

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА РАСПОЛАГАЕМОГО РЕСУРСА ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ



Перушина Александра Евгеньевна

Студентка 4 курса, факультета информационных технологий, кафедры «Инфокогнитивные технологии», Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», Образовательная программа «Интеграция и программирование в САПР» Московского политехнического университета.



Луганцев Леонид Дмитриевич

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

Аннотация: Предложен программный продукт и метод для расчета долговечности элементов конструкции при малоцикловом нагружении. Программный продукт позволяет рассчитать воздействия механической нагрузки, приводящие к усталостным повреждениям элементов конструкций.

Ключевые слова: программный продукт, долговечность, малоцикловое нагружение, механическое воздействие, элемент конструкции, упругопластическое деформирование.

Abstract: A software product and a method for calculating the durability of structural elements under low-cycle loading are proposed. The software product allows you to calculate the effects of mechanical loads that lead to fatigue damage to structural elements.

Keywords: software product, durability, low-cycle loading, mechanical impact, structural element, elastic-plastic deformation.

Современное оборудование зачастую работает в условиях непостоянства силового и температурного влияний. Повторные воздействия механической нагрузки и температурного поля в ряде случаев вызывают циклическое упругопластическое деформирование элементов конструкций и приводят к накоплению усталостных повреждений. Образование предельных состояний по возникновению трещин или окончательному разрушению становится возможным при ограниченном числе циклов нагружения.

В таких условиях традиционные методы оценки статической прочности оказываются недостаточными. Программный продукт несущей способности и долговечности элементов конструкций может быть выполнен на основе математических моделей неадиабатического пластического течения с учетом истории нагружения и изменения механических свойств конструкционного материала.

Предложенный продукт 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.

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

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.

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

Для расчета элементов конструкций шаговым методом запишем уравнения равновесия, деформаций и граничные условия в приращениях: 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 неадиабатического пластического течения с трансляционным и

изотропным упрочнением [1]:

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

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 (рис.1).

Уравнение поверхности текучести принимаем в

форме $\alpha_{ij} \alpha_{ij} = R_p^2$, где $\alpha_{ij} = s_{ij} - \rho_{ij}$ – активные напряжения; s_{ij} – девиатор напряжений; ρ_{ij} – девиатор остаточных микронапряжений; R_p – радиус поверхности текучести.

Составляющие девиатора ρ_{ij} определяют координаты центра поверхности текучести в пространстве девиаторов напряжений при параллельном переносе. Параллельный перенос поверхности текучести в направлении нормали к ней в точке нагружения отражает анизотропное упрочнение материала в направлении действия напряжений.

