

Компьютерный анализ несущей способности и ресурса трубчатых элементов конструкций при малоцикловом нагружении

д.т.н. проф. Луганцев Л.Д., Черненко М.О.

Университет машиностроения

8(499)267-16-33

Аннотация. Изложен метод и алгоритм компьютерного анализа кинетики упругопластического деформирования, несущей способности и ресурса трубчатых элементов конструкций, работающих в условиях повторных термомеханических воздействий.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, трубчатый элемент, накопление повреждений

Трубчатые элементы широко применяются в химическом и нефтегазовом оборудовании. Характерной особенностью работы современного химического оборудования является нестационарность силового и температурного воздействия, связанная с условиями переходных и форсированных режимов эксплуатации, периодическими остановками и последующими пусками агрегатов. Повторные воздействия механической нагрузки и температурного поля вызывают в ряде случаев циклическое упругопластическое деформирование элементов конструкций и приводят к накоплению усталостных повреждений. Образование предельных состояний по возникновению трещин или по окончательному разрушению становится возможным при ограниченном числе циклов нагружения. В таких условиях традиционные методы расчетов на прочность оказываются недостаточными. Для обоснованной оценки сопротивления элементов конструкций малоцикловому разрушению необходимы методы, предусматривающие детальное и последовательное во времени исследование кинетики упругопластического деформирования изделий. Эффективные решения задач в такой постановке могут быть построены на основе современных теорий неизоэргического пластического течения с учетом истории нагружения и изменения механических свойств конструкционного материала.

Трубчатый элемент рассматриваем как цилиндрическую оболочку, нагруженную внутренним давлением q и осевым усилием P при температурном воздействии T (рисунок 1). Внешние нагрузки и температурное поле изменяются во времени независимо друг от друга и вызывают циклическое упругопластическое деформирование изделия.

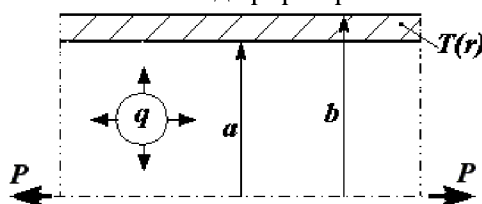


Рис.1. Расчетная схема трубчатого элемента

Полная система уравнений состоит из трех групп уравнений. Первую группу уравнений составляют дифференциальные уравнения равновесия, которым должны удовлетворять компоненты напряженного состояния. Для расчета рассматриваемых конструкций шаговым методом эти уравнения записываем в приращениях:

$$\frac{\partial(\Delta\sigma_{ij})}{\partial x_j} + \Delta F_i = 0. \quad (1)$$

Вторую группу уравнений образуют уравнения деформаций:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial(\Delta u_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\Delta u_j)}{\partial x_i} \right). \quad (2)$$

На границах изделия напряжения и перемещения должны удовлетворять соответственно статическим и кинематическим граничным условиям:

$$\Delta p_i = \Delta \sigma_{ij} n_j, \quad (3)$$

$$\Delta u_i = \Delta u_i^{(n)}. \quad (4)$$

Третью группу уравнений составляют уравнения пластического течения материала, связывающие напряжения и деформации. В данной работе уравнения пластического течения получены на основе соотношений теории неадиабатического пластического течения с трансляционным и изотропным упрочнением [1]:

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B] \{\Delta \sigma\} + \{F_T\} \Delta T, \quad (5)$$

Первое слагаемое в матричном уравнении (5) определяет приращения упругой и пластической деформаций, связанные с ростом напряжений, второе слагаемое – приращения деформаций, вызванных изменением температуры. $[B] = [B^e] + [B^p]$; $[B^e]$ – матрица коэффициентов упругости; $[B^p]$ – матрица коэффициентов пластичности; вектор $\{F_T\}$ характеризует скорость изменения деформаций, вызванных изменением температуры.

