

КОМПЬЮТЕРНЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕСУРСА ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ



Перушина Александра Евгеньевна

Студентка 4 курса по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (образовательная программа «Интеграция и программирование в САПР») факультета информационных технологий Московского политехнического университета



Луганцев Леонид Дмитриевич

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инфокогнитивные технологии» Московского политехнического университета

Аннотация. Предложен метод расчета долговечности при малоцикловом нагружении в виде программного продукта. Данный метод используется для анализа трубчатого элемента конструкции, работающего в условиях нестационарного термомеханического воздействия.

Ключевые слова: долговечность, термомеханическое воздействие, трубчатый элемент, малоцикловое нагружение.

Annotation. A method for calculating durability under low-cycle loading is proposed in the form of a software product. This method is used to analyze a tubular structural element operating under conditions of non-stationary thermomechanical action.

Key words: durability, thermomechanical action, tubular element, low-cycle loading.

Трубчатые элементы применяются в химическом и нефтегазовом оборудовании. Характерной особенностью работы современного оборудования является нестационарность силового и температурного воздействия. Повторные воздействия механической нагрузки и температуры вызывают в ряде случаев деформирование, что приводит к накоплению повреждений. Образование предельных состояний становится возможным при ограниченном числе циклов нагружения. В таких условиях традиционные методы оценки статической прочности оказываются недостаточными. Компьютерный анализ несущей способности и долговечности трубчатых элементов может быть выполнен на основе математических моделей неизотермического пластического течения с учетом истории нагружения и изменения механических свойств конструкционного материала.

Предлагаемый компьютерный метод содержит три группы уравнений. Первую группу уравнений составляют дифференциальные уравнения равновесия, которым должны удовлетворять компоненты напряженного состояния. На границах рассматриваемых объектов напряжения должны удовлетворять статическим граничным условиям. Вторую группу

уравнений образуют уравнения совместности деформаций. На границах перемещения должны удовлетворять кинематическим граничным условиям. Уравнения равновесия и уравнения совместности деформаций не зависят от физико-механических свойств материала и условий нагрева.

Для расчета конструкции шаговым методом запишем уравнения равновесия, деформаций и граничные условия в приращениях:

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

$$\Delta p_i = \Delta \sigma_{ij} n_j, \quad \Delta u_i = \Delta u_i^{(n)}, \quad (2)$$

где P_i – поверхностные нагрузки, F_i – объемные нагрузки.

Третью группу уравнений составляют уравнения пластического течения, связывающие напряжения и деформации. Эти уравнения принимаем в соответствии с теорией неизотермического пластического течения с трансляционным и изотропным упрочнением [1]:

$$\{\Delta \varepsilon_{ij}\} = \left([B^e] + [B^p] \right) \{\Delta \sigma_{ij}\} + \{F_T\} \Delta T. \quad (3)$$

Первое слагаемое в матричном уравнении (1) определяет приращения упругой и пластической деформаций, связанные с ростом напряжений, второе слагаемое – приращение деформаций, вызванных изменением температуры; $[B^e]$ – матрица коэффициентов упругости; $[B^p]$ – матрица коэффициентов пластичности. $\{\Delta \varepsilon_{ij}\}$ – вектор приращений деформаций; $\{\Delta \sigma_{ij}\}$ – вектор приращений напряжений; $\{F_T\}$ – вектор приращений температурных деформаций.

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 неизотермического пластического деформирования (поверхность текучести), конфигурация и положение которой являются функционалами процесса нагружения.

Уравнение поверхности текучести принимаем в форме $\alpha_{ij} \alpha_{ij} = R_p^2$

Составляющие девиатора ρ_{ij} определяют координаты центра поверхности текучести в пространстве девиаторов напряжений при параллельном переносе.

Параметры R_p и ρ_{ij} являются функционалами процесса нагружения. Их приращения определяются выражениями:

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

где $\varepsilon_p^* = \int d\varepsilon_p^*$ – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста).

Приращения пластических деформаций определяются уравнениями

$$\Delta \varepsilon_{ij}^p = \alpha_{ij}^p \Delta \lambda_p, \quad \Delta \varepsilon_p^* = \sqrt{\frac{2}{3}} R_p \Delta \lambda_p,$$

$$\Delta \lambda_p = \frac{1}{H} \left(\frac{\alpha_{ij}^p \Delta \sigma_{ij}}{R_p^2} - \frac{\partial R_p}{\partial T} \cdot \frac{\Delta T}{R_p} \right),$$

где H – функция, определяющая анизотропное упрочнение конструкционного материала.

Уравнения (1), (3) вместе с граничными условиями (2) при заданных поверхностных P_i и объемных F_i

нагрузках и температурном поле T образуют полную систему уравнений, линейную относительно неизвестных $\Delta \sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}, \Delta u_j$.

Для решения поставленной задачи вводим параметр $\hat{\sigma}$, определяющий развитие процесса нагружения изделия (обобщенное время) [2]. Программу нагружения разбиваем на ряд этапов $\hat{\sigma}_0 < \hat{\sigma}_1 < \dots < \hat{\sigma}_{n-1} < \hat{\sigma}_n$, величина которых определяется характером изменения силовой нагрузки и температуры. Модель изделия представляем в виде совокупности узловых точек, количество и расположение которых зависит от характерных особенностей конструкции и требуемой точности расчета.

На каждом этапе нагружения выполняем численное решение краевой задачи (1) – (3) относи-

тельно неизвестных $\Delta \sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}, \Delta u_j$ в узловых точках исследуемой конструкции. В процессе решения учитываем изменение параметров состояния конструкционного материала.

