

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОГО КОРОТКОГО ЦИЛИНДРА В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ

А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич

*Учреждение образования «Брестский государственный  
технический университет», Республика Беларусь*

Рассматривается деформированный короткий сплошной круговой цилиндр из аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ (316, 316L по классификации AISI), нагруженный внешним радиальным и осевым давлением и находящийся в условиях интенсивного облучения потоком быстрых нейтронов с кинетическими энергиями  $\bar{E} > 0,1$  МэВ (рис. 1).

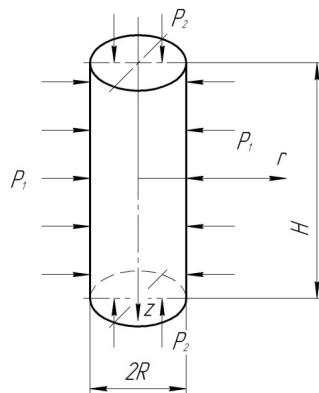


Рис. 1. Расчетная схема

Зависимость температуры  $T$  и радиационного распухания  $S$  от координат  $r, z$  приведена на рис. 2.

Дифференциальные уравнения равновесия имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  – радиальные, тангенциальные и осевые напряжения;  $r$  – текущий радиус;  $\tau_{rz}$  – касательные напряжения.

Граничные условия:

при  $r = 0$ :  $u_r = 0$ ;  $\frac{\partial u_z}{\partial r} = 0$ ; при  $r = R$ :  $\sigma_r = -P_1 = -10\text{МПа}$ ;  $\tau_{rz} = 0$ ,

при  $z = 0$ :  $u_z = 0$ ;  $\tau_{rz} = 0$ ; при  $z = H/2$ :  $\sigma_z = -P_2 = -20\text{МПа}$ ;  $\tau_{rz} = 0$ ,

где  $u_r, u_z$  – радиальное и осевое перемещение;  $P_1, P_2$  – внешнее давление на боковой и торцевой поверхности, соответственно.

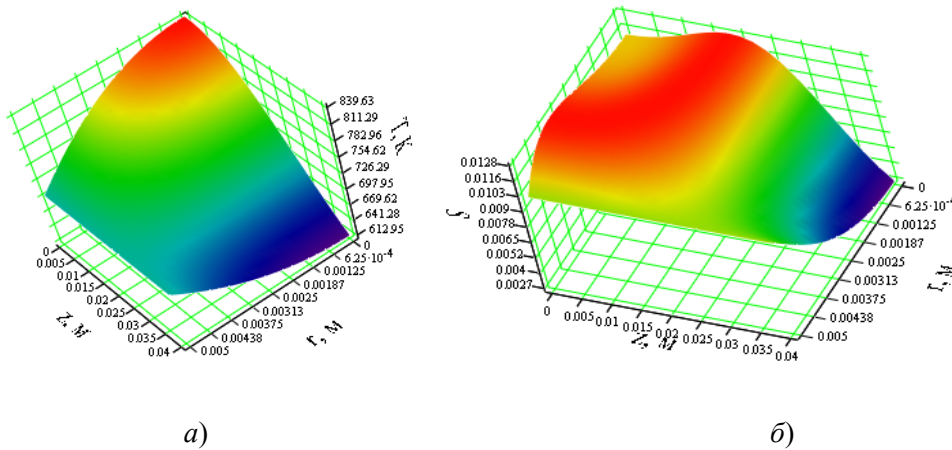


Рис. 2. Поверхности температуры (а) и радиационного распухания (б) в момент времени 1000 ч, плотность потока быстрых нейтронов  $\varphi = 2,81 \cdot 10^{19} \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}}$

Математически задача термоупругости в указанной постановке описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных [1]:

$$\begin{cases} \lambda \left( \frac{(1-\nu)}{\nu} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial r \partial z} + \mu \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{E}{1-2\nu} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial r} \right) = 0; \\ \lambda \left( \frac{(1-\nu)}{\nu} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z \partial r} + \frac{1}{2r} \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} \right) - \frac{E}{(1-2\nu)} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial z} \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$ ;  $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$  – параметры Ламе.