Рассматривая деформации пластического течения, полагаем, что в пространстве девиаторов напряжений существует область, в пределах которой поведение материала упругое. Границы этой области определяют с заданным допуском поверхность текучести, конфигурация и положение которой являются функционалом процесса нагружения. Начальная поверхность текучести является поверхностью Мизеса. Уравнение поверхности текучести принимаем в форме:

$$\alpha_{ij}^p \alpha_{ij}^p = R_p^2,$$

где: $\alpha_{ij}^p = s_{ij} - \rho_{ij}^p$ – активные напряжения; s_{ij} – девиатор напряжений; ρ_{ij}^p – девиатор остаточных микронапряжений; R_p – радиус поверхности текучести.

Параметры ΔR_p и $\Delta \rho_{ij}^p$ являются функционалами процесса нагружения. Их приращения определяются уравнениями:

$$\Delta R_p = \frac{\partial R_p}{\partial \varepsilon_p^*} d\varepsilon_p^* + \frac{\partial R_p}{\partial T} dT, \quad \Delta \rho_{ij}^p = g_p \Delta \varepsilon_{ij}^p,$$

где: ε_p^* – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста).

Величины $\frac{\partial R_p}{\partial \varepsilon_p^*}$, $\frac{\partial R_p}{\partial T}$, g_p являются в общем случае функциями ε_p^* , T , ε_{ij}^p , ε_{ij} , σ_{ij} и определяются экспериментально.

Группы уравнений (1), (2), (5) вместе с граничными условиями (3), (4) при заданных поверхностных и объемных нагрузках и температурном поле образуют полную систему уравнений относительно неизвестных $\Delta \sigma_{ij}$, $\Delta \varepsilon_{ij}$, Δu_i .

Для решения задачи применяем шаговый метод. Вводим параметр ω , определяющий развитие процесса нагружения исследуемой конструкции (обобщенное время). В частности, этим параметром может служить один из параметров нагрузки. При решении задачи в реальном масштабе времени $\omega \equiv \tau$ (τ – время).

Полагаем, что программа нагружения, определяемая функциями $F_i = F_i(\omega)$, $p_i = p_i(\omega)$, $T = T(\omega)$, задана. Определены также физико-механические характеристики конструкционного материала $E = E(T)$, $\mu = \mu(T)$, $\alpha = \alpha(T)$, $\frac{dE}{dT}$, $\frac{d\mu}{dT}$, в том числе функции $\frac{\partial R_p}{\partial \varepsilon_p^*}$, $\frac{\partial R_p}{\partial T}$, g_p .

Программу нагружения конструкции разбиваем на ряд малых этапов, расчет которых

выполняем последовательно. Деление программы нагружения на этапы выполняем таким образом, чтобы параметры механической нагрузки и температурного поля в пределах этапа изменялись монотонно. Предполагается, что программа нагружения имеет предысторию, и в момент начала численного анализа имеется полная информация о напряженно-деформированном состоянии конструкции. В начальном состоянии напряжения и деформации равны нулю.

Вводим в рассмотрение вектор состояния:

$$\{Z\} = \left[\{\sigma\} \quad \{\rho\}^p \quad \{\epsilon\} \quad \{\epsilon\}^p \quad \epsilon_p^* \quad R_p \quad \{u\} \quad \Omega \right],$$

где: $\{\rho\}^p = [\rho_{11}^p \quad \rho_{22}^p \quad \rho_{33}^p \quad 2\rho_{12}^p \quad 2\rho_{23}^p \quad 2\rho_{31}^p]$, $\{u\} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]$, Ω – накопленное повреждение.

Вектор $\{Z\}$ полностью характеризует напряженно-деформированное состояние и остаточный ресурс исследуемой конструкции.

Пусть в некоторой точке процесса, соответствующей началу очередного n -го этапа нагружения, все компоненты вектора состояния $\{Z_0\}$ известны. Тогда могут быть вычислены

значения функций $\frac{\partial R_p}{\partial \epsilon_p}$, $\frac{\partial R_p}{\partial T}$, g_p , а также значения упругих постоянных материала в исследуемой

