

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕРМОСИЛОВОГО И КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ



Тищенко Светлана Леонидовна

Студентка факультета информационных технологий, кафедры «Инфокогнитивные технологии», Московский политехнический университет



Луганцев Леонид Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инфокогнитивные технологии», факультет информационных технологий Московского политехнического университета.

Аннотация: На основе метода и алгоритма расчетной оценки ресурса тонкостенных оболочечных элементов конструкции, работающих в коррозионных средах разработана программа, с помощью которой произведен анализ ресурса.

Ключевые слова: тонкостенный элемент конструкции, термомеханическое воздействие, коррозионный износ, коррозионная трещина, располагаемый ресурс, прочность.

Abstract: Based on the method and algorithm for calculating the resource of thin-walled shell structural elements operating in corrosive environments, a program was developed with the help of which the resource was analyzed.

Keywords: thin-walled structural element, thermomechanical action, corrosion wear, corrosion crack, disposable resource, strength.

Рассматриваются тонкостенные оболочечные конструкции химико-технологического оборудования, работающие в коррозионных средах при комбинированном термомеханическом и коррозионном воздействиях (рис.1).

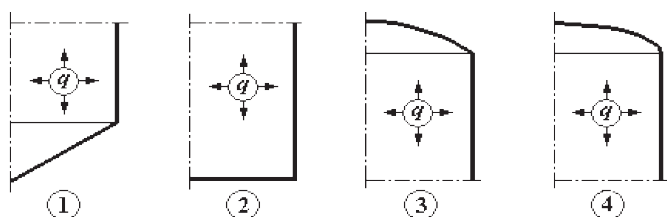


Рис.1. Типовые оболочечные конструкции (1 – аппарат с коническим дном; 2 – аппарат с плоским дном; 3 – аппарат со сферической крышкой; 4 – аппарат с эллиптической крышкой)

Под воздействием коррозионной среды образуется сплошная коррозия внутренней поверхности аппарата. Конструкционный материал разрушается по всей поверхности контакта с коррозионной средой, толщина стенки тонкостенных элементов с течением времени уменьшается.

Совместное воздействие коррозионной среды и растягивающих напряжений вызывает снижение

пластических свойств конструкционного материала с переходом к хрупкому состоянию и приводит к коррозионному растрескиванию – образованию первичных микротрещин и дальнейшему их развитию. С течением времени под влиянием коррозионной среды размеры трещин увеличиваются и возникает опасность хрупкого разрушения изделия.

Таким образом, в коррозионной среде при повышенном уровне растягивающих напряжений одновременно протекают два процесса: с одной стороны, вследствие коррозионного износа непрерывно уменьшается толщина стенки оболочечного элемента, и соответственно растет уровень напряженно-деформированного состояния, с другой стороны – в стенке элемента возникают и развиваются коррозионные трещины. В связи с этим, возникает опасность хрупкого разрушения рассматриваемой конструкции.

Решение задачи о сопротивлении конструкции хрупкому разрушению строим на основе линейной механики разрушения [1]. Нестабильное состояние трещины длиной $2l$ при хрупком разрушении возникает при условии равенства изменения потенциальной энергии деформации изменению энергии на образование свободной поверхности трещины

$d(\pi\sigma^2 l^2 / E) = d(4l\gamma)$, где σ – растягивающее напряжение; E – модуль упругости; γ – плотность поверхностной энергии. При выполнении этого условия развитие трещины не требует подвода энергии извне и протекает за счет расхода потенциальной энергии упругой деформации. Напряжение σ и длина распространяющейся трещины l , связаны зависимостью $\sigma\sqrt{\pi l} = \sqrt{2E\gamma} = K_1$.

Величина $K_1 = \sigma\sqrt{\pi l}$ определяет коэффициент интенсивности напряжений (КИН), который по достижению критических значений растягивающего напряжения σ_k и длины трещины l_k принимает критическое значение K_{1c} . Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в условиях возникновения неустойчивого состояния трещины связано с энергетическим критерием разрушения γ_k , т.е. $K_{1c} = \sqrt{2E\gamma_k}$. Параметр γ_k является характеристикой материала, отражающим сопротивление хрупкому разрушению при наличии исходной трещины, и определяется экспериментально.

Условие быстрого развития трещины можно записать в виде $K_1 \geq K_{1c}$, где $K_1 = \sigma\sqrt{\pi l}$ – коэффициент интенсивности напряжений; $K_{1c} = \sqrt{2E\gamma_k}$ – вязкость разрушения.