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

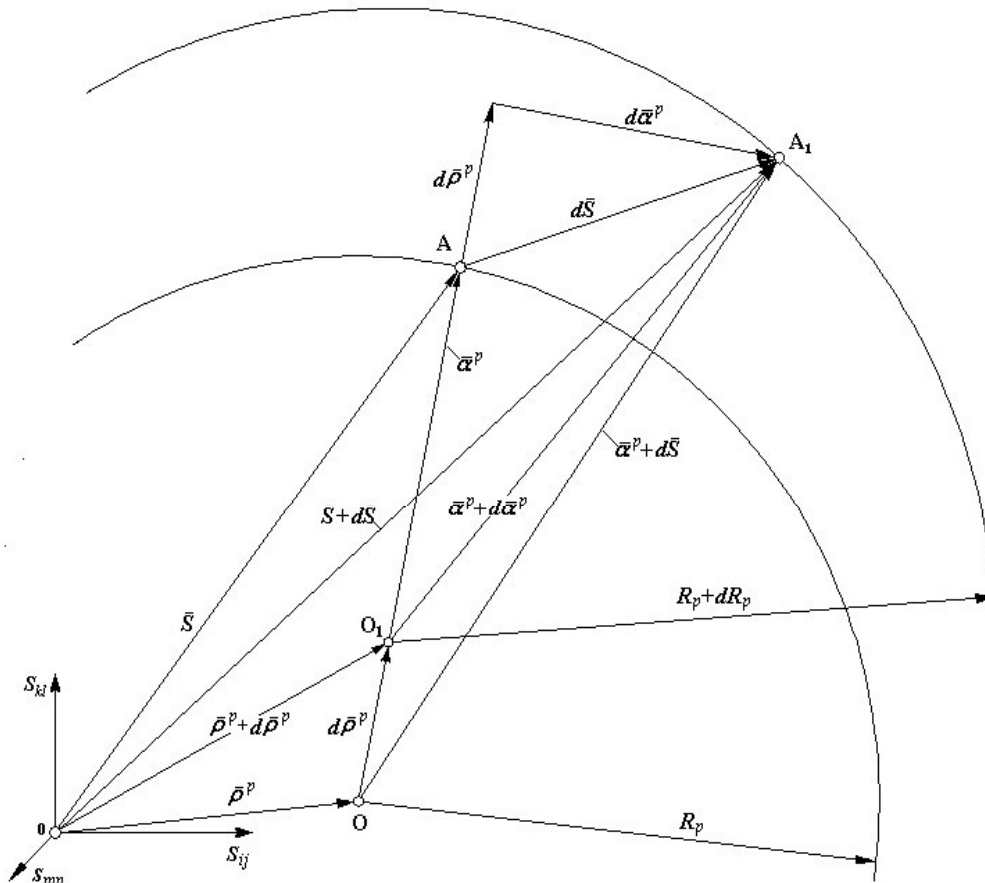


Рис. 1 – Схема деформирования поверхности текучести

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

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

функция, определяющая анизотропное упрочнение конструкционного материала.

Уравнения (1), (3) вместе с граничными условиями при заданных поверхностных p_i и объемных F_i нагрузках и температурном поле T образуют полную систему уравнений, линейную относительно неизвестных $\Delta \sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}, \Delta u_j$.

При построении математической модели кинетики процесса упругопластического деформирования вводим параметр $\hat{\theta}$, определяющий развитие процесса нагружения изделия (обобщенное время) [2]. Программу нагружения разбиваем на ряд этапов, 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)

относительно 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, прини-

маем для этих точек параметр $plast = 0$ и повторно решаем краевую задачу, соответствующим образом формируя коэффициенты уравнения (3).

В результате решения поставленной задачи находим значения параметров состояния изделия во всех узловых точках процесса нагружения на заданном интервале изменения параметра τ , получая, таким образом, полное описание кинетики циклического неизоэтермического упругопластического деформирования конструкции в режиме реального времени.

Программный продукт «LifeCycleTubular» выполнили ряд численных экспериментов для расчета скорости накопления усталостных повреждений трубчатого элемента для трех режимов. При испытаниях принимали следующие значения физико-механических характеристик конструкционного материала: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел текучести $\sigma_o^0 = 240$ МПа при

температуре 20°C; предел прочности $\sigma_a = 500$ Мпа

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

$$g_p = 6670 - 2T; \quad m_e = 0,12; \quad m_p = 0,5.$$

Опытные образцы нагружали циклически изменяющимися во времени осевым усилием P и внутренним давлением q при температуре T = 0 – 300°C. Исследования проводили при трех режимах нагружения (рис.2).

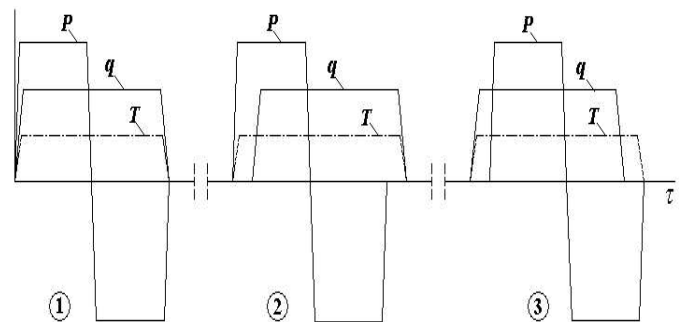


Рис. 2 – Режимы нагружения трубчатого элемента

Первый режим характеризуется синхронным изменением во времени осевого усилия и внутреннего давления. При испытаниях во втором режиме трубчатый элемент сначала нагружали осевым усилием, а затем повышали внутреннее давление. В третьем режиме порядок нагружения изменяли на обратный. Во всех трех режимах осевое усилие изменяли во времени по знакопеременному циклу, внутреннее давление – по пульсирующему циклу.

На рис. 3 представлены графики скорости накопления усталостных повреждений для первого

режима нагружения при циклическом синхронном изменении осевого усилия и внутреннего давления

для различных значений параметров $k_z = \sigma_z^a / \sigma_\sigma^0$

и $k_z = \sigma_i^a / \sigma_z^0$, где σ_i^a и σ_z^0 - амплитудные значения кольцевых и осевых напряжений в элементах конструкций.

