

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НДС ТЕЛ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Докт. физ.-мат. наук, проф. КУЛИКОВ И. С., магистрант КЛУС С. А.

Белорусский национальный технический университет

Элементы активных зон атомных реакторов находятся в достаточно сложных условиях с точки зрения напряженно-деформированного состояния (НДС). Так, с одной стороны, они подвержены механическим деформациям, а с другой – деформациям, вызванным воздействием высоких температур, и нейтронному облучению. Одну из основных ролей в надежной работоспособности конструкций активных зон атомных реакторов играют оболочки тепловыделяющих элементов, которые в большинстве случаев имеют форму толстостенных цилиндров.

Рассмотрим осесимметричное распределение напряжений и деформаций полого короткого цилиндра в условиях неравномерного нагрева, реакторного облучения, а также под действием равномерного внутреннего и внешнего давлений (рис. 1).

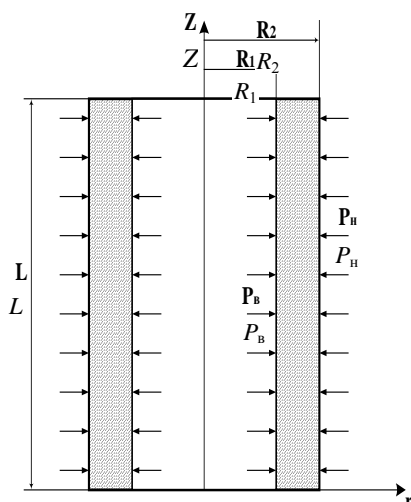


Рис. 1. Полый цилиндр, нагруженный внутренним и внешним давлением

Тогда в цилиндрической системе координат \$(r, Z)\$ поле напряжений и деформаций имеет отличные от нуля компоненты \$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}\$ (для упрощения примем \$\sigma_{13}\$ и \$\epsilon_{13}\$ равными нулю). Введем относительные координаты

\$\xi = Z/R_1\$ и \$\rho = r/R_1\$, изменяющиеся в пределах \$0 < \xi < L/R_1\$ и \$1 \le \rho \le R_2/R_1\$, где \$R_1, R_2\$ – внутренний и наружный радиусы цилиндра; \$L\$ – его высота; \$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}\$ – напряжения и деформации соответственно в радиальном, окружном и осевом направлениях.

Для цилиндрических конструкций система дифференциальных уравнений равновесия имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\rho} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial \xi} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Деформации и перемещения точек цилиндра связаны следующими соотношениями Коши:

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{R_1} \frac{\partial u_1}{\partial \rho}; \quad \epsilon_{22} = \frac{1}{R_1} \frac{u_1}{\rho}; \quad \epsilon_{33} = \frac{1}{R_1} \frac{u_2}{\xi}, \quad (2)$$

где \$u_1\$ – перемещение в радиальном направлении; \$u_2\$ – то же в осевом направлении.

Физические уравнения с учетом объемных деформаций и деформаций ползучести имеют вид:

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \alpha T + \frac{1}{3} S + \epsilon_{11}^c; \\ \epsilon_{22} &= \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] + \alpha T + \frac{1}{3} S + \epsilon_{22}^c; \\ \epsilon_{33} &= \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{11})] + \alpha T + \frac{1}{3} S + \epsilon_{33}^c, \end{aligned} \quad (3)$$

где \$T(r, Z)\$ – предполагается заданной функцией от координат; \$S(T(r, Z), \phi t)\$ – функция радиационного распухания; \$\phi\$ – нейтронный поток; \$\epsilon_{ij}^c\$ – деформации ползучести.

