов с каждым годом становятся все более актуальными, особенно это относится к нефтегазопроводам и резервуарам, длительно эксплуатирующимся в условиях низких температур.

Цель работы заключается в развитии научных основ анализа остаточного ресурса и в разработке методов и критериев оценки хладостойкости труб и сосудов при статических нагрузках после длительной эксплуатации.

Методы оценки хладостойкости. При расчетах на сопротивление хрупкому разрушению получили развитие методы построения зависимостей от приведенной температуры (равной разности температуры эксплуатации и температуры хрупкости) и оценки второй критической температуры вязкохрупкого перехода для элементов тонкостенных металлоконструкций $[T_{KP2}]_{кон}$. Объяснение критичности температур вытекает из схемы, предложенной А.Ф.Иоффе, в соответствии с которой при снижении температуры испытаний на гладких образцах предел текучести σ_T повышается, а сопротивление отрыву S_{om} остается практически постоянным. Температура, при которой достигается равенство σ_T и S_{om} , является критической, т.е.

$$\sigma_c = \sigma_T = S_{от} \quad \text{при} \quad T = T_k \quad . \quad (1)$$

Для элементов конструкций критическая температура перехода из одного состояния в другое устанавливается по данным эксперимента на стандартных образцах, при этом учитываются смещения первой и второй критических температур под влиянием конструктивных и технологических факторов:

$$\begin{cases} (T_{KP1})_k = T_{KP1} + \Delta T_{KP1} \\ (T_{KP2})_k = T_{KP2} + \Delta T_{KP2} \end{cases} \quad . \quad (2)$$

Наибольшую сложность для инженерных расчетов представляет именно корректное определение смещения критической температуры хрупкости для элементов конструкций. Такое смещение вызвано рядом особенностей, таких как геометрия конструкции, и возникающим отсюда сложным характером концентраторов напряжений, неоднородностью

напряженно-деформированного состояния, технологической и эксплуатационной дефектностью.

Оценка предельного состояния при потере пластичности. Для исследования влияния накопления поврежденности были проведены механические испытания гладких образцов на малоцикловую усталость с целью имитации процесса накопления поврежденности конструкционным материалом. Образцы, изготовленные по ГОСТ 11150–84 из сталей 15, 09Г2С, испытывали на малоцикловую усталость с помощью разрывной машины «INSTRON» при следующих условиях нагружения: максимальное число циклов – 370 и 500 соответственно; коэффициент асимметрии цикла менялся в диапазоне $0 < R < 1$; максимальная нагрузка – 2,7 кН ($1,3\sigma_T$); амплитуда цикла – 2,55 кН.

Суть экспериментальных исследований заключается в имитации накопления поврежденности через проведение испытаний на малоцикловую усталость на стандартных образцах. После циклического нагружения образцы подвергли одноосному растяжению до разрушения при низких температурах. Результаты испытаний показали, что с увеличением числа циклов (накоплением поврежденности) пластичность стали уменьшается, т.е. происходит потеря пластичности (охрупчивание) материала.

Полученные данные легли в основу построения зависимости σ_B/σ_T от $\Delta e_p/e_{nl}$ - предельной кривой потери пластичности.

Предельная кривая потери пластичности для гладких образцов описывается эмпирически полученным уравнением:

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_T} = 1 + \alpha_\sigma \left(\frac{\Delta e_p}{e_{nl}} - 1 \right)^m, \quad (4)$$

где α_σ и m – коэффициенты для конкретной конструкционной стали (для 09Г2С: $\alpha_\sigma=0,3$, $m=4$; для ст.15: $\alpha_\sigma=0,8$; $m=2$).

Данные зависимости σ_B/σ_T от $\Delta e_p/e_{nl}$ являются предельной кривой потери пластичности материала, а отношение $\Delta e_p/e_{nl}$ – коэффициентом потери пластичности P_{nl} (КПП).

Разработка метода оценки хладостойкости трубопроводов и резервуаров после длительной эксплуатации. Большую опасность представляют дефекты, которые могут быть причиной катастрофического (осколочного) разрушения тонкостенных металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур. С этой точки зрения, оценка поврежденности и деградации основных свойств материалов, применяемых для конструкций после длительной эксплуатации, работающих в условиях Севера, по критериям потери пластичности, приобретает особую актуальность.

В таком случае из предельной кривой (4) вытекает критерий пластичности вида

$$\left(\frac{\Delta e_p}{e_{nl}} \right) < 1, \quad (5)$$

что соответствует условию хрупкого разрушения в работах Н.А.Махутова.

Аппроксимация зависимостей коэффициента потери пластичности от температуры возможна следующим эмпирическим выражением

$$\frac{\Delta e_p}{\Delta e_{nl}} = \left(\frac{T_o}{T} - k_o \right), \quad (6)$$

где k_o , T_o – коэффициенты для конструкционного материала.

Определение хладостойкости элемента конструкции требует выделения в отдельный фактор потери пластичности от температуры. Однако предельное состояние в уравнениях (4) зависит от различных факторов, приводящих к потере пластичности, тогда (5) как результат действия различных факторов выразится в виде

$$\left(\frac{\Delta e_p}{e_{nl}} \right)_T + \left(\frac{\Delta e_p}{e_{nl}} \right)_{повр} = \left(\frac{\Delta e_p}{e_{nl}} \right), \quad (7)$$

где $\left(\frac{\Delta e_p}{e_{nl}} \right)_{повр}$ – потеря пластичности от деформационного старения материала.

Оценку хладостойкости трубопровода или резервуара без трещины проведем на основе предельного соотношения (4). В качестве расчетного параметра хладостойкости примем вторую критическую температуру вязкохрупкого перехода. Исходя из соотношений (7) и предельной кривой потери пластичности (4) с учетом (6), смещение второй критической температуры для конструкции после длительной эксплуатации получим в виде

$$[T_{KP2}]_{кон} = T_o / \left(\left(1 + \left[\frac{1}{\alpha_\sigma} \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{экс}} - 1 \right) \right]^{1/m} + \frac{\Delta e_p}{e_{nl}} \right) - k_o \right). \quad (8)$$

Запас по прочности по температуре можно определить следующим образом:

$$n_T = \frac{T_{\min}^э}{[T_{KP2}]_{кон}}. \quad (9)$$

Хрупкое разрушение элементов конструкций, работающих в условиях Севера, обусловлено, прежде всего, воздействием низких климатических температур, а также рядом факторов, таких как конструктивные, технологические и другие. В этих условиях возникает вопрос надежности конструкций при низких эксплуатационных температурах. Учитывая, во многом случайную природу зарождения и распространения хрупкого разрушения, представляется наиболее возможным ответ с позиций общей теории надежности механических систем, используя аппарат механики разрушения в области хладостойкости крупногабаритных тонкостенных металлоконструкций. Для описания вероятности отказов техники и конструкций используем модель вида

$$R = \iint_{\Omega} p(r, q) dr dq , \quad (10)$$

где $p(r, q)$ - распределение плотности вероятности случайных величин r и q .

Используя критерий хладостойкости в вероятностной постановке, можно оценить вероятность хрупкого разрушения. Принимая данные температуры как случайные и некоррелированные величины, получим надежность как вероятность безотказной работы.