УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛИННОГО СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ И НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК
Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь

Рассмотрим бесконечно длинный однородный круговой цилиндр с равномерным тепловыделением по сечению, который подвергается воздействию равномерного давления P со стороны внешней поверхности и находится в условиях радиационного распухания суммарным флюенсом быстрых нейтронов $\Phi = \varphi t$ ($\bar{E} > 0{,}1$ МэВ) с учетом тепловой и радиационной ползучести. Температура T_S на внешней поверхности считается известной на основании решения задачи теплообмена с окружающей средой. Создана механико-математическая модель деформирования цилиндра [1]. Получено дифференциальное уравнение деформирования с учетом ползучести:

$$\frac{d^2u_r}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{du_r}{dr}-\frac{u_r}{r^2}=\left(\alpha\frac{dT}{dr}+\frac{1}{3}\frac{dS}{dr}\right)\frac{1+\nu}{1-\nu}+\frac{1}{r}\left(\varepsilon_r^{cr}-\varepsilon_\theta^{cr}\right)\left(1-\nu\right)+\frac{d\varepsilon_r^{cr}}{dr}+\nu\frac{d\varepsilon_\theta^{cr}}{dr} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\text{при } r = 0\text{: } u_r = 0;\ \text{ при } r = R\text{: } \sigma_r = -P, \quad (2)$$

где ε_r, ε_θ, ε_z – радиальные, тангенциальные и осевые деформации; α – коэффициент линейного расширения; $S\left(T\left(r\right),\varphi t\right)$ – эмпирическая функция радиационного распухания [2]; ν – коэффициент Пуассона; ε^{cr} – деформации, обусловленные ползучестью материала.

Получены выражения для компонент тензора напряжений и деформаций:

$$\sigma_r=\frac{\lambda}{\nu}\cdot\left(\left(1-\nu\right)\cdot\varepsilon_r+\nu\cdot\varepsilon_\theta-(1+\nu)\cdot\left(\varepsilon_r^t+\varepsilon_r^{sw}\right)-\left(1-\nu\right)\varepsilon_r^{cr}-\nu\left(1-\nu\right)\varepsilon_\theta^{cr}-\nu\varepsilon_z^{cr}\right);$$

$$\sigma_\theta=\frac{\lambda}{\nu}\cdot\left(\left(1-\nu\right)\cdot\varepsilon_\theta+\nu\cdot\varepsilon_r-(1+\nu)\cdot\left(\varepsilon_r^t+\varepsilon_r^{sw}\right)-\left(1-\nu\right)\varepsilon_\theta^{cr}-\nu\left(1-\nu\right)\varepsilon_r^{cr}-\nu\varepsilon_z^{cr}\right);$$

$$\sigma_z=\frac{\lambda}{\nu}\cdot\left(\nu\cdot\left(\varepsilon_r+\varepsilon_\theta\right)-(1+\nu)\left(\varepsilon_r^t+\varepsilon_r^{sw}\right)-\varepsilon_\theta^{cr}-\varepsilon_r^{cr}-\frac{\left(1-\nu\right)}{\nu}\varepsilon_z^{cr}\right); \quad (3)$$

$$\varepsilon_r=\frac{1}{E}\left(\sigma_r-\nu\left(\sigma_\theta+\sigma_z\right)\right)+\varepsilon_r^t+\varepsilon_r^{sw}+\varepsilon_r^{cr};\quad \varepsilon_\theta=\frac{1}{E}\left(\sigma_\theta-\nu\left(\sigma_r+\sigma_z\right)\right)+\varepsilon_\theta^t+\varepsilon_\theta^s+\varepsilon_\theta^{cr};$$

$$\varepsilon_z=\frac{1}{E}\left(\sigma_z-\nu\left(\sigma_\theta+\sigma_r\right)\right)+\varepsilon_z^t+\varepsilon_z^{sw}+\varepsilon_z^{cr}, \quad (4)$$

