УДК 621.94.084

Клус С.А.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ НА НДС ПОЛОГО ДЛИННОГО ЦИЛИНДРА

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Фактор ползучести является весьма существенным при оценке работоспособности элементов активных зон ядерных реакторов. Она совместно с распуханием может привести к изменению размеров и формы оболочек твэлов и чехлов тепловыделяющих сборок, являющихся тонкостенными конструкциями [1].

Определение напряженно-деформированного состояния элементов активных зон ядерных реакторов – достаточно существенный момент при оценке работоспособности тепловыделяющих элементов (твэлов), которые в большинстве случаев имеют форму цилиндров. С этой точки зрения, учитывая ползучесть конструкционных материалов при неравномерном нагреве и облучении, расчеты оболочек твэлов на прочность являются важнейшим этапом перед проведением дорогостоящих экспериментальных исследований.

Рассмотрим осесимметричное распределение напряжений и деформаций полого бесконечно длинного цилиндра в условиях неравномерного нагрева, реакторного облучения и под действием равномерного внутреннего и внешнего давлений с учетом тепловой и радиационной ползучести (рис. 1) [2].

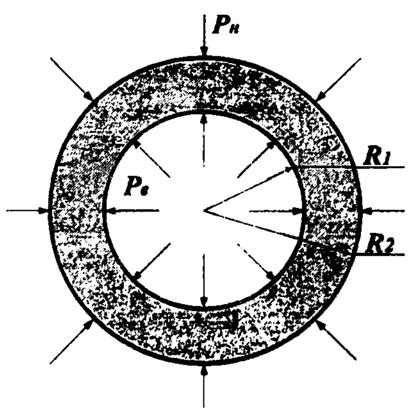

Рис. 1. Сечение бесконечно длинного полого цилиндра нагруженного внешним и внутренним давлениями.

Тогда в цилиндрической системе координат поле напряжений имеет отличные от нуля компоненты σ_{11}, $\sigma_{22}, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$. Для полого открытого цилиндра выполняется условие плоской деформации ($\varepsilon_{33} = 0$).

С учетом этого дифференциальные уравнения равновесия примут вид:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial r} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{r} = 0. \qquad (1)$$

Деформации и перемещения точек цилиндра связаны следующими соотношениями Коши:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial r}; \ \varepsilon_{22} = \frac{u}{r}. \qquad (2)$$

Физические уравнения записываются в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{E}(\sigma_{11} - \nu\sigma_{22}) + \alpha T(r) + \frac{1}{3}S(T(r),\phi,t) + \varepsilon_{11}^{c}; \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{E}(\sigma_{22} - \nu\sigma_{11}) + \alpha T(r) + \frac{1}{3}S(T(r),\phi,t) + \varepsilon_{22}^{c}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Где T(r) предполагается заданной функцией от координат; S(T(r), ф, t) функция, зависящая от температуры, времени, заданного нейтронного потока.

ГУ примем следующими:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= P_B \text{ при } r = R_1, \\ \sigma_{11} &= P_H \text{ при } r = R_2. \end{aligned} \qquad (4)$$

Решение задачи будем искать в перемещениях, для чего уравнение (3) с использованием соотношений Коши запишем в следующем виде

$$\begin{aligned}
\sigma_{11} &= \frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{\partial u}{\partial r}+\nu\frac{u}{r}-(1+\nu)(\alpha T(r)+\frac{1}{3}S(T(r),\phi,t))-\varepsilon_{11}^{c}-\nu\varepsilon_{22}^{c}\right];\\
\sigma_{22} &= \frac{E}{1-\nu^2}\left[\nu\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{u}{r}-(1+\nu)(\alpha T(r)+\frac{1}{3}S(T(r),\phi,t))-\varepsilon_{22}^{c}-\nu\varepsilon_{11}^{c}\right].
\end{aligned} \tag{5}$$

Тогда уравнение равновесие представится в виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}-\frac{u}{r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}-(1+\nu)(\alpha\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{3}\frac{\partial S}{\partial r})-\frac{\partial\varepsilon_{11}^{c}}{\partial r}-\nu\frac{\partial\varepsilon_{22}^{c}}{\partial r}-\frac{1-\nu}{r}(\varepsilon_{11}^{c}-\varepsilon_{22}^{c}). \tag{6}$$

Со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned}
&\frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{\partial u}{\partial r}+\nu\frac{u}{R_1}-(1+\nu)(\alpha T(R_1)+\frac{1}{3}S(T(R_1),\phi,t))-\varepsilon_{11}^{c}-\nu\varepsilon_{22}^{c}\right]=-P_B;\\
&\frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{\partial u}{\partial r}+\nu\frac{u}{R_2}-(1+\nu)(\alpha T(R_2)+\frac{1}{3}S(T(R_2),\phi,t))-\varepsilon_{11}^{c}-\nu\varepsilon_{22}^{c}\right]=-P_H.
\end{aligned} \tag{7}$$

Для определения напряжений используем шаговый метод, одновременно решая на каждом временном шаге уравнение (6) методом конечных разностей с учетом ГУ (7).