Решение системы уравнений (2) проводится численно с использованием метода конечных разностей. Программная реализация разработанного алгоритма выполняется на базе системы компьютерной алгебры MathCAD 15. Получена система конечно-разностных уравнений для внутренних точек области и конечно-разностные соотношения для граничных условий [2].

По результатам численного расчета определены зависимости компонент тензоров напряжений и деформаций от координат с возможностью варьирования геометрическими параметрами тела, характеристиками материала, размерами конечно-разностной сетки и условиями нагружения. Исследована зависимость напряжений и деформаций от времени облучения и свойств материала. Кроме того, проведено исследование влияния температуры и интенсивности радиационного воздействия на напряжения, деформации и перемещения точек цилиндра.

Типичная зависимость радиальных  $\sigma_r$  и тангенциальных  $\sigma_\theta$  напряжений от координаты  $z$  в различных сечениях расчетной схемы для 1000 ч облучения дана на рис. 3.

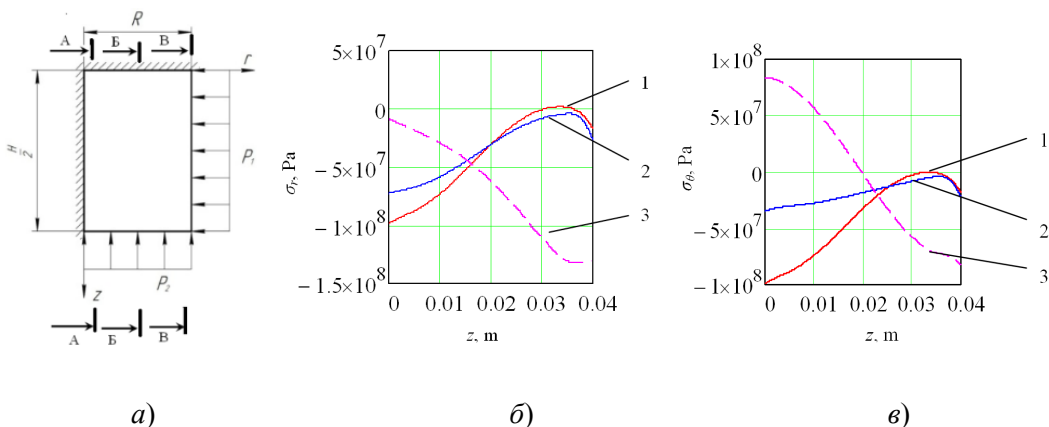


Рис. 3. Типичная зависимость радиальных  $\sigma_r$  (б) и тангенциальных  $\sigma_\theta$  (в) напряжений от координаты  $z$  в различных сечениях расчетной схемы (а) для 1000 ч облучения: 1 – сечение А–А; 2 – сечение Б–Б; 3 – сечение В–В

Достоверность разработанной модели ввиду отсутствия аналитических решений такого рода задач проверялась при раздельном силовом и температурном нагружении. Сравнение результатов с существующими аналитическими и численными решениями, например, [3], подтвердило точность конечно-разностных схем. Кроме того, проведена проверка согласованности конечно-разностных схем. Устойчивость конечно-разностной задачи проверялась методом фон Неймана. Для оценки сходимости разностных схем применялась теорема Лакса.

#### Литература

1. Хвисевич, В. М. Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических тел конечной длины при нагреве и нейтронном облучении / В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Теорет. и прикладная механика. – 2017. – Вып. 32. – С. 65–71.
2. Хвисевич, В. М. Решение некоторых термоупругих задач для цилиндрических тел с учетом радиационного облучения / В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик // Актуальные проблемы прочности. – Витебск : УО «ВГТУ», 2018. – Т. 1. – С. 385–405.
3. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.