Н. М. В л а с о в (Подольск, РОНЦ МГОУ). **Влияние внутренних напряжений на водородную проницаемость полого цилиндра.**

Исследована водородная проницаемость полого цилиндра из сплава циркония при наличии внутренних напряжений различной физической природы. Выбор такой модельной системы обусловлен следующими причинами: сплавы на основе циркония используют в ядерной энергетике, цилиндрические оболочки являются элементами конструкции энергетических установок, внутренние напряжения в полом цилиндре имеют логарифмическую зависимость от радиальной координаты. Последняя особенность упрощает решение задач диффузионной кинетики.

Основными типами внутренних напряжений являются температурные, концентрационные, остаточные. Упругое взаимодействие атомов водорода с внутренними напряжениями определяется известным соотношением

$$V = -\frac{\sigma_{ll}}{3}\delta v, \tag{1}$$

где σ_{ll} — первый инвариант тензора внутренних напряжений, δv — изменение объема материала при размещении атома водорода. Концентрация водорода находится из решения уравнения

$$\frac{1}{D}\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\nabla(X\nabla V)}{kT}, \qquad r_0 < r < R, \tag{2}$$

параболического типа при соответствующих начальном и граничных условиях [1, 2] $C = 0$ при $t = 0$, $C = C_0$ при $r = r_0$, $C = 0$ при $r = R$, где D — коэффициент диффузии атомов водорода, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, r_0 и R — внутренний и внешний радиусы полого цилиндра, C_0 — концентрация атомов водорода на внутренней поверхности полого цилиндра. Уравнение (2) связывает физику и механику при моделировании водородной проницаемости полого цилиндра. Физический смысл начального и граничных условий ясен. В начальный момент времени концентрация атомов водорода в полом цилиндре равна нулю. Нулевая концентрация водорода сохраняется и на внешней поверхности. На внутренней поверхности полого цилиндра концентрация атомов водорода поддерживается постоянной за счет внешних условий.

Потенциал V является гармонической функцией ($\Delta V = 0$), а его градиент обратно пропорционален радиусу в полярной системе координат ($\nabla V \sim 1/r$). Это приводит к следующей математической формулировке задачи (2):

$$\frac{1}{D}\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1-\beta_1-\beta_2-\beta_3}{r}\,\frac{\partial C}{\partial r}, \qquad r_0 < r < R, \tag{3}$$

с начальными и граничными условиями $C = 0$ при $t = 0$, $C = C_0$ при $r = r_0$, $C = 0$ при $r = R$, где β_1, β_2 и β_3 — безразмерные параметры задачи. Эти параметры определяют вклад температурных (β_1), концентрационных (β_2) и остаточных (β_3) напряжений в изменение водородной проницаемости полого цилиндра. Для принятых типов внутренних напряжений безразмерные параметры имеют вид

$$\beta_1 = \frac{4\alpha(T_1-T_2)\mu(1+\nu)\delta v}{3kT(1-\nu)\ln(R/r_0)}, \quad \beta_2 = \frac{4\beta(C_1-C_2)\mu(1+\nu)\delta v}{3kT(1-\nu)\ln(R/r_0)}, \quad \beta_3 = \frac{\omega\mu(1+\nu)\delta v}{3kT\sigma(1-\nu)}, \tag{4}$$

где α — коэффициент линейного расширения, μ — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, $(T_1 - T_2)$ — разность температур между внутренней и внешней поверхностями, β — относительное изменение параметра кристаллической решетки, $(C_1 - C_2)$ — разность концентраций атомов примеси между внутренней и внешней поверхностями, ω — угол поворота берегов разреза полого цилиндра. Величина $\omega/(2\pi)$

представляет собой относительную деформацию при образовании остаточных напряжений в полом цилиндре (угол ω измеряется в радианах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vlasov N. M.*, *Fedik I. I.* Simulation of material fracture in the field of thermal stresses. — J. Thermal Stresses, 2009, v. 32, p. 755–767.
2. *Власов Н. М.* Водородная проницаемость полого цилиндра с учетом термодиффузии и термонапряжений. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2010, т. 17, в. 2, с. 253–255.