Уравнение равновесия в разностном виде примет вид [3]:

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{u_{i+1}-2u_i+u_{i-1}}{h^2}-\frac{u_i}{r_i^2}+\frac{1}{r_i}\frac{u_i-u_{i-1}}{h}\right)-(1+\nu)\left(\alpha\frac{T_i-T_{i-1}}{h}+\frac{1}{3}\frac{S_i-S_{i-1}}{h}\right)-\\
&\frac{\varepsilon_{11,i}^{c}-\varepsilon_{11,i-1}^{c}}{h}-\nu\frac{\varepsilon_{22,i}^{c}-\varepsilon_{22,i-1}^{c}}{h}-\frac{1-\nu}{r_i}(\varepsilon_{11,i}^{c}-\varepsilon_{22,i}^{c})=0
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{u_1-u_0}{h}+\nu\frac{u_0}{r_0}-(1+\nu)(\alpha T(r_0)+\frac{1}{3}S(T(r_0),\phi,t))-\varepsilon_{11,0}^{c}-\nu\varepsilon_{22,0}^{c}\right]=-P_B;\\
&\frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{u_n-u_{n-1}}{h}+\nu\frac{u_n}{r_n}-(1+\nu)(\alpha T(r_n)+\frac{1}{3}S(T(r_n),\phi,t))-\varepsilon_{11,n}^{c}-\nu\varepsilon_{22,n}^{c}\right]=-P_H.
\end{aligned} \tag{9}$$

В качестве примера рассмотрим напряженно-деформированное состояние оболочки твэла реактора на быстрых нейтронах имеющей форму полого осесимметричного цилиндра изготовленного из стали ОХ16Н15М3Б (316L – зарубежный аналог). Оболочка внутренним радиусом R_1 =0,003 м и внешним радиусом R_2 =0,0033 м находится под действием равномерных давлений: внутреннего P_B=7,5 МПа и внешнего P_H=0,1 МПа, в условиях объемных термических T(r) и радиационных S(T(r), ϕt) деформаций со следующими данными: E=1,5$\times 10^5$ МПа, T(R_1)= 500(773) °С(К), $\alpha=18.3\cdot10^{-6}$ град$^{-1}$.

Для решения системы разностных уравнений был применен метод Гауса-Жордана, где в качестве неизвестных выступили перемещения u вдоль радиуса r. Решение разностных уравнений было реализовано при помощи языка программирования С++.

При решении системы алгебраических уравнений выбирался шаг из расчета повышения точности решения при увеличении числа разбиений радиуса.

Одна из особенностей оболочек твэлов (в данной задаче они рассматривается как толстостенные цилиндры) состоит в том, что они подвержены воздействию высокого флюенса нейтронов с энергией $\overline{E} = 10.1 МэВ$ ($10^{22} \div 10^{23}$ *нейт/см*^{2}), которые в быстрых ядерных реактора вызывает радиационное распухание материала оболочки и чехлов ТВС, что приводит к дополнительным напряжениям в них ввиду зависимости распухания от неравномерной температуры. Обычным ресурс твэла, а, следовательно, и оболочки твэла, достигает порядка 8000 ч., поэтому важными факторами как тепловая и радиационная ползучесть.

На рис. 2-4 представлены результаты расчетов НДС оболочки твэла по специально разработанной программе.

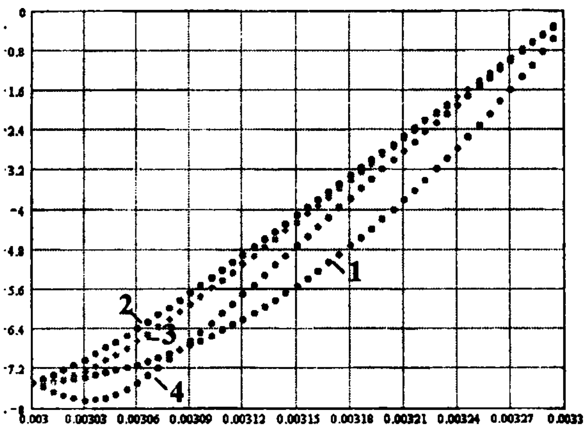

Рис. 2. Кривые зависимости радиальных напряжений от радиуса (1 – при 0 часов, 2 – при 1000 часов, 3 – при 4000 часов, 4 – при 7000 часов)