Выполнив решение краевой задачи на этапе нагружения, выполняем анализ параметров состояния в узловых точках конструкции. В упругих точках

($plast = 0$) проверяем условие

$$\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2} < R_p - \delta, \quad (4)$$

где δ – заданная величина допустимой погрешности. Если условие (4) выполняется, точка остается упругой. Для точек, где выполняется условие

$$R_p - \delta \leq \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2} \leq R_p + \delta,$$

полагаем $plast = 1$ и повторно решаем краевую задачу с учетом внесенных изменений.

В пластических узловых точках ($plast = 1$) проверяем условие развития пластического течения

$\Delta \lambda_p > 0$. Если для части точек это условие не выполняется, что означает упругую разгрузку, принимаем для этих точек параметр $plast = 0$ и повторно решаем краевую задачу, соответствующим образом формируя коэффициенты уравнения (3).

С помощью программного продукта было выполнено ряд численных экспериментов по исследованию располагаемого ресурса. При испытаниях принимали следующие значения физико-механических характеристик конструкционного материала: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел текучести $s = 240$ МПа при температуре 20°C ; предел прочности $s = 500$

МПа; $\frac{\partial E}{\partial T} = -100$; $\frac{\partial R_p}{\partial \varepsilon_p^*} = -0,114$; $\frac{\partial R_p}{\partial T} = 0$;

МПа; $\frac{\partial E}{\partial T} = -100$; $\frac{\partial R_p}{\partial \varepsilon_p^*} = -0,114$; $\frac{\partial R_p}{\partial T} = 0$;

$$\frac{\partial E}{\partial T} = -100; \frac{\partial R_p}{\partial \varepsilon_p^*} = -0,114; \frac{\partial R_p}{\partial T} = 0;$$

$$g = 6670$$

$$- 2T; e m = 0,12; p m = 0,5.$$

Опытные образцы нагружали циклически изменяющимися во времени

осевым усилием P и внутренним давлением q при температуре $T = 0 - 300^\circ\text{C}$.

Исследование было проведено для первого нагружения (рис. 1). Первый режим характеризуется синхронным изменением во времени осевого усилия и внутреннего давления.

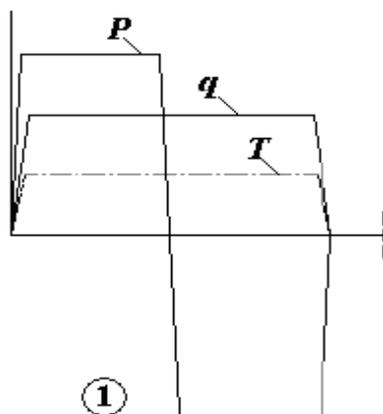


Рис. 1. Первый режим нагружения

В результате решения поставленной задачи, приведены результаты по исследованию рассматриваемого трубчатого элемента, работающего в условиях нестационарного термомеханического воздействия. На рис. 2. представлены графики скорости накопления усталостных повреждений для первого режима нагружения. Таким образом, мы получаем полное описание кинетики циклического деформирования трубчатого элемента в режиме реального времени.

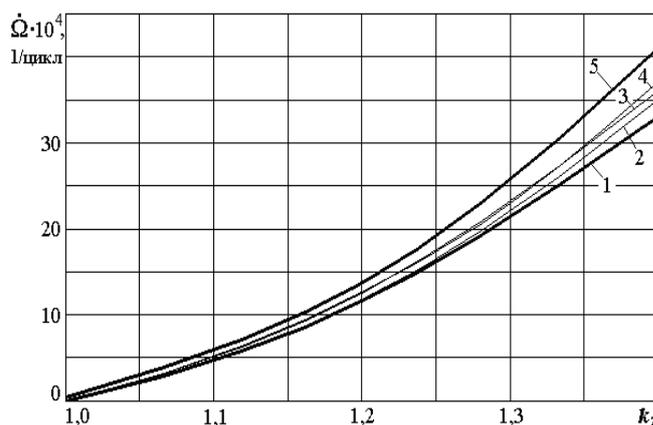


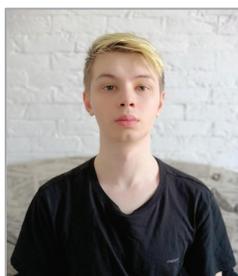
Рис. 2. Скорость накопления повреждений (первый режим нагружения)
(1 – $t_z k = 0,1$; 2 – $t_z k = 0,2$; 3 – $t_z k = 0,3$; 4 – $t_z k = 0,4$; 5 – $t_z k = 0,5$)

Предложенный метод позволяет решать практические задачи оптимизации режимов работы оборудования с целью снижения интенсивности процессов циклического упругопластического деформирования и накопления повреждений в материале изделий.

Список литературы

1. Коротких Ю.Г. Уравнения теории термовязкопластичности с комбинированным упрочнением / Ю.Г. Коротких, А.Г. Угодчиков. – М.: Наука, 1981. – 188 с.
2. Луганцев Л.Д. Анализ циклического упругопластического деформирования и ресурса элементов конструкций / Л.Д. Луганцев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. № 1. – С. 54–58.

ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ О ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОССИЙСКИХ РАЗРАБОТКАХ В ОБЛАСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ



Суслин Николай Олегович

Магистр 2-го курса по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»



Елисеева Наталья Владимировна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», руководитель информационно-аналитического центра ООО «Джикс групп»