

О. И. Ч е л я п и н а (Подольск, РОНЦ МГОУ). **Температурные и остаточные напряжения в цилиндрических оболочках.**

Цилиндрические оболочки используют для удержания продуктов деления в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов. Диффузионная проницаемость оболочек зависит от уровня и характера распределения внутренних напряжений. Среди последних определяющая роль принадлежит температурным и остаточным напряжениям. Появление первых обусловлено неоднородной температурной деформацией в объеме материала.

Диффузионная миграция продуктов деления и примесей внедрения при выгорании ядерного топлива зависит от первого инварианта тензора внутренних напряжений. Энергия связи соответствующих точечных дефектов с внутренними напряжениями определяется известным соотношением [1]

$$V = -\frac{\sigma_{ll}}{3}\delta v,$$

где σ_{ll} — первый инвариант тензора внутренних напряжений, δv — изменение объема материала при размещении точечного дефекта. Для стационарного температурного поля в цилиндрической оболочке величина σ_{ll} имеет вид [2]

$$\sigma_{ll} = \frac{2\alpha(T_1 - T_2)\mu(1 + \nu)}{(1 - \nu)\ln(R/r_0)} \left(1 - 2\ln\frac{R}{r}\right),$$

где α — коэффициент линейного расширения, μ — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, r_0 и R — внутренний и внешний радиусы цилиндрической оболочки, $(T_1 - T_2)$ — температурный перепад между внутренней и внешней поверхностями оболочки. Для оболочек тепловыделяющих элементов обычно $T_1 > T_2$. Поэтому внутренняя поверхность оболочки находится в состоянии сжатия, а внешняя — в состоянии растяжения. Формирование остаточных напряжений в цилиндрической оболочке осуществляют следующим образом. Берега разреза оболочки раздвигают на угол ω и помещают туда недостающий материал. При такой операции область в окрестности внешней поверхности оболочки находится в состоянии сжатия, а в окрестности внутренней поверхности — в состоянии растяжения. В этом случае остаточные напряжения уменьшают температурные. Другой предельный случай остаточных напряжений отличается по знаку от предыдущего. Эти напряжения усиливают температурные. Первый инвариант тензора остаточных напряжений также логарифмически зависит от радиальной координаты

$$\sigma_{ll} = \frac{\mu\omega(1 + \nu)}{2\pi(1 - \nu)} \left(1 - 2\ln\frac{R}{r}\right), \quad (1)$$

где ω — угол поворота берегов разреза оболочки. Остальные обозначения соответствуют принятым ранее. Величина $\omega/(2\pi)$ представляет собой относительную деформацию при образовании остаточных напряжений в цилиндрической оболочке (угол ω измеряется в радианах). Остаточные напряжения соотношения (3) усиливают температурные.

Концентрация точечных дефектов с учетом температурных и остаточных напряжений находится из решения задачи

$$\frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1 - \alpha_1 - \alpha_2}{r} \frac{\partial C}{\partial r},$$

$$C(r, 0) = 0, \quad C(r_0, t) = C_p, \quad C(R, t) = 0,$$

где D — коэффициент диффузии точечных дефектов. Безразмерные параметры задачи для температурных (α_1) и остаточных (α_2) напряжений имеют вид

$$\alpha_1 = \frac{4\alpha(T_1 - T_2)\mu(1 + \nu)\delta v}{3kT(1 - \nu)\ln(R/r_0)}, \quad \alpha_2 = \frac{\omega\mu(1 + \nu)\delta v}{3kT\pi(1 - \nu)},$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Таким образом, показана принципиальная возможность управления напряженным состоянием цилиндрической оболочки путем комбинации температурных и остаточных напряжений. Отсюда появляется возможность управления диффузионной проницаемостью цилиндрических оболочек тепловыделяющих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теодосиу К.* Упругие модели дефектов в кристаллах. М.: Мир, 1985. 351 с.
2. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979, 560 с.