В металлах развитие трещины связано с образованием области пластических деформаций в окрестности вершины трещины, энергия на образование которой γ_p существенно превышает энергию разрушения γ при упругой деформации. Влияние пластической деформации на развитие трещины учитывают увеличением ее длины на протяженность пластической зоны (поправка Ирвина [2]). Условную длину трещины l_0 определяют по формуле $l_0 = l + r_T$, где l – фактическая длина трещины; $r_T = 0,5l(\sigma / \sigma_T)^2$ – размер пластической зоны в вершине трещины; σ_T – предел текучести конструкционного материала. Коэффициент интенсивности напряжений вычисляют по формуле $K_1 = \sigma\sqrt{\pi l_T}$.

Анализ напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций [3] показал, что наиболее благоприятные условия для развития трещин создаются в меридиональных сечениях оболочечных элементов, где кольцевые растягивающие напряжения достигают максимальных значений. На рис.2 показаны меридиональная трещина длиной $2a$ и глубиной b на внутренней поверхности цилиндрического корпуса аппарата и зона пластических деформаций в ее вершине.

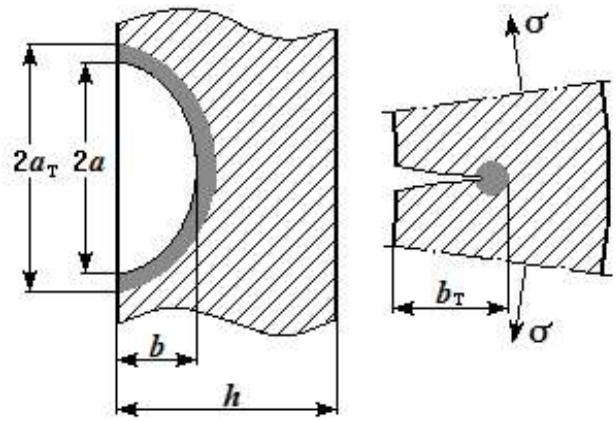


Рис.2. Меридиональная трещина в корпусе аппарата

При расчетной оценке сопротивления оболочечных конструкций хрупкому разрушению коэффициент интенсивности напряжений определяем

по уравнению $K_1 = \sigma\sqrt{\pi b_T} \cdot f_{lk}$, где f_{lk} – поправочная функция, учитывающая геометрию изделия

и характер нагружения [2]; $a_T = a[1 + 0,5(\sigma / \sigma_T)^2]$ – расчетная длина трещины с учетом образующейся в ее вершине зоны пластической деформации;

$b_T = b[1 + 0,5(\sigma / \sigma_T)^2]$ – расчетная глубина трещины; σ_T – предел текучести конструкционного материала.

При построении математической модели и алгоритма численного анализа несущей способности и ресурса рассматриваемых конструкций полагаем, что параметры исследуемой конструкции и условия ее работы, в том числе коррозионная среда, ее концентрация C и температура T , заданы. Определены также физико-механические параметры конструкционного материала, и параметры математической модели скорости коррозионного износа

$$V_k = V_k(C, T).$$

Задачу решаем в реальном масштабе времени. Вводим в рассмотрение вектор состояния оболочеч-

ного элемента $\{Z(\tau)\} = \{h(\tau) \ a(\tau) \ b(\tau) \ \sigma(\tau)\}$, где h – толщина оболочечного элемента. Степень коррозионного повреждения оцениваем величиной параметра $\Omega(\tau) = K_1(\tau) / K_{1c}$.

Задачу определения вектора состояния $\{Z(\tau)\}$ сводим к решению задачи Коши для системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} dh / d\tau &= -V_k, \\ da / d\tau &= V_{kp}, \\ db / d\tau &= V_{kp} - V_k, \end{aligned} \tag{1}$$

$$d\sigma / d\tau = \sigma V_k / h$$

с начальными условиями: $h(0) = h_0$, $a(0) = a_0$,

$$b(0) = b_0, \sigma(0) = \sigma_0. \quad (2)$$

Степень коррозионного повреждения изделия в текущий момент времени $\hat{\delta}$ вычисляем по следующему алгоритму:

$$a_T(\tau) = a(\tau) \left(1 + 0,5(\sigma(\tau) / \sigma_T)^2\right),$$

$$b_T(\tau) = b(\tau) \left(1 + 0,5(\sigma(\tau) / \sigma_T)^2\right), \quad (3)$$

$$K_1(\tau) = \sigma(\tau) \sqrt{\pi b_T(\tau)} \cdot f_{1k}(\tau),$$

$$\Omega(\tau) = K_1(\tau) / K_{1c}.$$

Располагаемый ресурс изделия характеризуется

временным интервалом $[0, \tau_k]$, где τ_k – момент времени, когда оболочечная конструкция достигает предельного состояния, и выполняются условия

$$K_1(\tau_k) = K_{1c} \text{ и } \Omega = 1.$$

Для определения τ_k используем сочетание шагового метода с последующим уточнением по методу дихотомии. При этом на каждом шаге выполняем решение задачи Коши (1) – (2), затем по алгоритму (3) вычисляем коэффициент интенсивности напряжений

$K_1(\tau)$ и степень коррозионного повреждения Ω .