точке процесса нагружения. Полагая, что все эти величины сохраняют свои значения на протяжении n -го этапа нагружения, определяем коэффициенты разрешающей системы уравнений (1), (2), (5) и выполняем решение краевой задачи с граничными условиями (3), (4). В результате находим приращения напряжений, деформаций и перемещений $\Delta\sigma_{ij}$, $\Delta\epsilon_{ij}$, Δu_i на n -м этапе. Числовые значения искомых величин определяем в узловых точках конструкции, количество и расположение которых зависит от характерных особенностей конструкции и требуемой точности расчета. Каждой узловой точке ставим в соответствие параметр $plast$ (признак пластичности), который принимает значение 0, если в рассматриваемой точке материал деформируется упруго, или 1, если имеет место пластическое течение. В процессе решения краевой задачи формирование матрицы $[B]$ в уравнении (5) выполняем с учетом значения этого параметра:

$$\begin{aligned} [B] &= [B^e], \text{ если } plast = 0; \\ [B] &= [B^e] + [B^p], \text{ если } plast = 1. \end{aligned}$$

Выполнив решение краевой задачи, проводим анализ параметров состояния в узловых точках конструкции.

В упругих точках ($plast = 0$) проверяем условие пластичности:

$$\sqrt{\alpha_{ij}^p \alpha_{ij}^p} < R_p - \delta,$$

где: δ – заданная величина допустимой погрешности.

Если условие выполняется, узловая точка остается упругой. Для точек, где выполняется условие:

$$\Delta\rho_{ij}^p R_p - \delta \leq \sqrt{\alpha_{ij}^p \alpha_{ij}^p} \leq R_p + \delta,$$

запускаем итерационную процедуру посадки узловой точки на поверхность текучести, полагаем $plast = 1$ и повторно решаем краевую задачу с учетом внесенных изменений.

Если в некоторых точках $\sqrt{\alpha_{ij}^p \alpha_{ij}^p} > R_p + \delta$, это свидетельствует о несогласованности заданной величины этапа нагружения и величины допустимой погрешности. В этом случае изменяем их значения и повторно решаем краевую задачу.

В пластических точках ($plast = 1$) вычисляем параметр:

$$\Delta\lambda_p = \frac{1}{HR_p} \left(\frac{\alpha_{ij}^p \Delta\sigma_{ij}}{R_p} - \frac{\partial R_p}{\partial T} \Delta T \right)$$

и проверяем выполнение условия развития пластического течения $\Delta\lambda_p > 0$. Если для части точек это условие не выполняется, что означает упругую разгрузку, принимаем для них $plast = 0$ и повторно решаем краевую задачу. В противном случае вычисляем приращения:

$$\Delta\epsilon_p^* = \sqrt{\frac{2}{3}} R_p \Delta\lambda_p, \Delta\epsilon_{ij}^p = \alpha_{ij}^p \Delta\lambda_p, \Delta\rho_{ij}^p = g_p \Delta\epsilon_{ij}^p, \Delta R_p = \frac{\partial R_p}{\partial \epsilon_p^*} \Delta\epsilon_p^* + \frac{\partial R_p}{\partial T} \Delta T.$$

Далее вычисляем все компоненты вектора $\{\Delta Z\}$ в узловых точках конструкции и определяем вектор состояния в конце рассматриваемого этапа нагружения конструкции:

$$\{Z\} = \{Z_0\} + \{\Delta Z\}.$$

Затем переходим к расчету следующего этапа.

Выполнив решение задачи, находим значения векторов состояния $\{Z\}$ во всех узловых точках на заданном интервале изменения параметра ω , получая, таким образом, полное описание кинетики неизотермического упругопластического деформирования конструкции и количественную оценку скалярной меры усталостных повреждений.

Математическую модель кинетики процесса накопления усталостных и квазистатических повреждений строим на основе деформационно-кинетической трактовки усталостного и квазистатического разрушения.

Пусть значения параметра $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k, \omega_{k+1}, \dots$ определяют этапы процесса нагружения в пределах которых механическая нагрузка и температурное воздействие изменяются монотонно. Приращение повреждения на шаге нагружения $\Delta\omega = \frac{\omega_{k+1} - \omega_k}{n}$ вычисляем по формулам:

- при упругом деформировании материала:

$$\Delta\Omega_e = \frac{1}{2m_e} \left(\frac{E}{1,75\sigma_B} \right)^{\frac{1}{m_e}} \cdot \frac{(\epsilon_i^e(\omega) - \epsilon_i^e(\omega_k))^{\frac{1}{m_e}-1}}{\left[1 - \frac{E}{\sigma_B} \cdot \frac{\epsilon_i^e(\omega) + \epsilon_i^e(\omega_k)}{2} \right]^{\frac{1}{m_e}}} \cdot \Delta\epsilon_i^e, \quad (6)$$