где λ – параметр Ламе; ε^t, ε^{sw} – деформации, вызванные температурным воздействием и радиационным распуханием материала соответственно,

$$\varepsilon^{t} = \alpha \cdot T; \qquad \varepsilon^{sw} = \frac{1}{3} S\left(T\left(r\right), \varphi t\right). \tag{5}$$

Разработан алгоритм численной реализации и компьютерная программа по исследованию НДС. Интервал времени нагружения t_{Σ} разбивается на множество n шагов Δt: $n = \frac{t_{\Sigma}}{\Delta t}$. Затем, в соответствии с методикой [1], решается дифференциальное уравнение (1) с граничными условиями (2) на нулевом шаге (для момента времени t = 0), при котором деформации ползучести отсутствуют. По формулам (3) определяются компоненты тензора напряжений. Компоненты скорости деформации ползучести находятся на каждом временном шаге по формулам

$$\dot{\varepsilon}_{r}^{cr} = \frac{3}{2}\frac{\dot{\varepsilon}_{u}^{cr}}{\sigma_{u}} \cdot \left(2\sigma_{r} - \sigma_{\theta} - \sigma_{z}\right); \quad \dot{\varepsilon}_{\theta}^{cr} = \frac{3}{2}\frac{\dot{\varepsilon}_{u}^{cr}}{\sigma_{u}} \cdot \left(2\sigma_{\theta} - \sigma_{r} - \sigma_{z}\right); \quad \dot{\varepsilon}_{z}^{cr} = \frac{3}{2}\frac{\dot{\varepsilon}_{u}^{cr}}{\sigma_{u}} \cdot \left(2\sigma_{z} - \sigma_{\theta} - \sigma_{r}\right), \tag{6}$$

где σ_{u} – интенсивность напряжений, $\sigma_{u} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{\left(\sigma_{r} - \sigma_{\theta}\right)^{2} + \left(\sigma_{\theta} - \sigma_{z}\right)^{2} + \left(\sigma_{r} - \sigma_{z}\right)^{2}}$;

$\dot{\varepsilon}_{u}^{cr}$ – закон терморадиационной ползучести,

$$\dot{\varepsilon}_{u}^{cr} = 1,49 \cdot 10^{10} \cdot \sigma_{u}^{2,44} \cdot \exp\left(-63200 / T\right). \tag{7}$$

Деформации ползучести на n-м шаге определяются из выражений:

$$\varepsilon_{r(n)}^{cr} = \varepsilon_{r(n-1)}^{cr} + \dot{\varepsilon}_{r(n-1)}^{cr} \cdot \Delta t; \quad \varepsilon_{\theta(n)}^{cr} = \varepsilon_{\theta(n-1)}^{cr} + \dot{\varepsilon}_{\theta(n-1)}^{cr} \cdot \Delta t; \quad \varepsilon_{z(n)}^{cr} = \varepsilon_{z(n-1)}^{cr} + \dot{\varepsilon}_{z(n-1)}^{cr} \cdot \Delta t, \tag{8}$$

где $\varepsilon_{(n-1)}^{cr}, \dot{\varepsilon}_{(n-1)}^{cr}$ – составляющие деформации ползучести и скорости деформации ползучести на предыдущем временном шаге.

Найденные на рассматриваемом временном шаге компоненты деформации ползучести подставляются в дифференциальное уравнение (1) и граничные условия (2), затем на следующем шаге решается новое дифференциальное уравнение, определяются перемещения, компоненты напряжений и деформаций, и расчет повторяется.

Численный эксперимент проводился для аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15М3Б [2]. По результатам расчетов определены компоненты тензора напряжений и деформаций и исследована их зависимость от радиуса и времени. Проведено сравнение результатов исследования НДС с учетом и без учета терморадиационной ползучести.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Веремейчик, А. И.** Исследование напряженно-деформированного состояния тел цилиндрической формы в условиях радиационного распухания и ползучести / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. – Брест: БрГТУ, 2019. – С. 141–144.

2. **Ширвель, П. И.** Прочность неравномерно нагретых цилиндрических тел в условиях ползучести и радиационного облучения / П. И. Ширвель, А. В. Чигарев, И. С. Куликов. – Минск: БНТУ, 2014. – 252 с.