Численная реализация разработанного метода и алгоритма компьютерного анализа несущей способности элементов конструкций осуществлена в виде программного обеспечения. Программный продукт позволяет выполнять численный анализ несущей способности и располагаемого ресурса оболочечных элементов, прогнозировать долговечность изделий в условиях комбинированного силового, температурного и коррозионного воздействия, осуществлять мониторинг остаточного ресурса оборудования в реальном масштабе времени.

С помощью разработанного программного обеспечения выполнили ряд численных экспериментов по исследованию элементов оборудования, работающих в условиях коррозионного воздействия среды. Далее представлены результаты компьютерного анализа корпуса аппарата с коническим днищем. Конструктивные параметры корпуса аппарата: радиус цилиндрической оболочки $r = 500$ мм; высота конического днища $H = 500$ мм; толщина стенки корпуса аппарата $h = 5$ мм; конструкционный материал – коррозионноустойчивая сталь 10X18H10T. Физико-механические параметры материала: модуль упругости

$E = 2 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести $\hat{\sigma}_T = 240$ МПа, вяз-

кость разрушения $K_{1c} = 3000$ Н/мм^{3/2}. Коррозионная среда – серная кислота с температурой $T = 50$ °С. Математическая модель скорости коррозионного износа стали 10X18H10T в серной кислоте при темпе-

ратуре 50 °С получена на основе экспериментальных данных. При концентрации серной кислоты $C = 5 \dots 40$ % скорость коррозионного износа:

$$V_k = 0,1607C - 0,02176C^2 + 0,0009665C^3 - 0,9807 \cdot 10^{-5} C^4 \text{ мм/год.}$$

При численном анализе длину первичной микротрещины, образующейся вследствие коррозионного растрескивания конструкционного материала, принимали равной 0,1 мм, глубину – равной 0,01 мм.

На рис.3 представлен график располагаемого ресурса аппарата для концентрации серной кислоты 10% и внутреннего давления в аппарате 1 МПа.

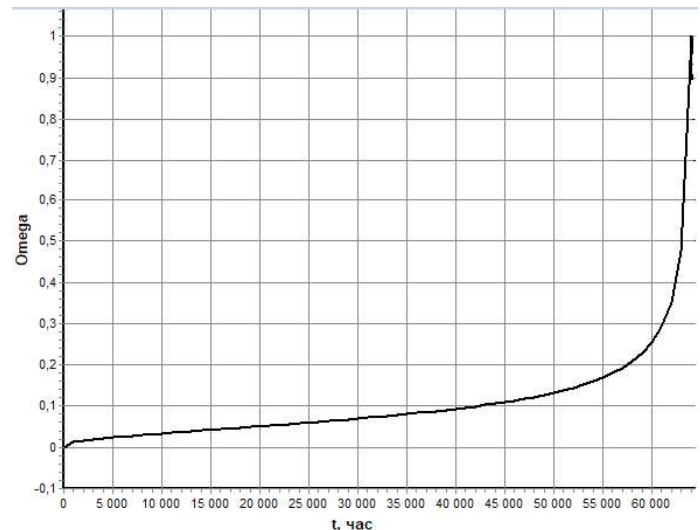


Рис.3. График располагаемого ресурса аппарата

На рис.4 представлен график изменения напряжения с течением времени.

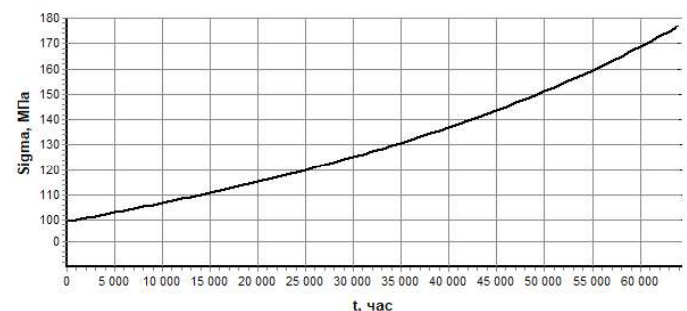


Рис.4. График изменения напряжения

На рис.5, рис.6, рис.7 изображены графики изменения толщины стенки оболочечного элемента конструкции, глубины и длины трещины соответственно.