где: $\Delta\Omega_e$ – накопленное усталостное повреждение на рассматриваемом шаге нагружения;

$\epsilon_i^e(\omega_k)$ – интенсивность упругих деформаций в начале этапа нагружения $[\omega_k, \omega_{k+1}]$;

$\epsilon_i^e(\omega)$ – интенсивность упругих деформаций в конце рассматриваемого шага нагружения;

$\Delta\epsilon_i^e > 0$ – приращение интенсивности упругих деформаций на рассматриваемом шаге нагружения;

σ_B – предел прочности материала.

- при пластическом течении материала:

$$\Delta\Omega_p = \frac{1}{2m_p} \left(\frac{2}{\epsilon_f} \right)^{\frac{1}{m_p}} \cdot \frac{(\epsilon_p^*(\omega) - \epsilon_p^*(\omega_k))^{\frac{1}{m_p}-1}}{\left(1 - \frac{\epsilon_i(\omega)}{\epsilon_f} \right)^{\frac{1}{m_p}}} \cdot \Delta\epsilon_p^*, \quad (7)$$

где: $\Delta\Omega_p$ – накопленное усталостное повреждение на рассматриваемом шаге нагружения;

$\varepsilon_p^*(\omega)$ – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста) в конце рассматриваемого шага нагружения;

$\varepsilon_i(\omega)$ – интенсивность деформаций в конце рассматриваемого шага нагружения;

$\Delta\varepsilon_p^* > 0$ – приращение накопленной пластической деформации на рассматриваемом шаге нагружения;

ε_f – располагаемая пластичность материала.

По экспериментальным данным [2] показатели степени в уравнениях (6) и (7): $m_p = 0,5 \dots 0,6$; $m_e = 0,10 \dots 0,12$.

Накопленное за рассматриваемый период работы $[\omega_0, \dots \omega_k]$ повреждение:

$$\Omega = \Omega_0 + \sum_k \Delta\Omega_e + \sum_k \Delta\Omega_p,$$

где: Ω_0 – начальное повреждение. Для неповрежденной конструкции $\Omega = 0$. Предельное состояние достигается при $\Omega = 1$.

Численная реализация разработанного метода и алгоритма компьютерного анализа упругопластического деформирования трубчатых элементов конструкций осуществлена в виде программного обеспечения. Программный комплекс «Life Cycle» имеет модульную структуру, функционирует в операционных системах Windows XP/7, предоставляет пользователю удобный, интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс.

Программный продукт предназначен для применения в отраслевых САПР и ERP-системах, допускает автономное использование. Позволяет выполнять численный анализ несущей способности и располагаемого ресурса трубчатых элементов, прогнозировать долговечность изделий в условиях нестационарного силового и температурного воздействия, осуществлять мониторинг остаточного ресурса оборудования в режиме on-line.

Литература

1. Коротких Ю.Г., Угодчиков А.Г. Уравнения теории термовязкопластичности с комбинированным упрочнением. – М.: Наука, 1981. 188 с.
2. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. 288 с.

Оценка коэффициента запаса прочности выпуклых днищ, находящихся под внутренним равномерным давлением

к.т.н. Лянг В.Ф.

Университет машиностроения

Аннотация. Работа посвящена вопросам вывода инженерных формул в ГОСТе 14249-89 для расчета эллиптических днищ, находящихся под внутренним равномерным давлением, их численному моделированию напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов и сравнительной оценке коэффициента запаса прочности, принятого в ГОСТе 14249-89, с результатами численного эксперимента.

Ключевые слова: сосуды под давлением, коэффициент запаса прочности, метод конечных элементов

Коэффициент прочности есть отношение напряжения текучести к допускаемому напряжению. Рекомендуемая величина коэффициента запаса прочности согласно ГОСТу 14249-89 [1] равна 1.5. Расчетной величиной выпуклого днища является его толщина в зависимости от заданных значений: геометрических размеров, коэффициента прочности сварных