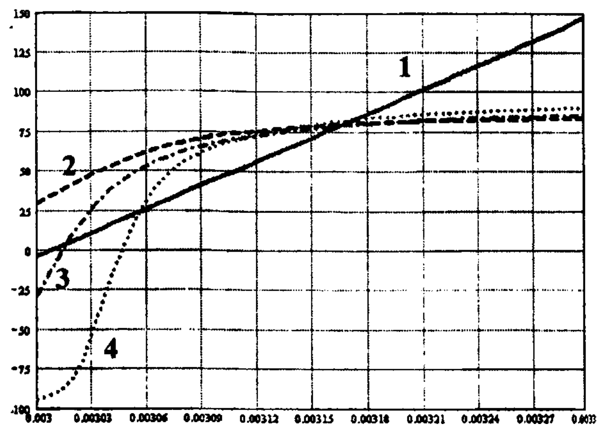

Рис. 3. Кривая зависимости окружных напряжений от радиуса (1 – при 0 часов, 2 – при 1000 часов, 3 – при 4000 часов, 4 – при 7000 часов)

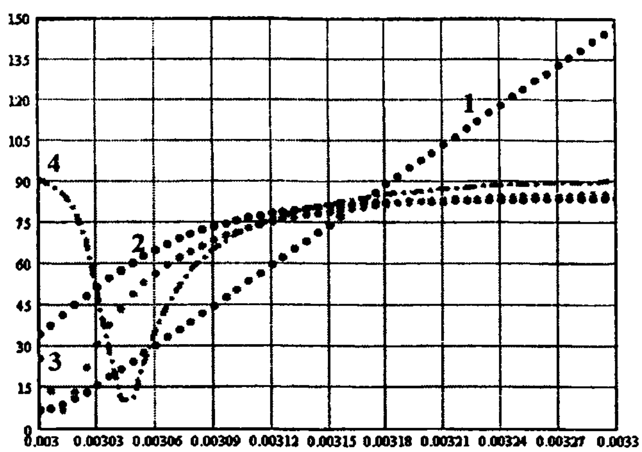

Рис. 4. Кривые зависимостей распределения эквивалентных напряжений от радиуса (1 – при 0 часов, 2 – при 1000 часов, 3 – при 4000 часов, 4 – при 7000 часов)

Из рис. 2 следует, что при времени эксплуатации оболочки твэла тысяча и четыре тысячи часов (кривая 2 и 3 соответственно), происходит некоторое снижение радиальных напряжений, что обусловлено влиянием ползучести. Однако с течением времени существенным становится неравномерное радиационное распухание, вызванное нейтронным облучением и являющееся источником дополнительных напряжений в оболочке твэла из-за неравномерности температурного поля. Этим фактором можно объяснить изменения в форме кривых радиальных и окружных напряжений (рис. 2, 3), а также кривой интенсивности напряжений (рис. 4). Так же можно отметить, что напряжения за срединной плоскостью практически не изменяются с увеличением времени эксплуатации. Но можно предположить, что изменения начнутся при дальнейшем нагружении оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов И.С., Нестеренко, Тверковкин Б.Е. Прочность элементов конструкций при облучении. Минск. 1990, -144с. 3. И. С. Куликов, Б. Е. Тверковкин "Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов" Мн., «Наука и техника» 1984. 4. Клус С.А., Куликов И.С. НДС неравномерно нагретого полого короткого цилиндра с учетом тепловой и радиационной ползучести. – Республиканский межведомственный сборник «Машиностроение», Минск, 2008, т.1,с.179-182.

УДК 539.3

Мойсейчик Е.А., Стефанович Р.В., Филатов С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ РАМЫ ПО СОБСТВЕННОМУ ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ МАТЕРИАЛА

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь
Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ
Минск, Беларусь

Определение напряжений с использованием теплового излучения применяется при необходимости бесконтактного измерения напряжений в элементах конструкций [1]. В основу такого подхода положена взаимозависимость между напряженно-деформированным и тепловым состояниями твердого тела[2]. Такая зависимость проявляется при упругой, упругопластической и пластической стадиях работы различных материалов. На основании исследований Кельвина, Био зависимость между изменениями температуры материала ΔT и напряженно-деформированного состояния $(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij})$ можно представить уравнением [1]:

$$\Delta T = \frac{T}{\rho C_{\varepsilon}} \sum_{ij} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \varepsilon_{ij} + \frac{Q}{\rho C_{\varepsilon}}, \quad (1)$$

$$ij = 1,\ 2,3,$$

где ρ, C_{ε} - соответственно, плотность и теплоемкость материала при температуре T. Частные производные в (1) легко вычисляются с помощью уравнений, связывающих напряжения, деформации и температуру в изотропном упругом теле. Для адиабатических условий, когда $Q=0$, это уравнение сводится к виду

$$\Delta T = \frac{E \alpha_L T}{\rho C_{\varepsilon}(1-2\nu)} \sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}$ – сумма изменений трех линейных деформаций, E, ν, α_L – соответственно, модуль упругости, коэффициент Пуассона, температурный коэффициент расширения материала при температуре T. Учитывая связь между C_{ε} и C_p (удельные тепловыделения при постоянных деформации и давлении) и выражая линейные деформации через нормальные напряжения, уравнение (2) можно записать в виде