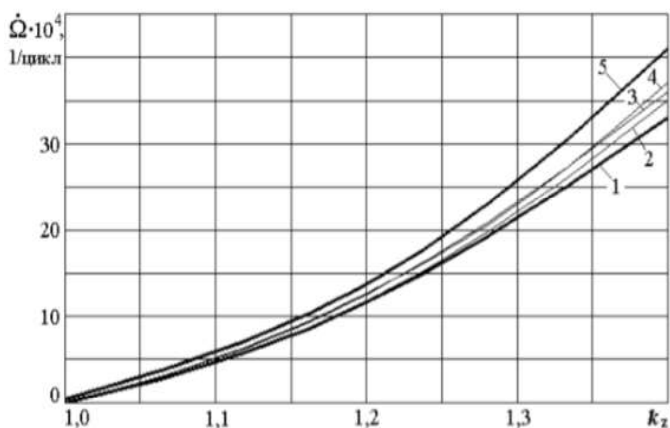


Рис.3 – Скорость накопления повреждений (первый режим нагружения)

(1 – $k_{tz} = 0,1$; 2 – $k_{tz} = 0,2$; 3 – $k_{tz} = 0,3$; 4 – $k_{tz} = 0,4$; 5 – $k_{tz} = 0,5$)

На рис. 4 представлен график скорости накопления усталостных

повреждений для второго режима нагружения. При испытаниях во втором режиме трубчатый элемент сначала нагружали осевым усилием, а

затем повышали внутреннее давление. Осевое усилие изменяли во времени

по знакопеременному циклу, внутреннее давление – по пульсирующему циклу.

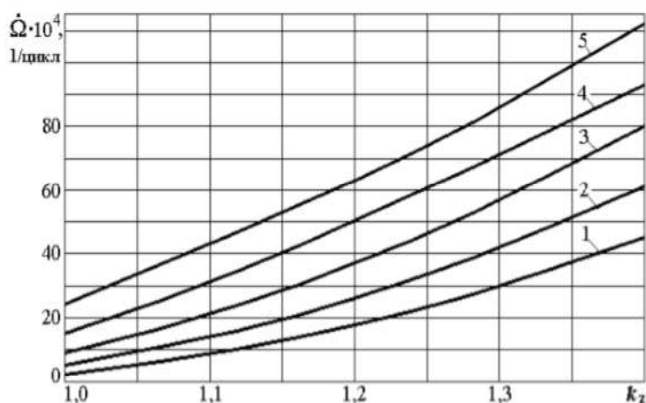


Рис.4 – Скорость накопления повреждений (второй режим нагружения)

(1 – $k_{tz} = 0,1$; 2 – $k_{tz} = 0,2$; 3 – $k_{tz} = 0,3$; 4 – $k_{tz} = 0,4$; 5 – $k_{tz} = 0,5$)

В третьем режиме порядок нагружения изменяли на обратный. Во всех

трех режимах осевое усилие изменяли во време-

ни по знакопеременному

циклу, внутреннее давление – по пульсирующему циклу.

На рис. 5 представлен график скорости накопления усталостных

повреждений для третьего режима нагружения.

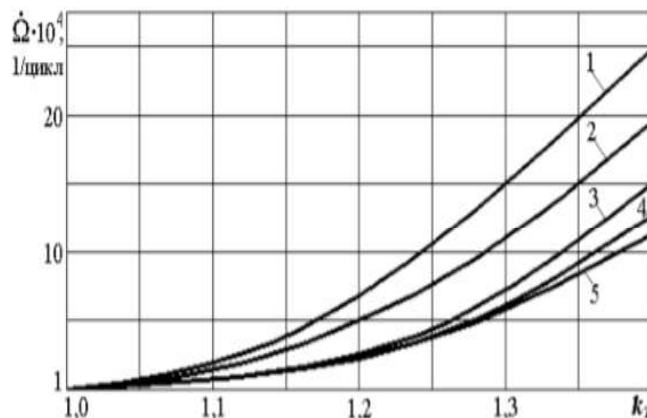


Рис.5 – Скорость накопления повреждений (третий режим нагружения)

(1 – $k_{tz} = 0,1$; 2 – $k_{tz} = 0,2$; 3 – $k_{tz} = 0,3$; 4 – $k_{tz} = 0,4$; 5 – $k_{tz} = 0,5$)

Сопоставление результатов численного эксперимента, позволяет сделать вывод, что скорость накопления усталостных повреждений в материале изделия существенно зависит от режима нагружения. Наибольшая скорость накопления повреждений соответствует второму режиму нагружения изделия. Наименьшее повреждающее воздействие характерно для третьего режима. При этом в третьем режиме нагружения наблюдается обратная зависимость скорости накопления повреждений от параметра по сравнению с первым и вторым режимами

Предложенный метод решения задачи, реализованный в виде программного обеспечения, позволяет решать практические задачи по обоснованию располагаемого ресурса трубчатых элементов конструкций, работающих в условиях нестационарного термомеханического нагружения. В частности, метод позволяет решать новые 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., Угодчиков А.Г. Уравнения теории термовязкопластичности с комбинированным упрочнением. – М.: Наука, 1981. – 188 с.
2. Луганцев Л.Д. Анализ циклического упругопластического деформирования и ресурса элементов конструкций. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2014. Т. 80. № 1, с. 54–58.