Предложенный метод позволяет получить решение ряда новых задач по расчету и исследованию несущей способности и ресурса элементов конструкций, работающих в условиях комбинированного термомеханического и коррозионного воздействия.

Список литературы:

1. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. // М.: «Машиностроение», 1973. – 200 с.: ил.
2. Irwin G.R. Relation of stresses near a crack to the crack extension force // Proceeding, 9th Structural Congress on Applied Mechanics, Brussels, 1956, v. 18, p. 245-251.
3. Lugantsev L.D. System for engineering analysis and optimal design of composite shell structures. // Chemical and Petroleum Engineering. 2013, v.48, № 11-12, p. 673-679.

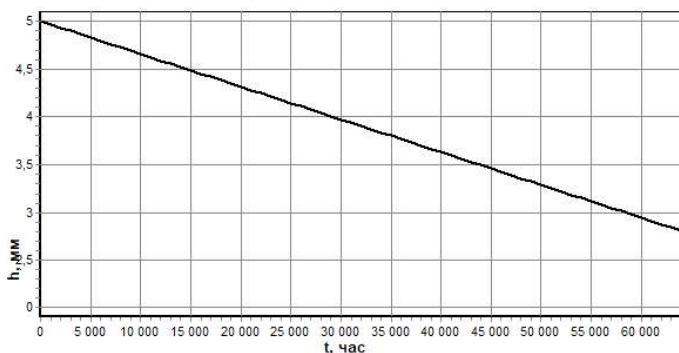


Рис.5. График изменения толщины стенки

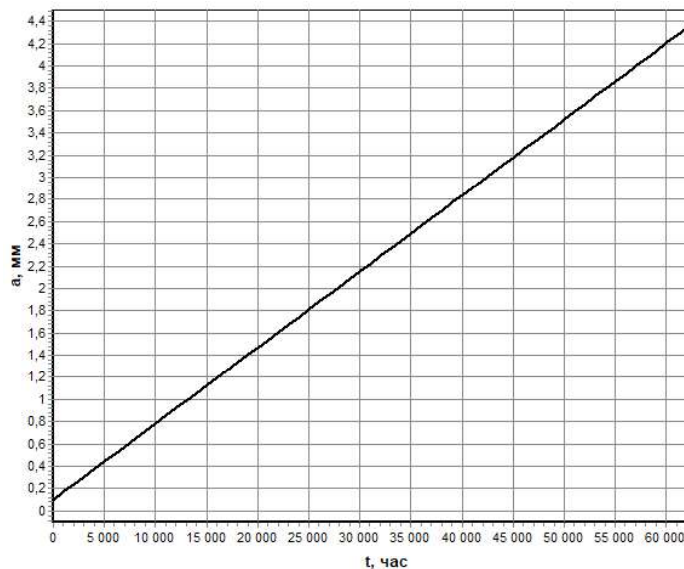


Рис.6. График изменения глубины трещины

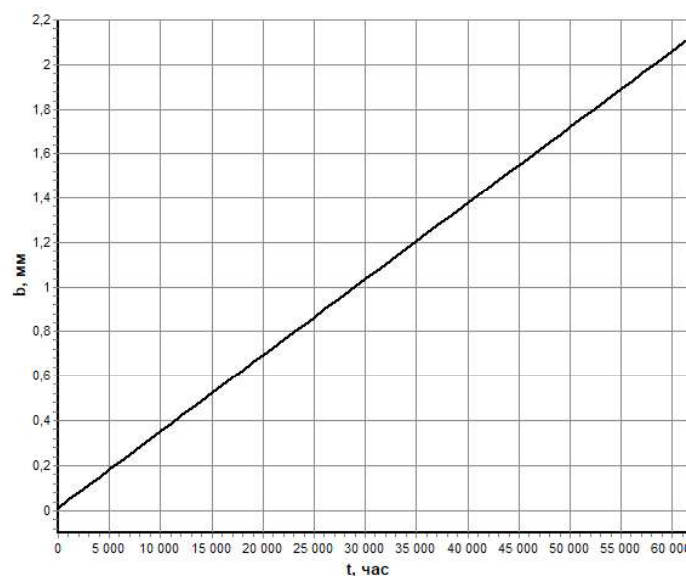


Рис.7. График изменения длины трещины