Граничные условия (4):

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= -P_b \text{ при } \rho = 1; \\ \sigma_{11} &= -P_n \text{ при } \rho = R_2 / R_1; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{33} = 0 \text{ при } \xi = 0; \xi = L/R_1.$$

Определение НДС осуществляется численным методом, выражая искомые величины через перемещения. С учетом этого система уравнений равновесия запишется следующим образом (5):

$$\begin{aligned} & \nu \left\{ \frac{u_{2i+1,j+1} - u_{2i+1,j-1} - u_{2i-1,j+1} + u_{2i-1,j-1}}{4\Delta\rho\Delta\xi} - \frac{u_{1i+1,j} - 2u_{1i,j} + u_{1i-1,j}}{\Delta\rho^2} - \frac{u_{1i,j}}{\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{u_{1i+1,j} - u_{1i-1,j}}{2\Delta\rho} \right\} + \\ & + \frac{u_{1i+1,j} - 2u_{1i,j} + u_{1i-1,j}}{\Delta\rho^2} + \frac{1}{\rho}(1-2\nu) \left(\frac{u_{1i+1,j} - u_{1i-1,j}}{2\Delta\rho} - \frac{u_{1i,j}}{\rho} \right) - (1+\nu) \left(\alpha \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta\rho} + \frac{1}{3} \frac{S_{i+1,j} - S_{i-1,j}}{2\Delta\rho} \right) - \\ & - \frac{\varepsilon_{11i+1,j}^c - \varepsilon_{11i-1,j}^c}{2\Delta\rho} (1-\nu) - \nu \left(\frac{\varepsilon_{22i+1,j}^c - \varepsilon_{22i-1,j}^c}{2\Delta\rho} + \frac{\varepsilon_{33i+1,j}^c - \varepsilon_{33i-1,j}^c}{2\Delta\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \left((1-2\nu)(\varepsilon_{11i,j}^c + \varepsilon_{22i,j}^c) \right) = 0; \tag{5} \\ & \nu \left\{ \frac{u_{1i+1,j+1} - u_{1i+1,j-1} - u_{1i-1,j+1} + u_{1i-1,j-1}}{4\Delta\rho\Delta\xi} - \frac{u_{2i,j+1} - 2u_{2i,j} + u_{2i,j-1}}{\Delta\xi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{u_{1i,j+1} - u_{1i,j-1}}{2\Delta\xi} \right\} + \\ & + \frac{u_{2i,j+1} - 2u_{2i,j} + u_{2i,j-1}}{\Delta\xi^2} - (1+\nu) \left(\alpha \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta\xi} + \frac{1}{3} \frac{S_{i,j+1} - S_{i,j-1}}{2\Delta\xi} \right) - \\ & - \frac{\varepsilon_{33i,j+1}^c - \varepsilon_{33i,j-1}^c}{2\Delta\xi} (1-\nu) - \nu \left(\frac{\varepsilon_{11i,j+1}^c - \varepsilon_{11i,j-1}^c}{2\Delta\xi} + \frac{\varepsilon_{22i,j+1}^c - \varepsilon_{22i,j-1}^c}{2\Delta\xi} \right) = 0. \end{aligned}$$

Уравнения (5) записаны для внутренних точек области, а граничные условия будут иметь следующий вид (6):

$$\begin{aligned} & \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{\nu}{R_1} \left(\frac{u_{2i,j+2} - u_{2i,j-1}}{2\Delta\xi} - \frac{u_{1i+1,j} - u_{1i-1,j}}{2\Delta\rho} + \frac{u_{1i,j}}{\rho} \right) + \frac{1}{R_1} \frac{u_{1i+1,j} - u_{1i-1,j}}{2\Delta\rho} - \right. \\ & \left. - (1+\nu) \left(\alpha T_{i,j} + \frac{1}{3} S_{i,j} \right) - \varepsilon_{11i,j}^c (1-\nu) - \nu(\varepsilon_{22i,j}^c + \varepsilon_{33i,j}^c) \right] = -P_B; \\ & \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{\nu}{R_1} \left(\frac{u_{2i,j+2} - u_{2i,j-1}}{2\Delta\xi} - \frac{u_{1i+1,j} - u_{1i-1,j}}{2\Delta\rho} + \frac{u_{1i,j}}{\rho} \right) + \frac{1}{R_1} \frac{u_{1i+1,j} - u_{1i-1,j}}{2\Delta\rho} - \right. \\ & \left. - (1+\nu) \left(\alpha T_{i,j} + \frac{1}{3} S_{i,j} \right) - \varepsilon_{11i,j}^c (1-\nu) - \nu(\varepsilon_{22i,j}^c + \varepsilon_{33i,j}^c) \right] = -P_H; \\ & \frac{1}{R_1} \frac{u_{2i,j+2} - u_{2i,j-1}}{2\Delta\xi} = 0 \text{ при } \xi = 0; \xi = \frac{L}{R_1}. \end{aligned} \tag{6}$$

1. Полученные разностные уравнения решаются в начальный момент времени ($t = 0$), когда деформации ползучести отсутствуют ($\varepsilon_{11}^c = \varepsilon_{22}^c = \varepsilon_{33}^c =_{t=0} 0$). Определяем u_1 и u_2 , откуда находим главные напряжения и деформации, возникающие в цилиндре [2].

2. Определяем скорость деформации ползучести (7)

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_u^c}{\sigma_u} S_{kl}, \tag{7}$$

где $S_{kl} = \sigma_{kl} - \delta_{kl}\sigma$ – девиатор напряжений; $\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & k = l \\ 0, & k \neq l \end{cases}$ – символ Кронекера; $\dot{\varepsilon}_{kl}^c = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{kl}^c \dot{\varepsilon}_{kl}^c}$ – скорость интенсивности деформаций ползучести; $\sigma_{kl} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{kl} S_{kl}}$ – интенсивность напряжений.

Закон ползучести $\dot{\varepsilon}_u^c = f(\sigma_u, T, \varphi t, t)$ предполагаем известным.

3. Используя шаговый метод по времени, определяем деформации ползучести на n -м шаге

$$\varepsilon_{kln}^c = \varepsilon_{kln-1}^c + \dot{\varepsilon}_{kln-1}^c \Delta t, \quad (8)$$

где ε_{kln-1}^c – величины деформаций ползучести на предыдущем шаге по времени; $\dot{\varepsilon}_{kln-1}^c$ – величины скоростей деформации ползучести в момент времени t_{n-1} ; Δt – шаг по времени; $k, l = 1, 2, 3$.

4. Полученные деформации ползучести подставляем в исходное уравнение равновесия и в граничные условия. Решаем заново систему

уравнений (5), (6) с учетом деформаций ползучести полученных на прошлом шаге по времени и т. д.

ВЫВОД

Данный алгоритм решения позволяет производить расчеты напряженно-деформированного состояния полых цилиндров при значительных объемных изменениях, вызванных неравномерным нагревом и нейтронным облучением с учетом тепловой и радиационной ползучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов, И. С. Прочность элементов конструкций при облучении / И. С. Куликов, Б. Е. Твердовкин. – Минск, 1990. – 134 с.
2. Клус, С. А. Напряженно-деформированное состояние полого толстостенного цилиндра при неравномерном нагреве и радиационном облучении / С. А. Клус, И. С. Куликов, А. В. Чигарев // Инновации в машиностроении. – 2008. – № 23. – С. 218–224.

Поступила 03.03.2009

УДК 629.11.001.24:531.3

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РИТМИЧНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА

Канд. техн. наук, доц. ЧЕПЕЛЕВА Т. И.

Белорусский национальный технический университет

Цель статьи – рассмотрение сосредоточенных и распределенных конкурирующих процессов и некоторых основных положений метода структурирования ресурсов машиностроительного производства.

Возможность конвейерной реализации различных конкурирующих процессов зависит от практической возможности представления общего ресурса в виде последовательности составных частей. Множество процессов P назовем множеством конкурирующих процессов, если эти процессы обладают хотя бы одним

общим ресурсом. Через общие ресурсы осуществляется взаимодействие процессов производства. Особую роль в машиностроении играют структурирование производственного ресурса

и решение проблем оптимальной организации как параллельных конкурирующих процессов производства, так и комплексных, а также их сосредоточенное распределение и выполнение. Разработан математический аппарат сетевых дуговзвешенных графов, а также получены способы расчета точных значений минималь-