

Н. М. В л а с о в, Ю. Г. Д р а г у н о в (Подольск, РОНЦ МГОУ им. В. С. Черномырдина). **Математическое моделирование водородной проницаемости цилиндрических оболочек.**

Цилиндрические оболочки принадлежат к наиболее распространенным элементам конструкций ядерной техники. В качестве примера достаточно упомянуть цилиндрические оболочки тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [1, 2]. Они предназначены для удержания продуктов деления и примесей внедрения при выгорании ядерного топлива. Прочностная надежность и ресурс эксплуатации оболочек определяются уровнем и характером распределения внутренних напряжений различной физической природы. К ним принадлежат температурные, концентрационные и остаточные напряжения. Они оказывают существенное влияние на кинетику диффузионных процессов, включая и водородную проницаемость. Под последним названием понимают диффузионный поток атомов водорода через внешнюю поверхность оболочки.

Исследована возможность управления внутренними напряжениями различной природы при математическом моделировании водородной проницаемости цилиндрической оболочки. Физическая сущность и математическое описание процесса управления достаточно прозрачны. Компоненты тензора внутренних напряжений различных типов описываются тензором второго ранга. В линейном пространстве справедливы законы тензорной алгебры. Физически это означает, что внутренние напряжения различной природы не взаимодействуют друг с другом. Отсюда непосредственно вытекает возможность управления внутренними напряжениями для изменения водородной проницаемости оболочек. Этому в значительной мере способствует одинаковая координатная зависимость рассматриваемых напряжений. Кроме того, атомы водорода обладают высокой диффузионной подвижностью в довольно широком температурном диапазоне. Так, например, при комнатной температуре коэффициент диффузии атомов водорода на несколько порядков превышает эту характеристику для примесей замещения и других примесей внедрения. Это позволяет рассматривать водородную проницаемость оболочки при наличии «застывшей» неоднородности из легирующих элементов.

Диффузионная кинетика атомов водорода зависит от первого инварианта тензора внутренних напряжений. Потенциал взаимодействия (энергия связи) атома водорода с полем напряжений определяется из выражения [3]

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

где σ_{ii} — первый инвариант тензора внутренних напряжений, δv — изменение объема материала при размещении атома водорода. Величина σ_{ii} для анализируемых типов внутренних напряжений имеет единую логарифмическую зависимость от радиальной координаты. Отличие присуще только постоянным, которые отражают природу внутренних напряжений. Подобная координатная зависимость позволяет получить

точное аналитическое решение уравнений диффузионной кинетики, поскольку логарифмическая функция является гармонической, а ее градиент обратно пропорционален радиусу в цилиндрической системе координат.

Приведены значения σ_{II} для температурных, концентрационных и остаточных напряжений. В рамках линейной теории упругости допускается их алгебраическое суммирование. Получены решения уравнений диффузионной кинетики и определена водородная проницаемость цилиндрической оболочки. Исследованы два варианта распределения внутренних напряжений: сжатие (растяжение) на внутренней поверхности и растяжение (сжатие) на внешней поверхности. Отношение диффузионных потоков атомов водорода через внешнюю поверхность (водородная проницаемость) зависит от величины R/r_0 , где r_0 и R — внутренний и внешний радиусы цилиндрической оболочки. Результаты математического моделирования представляют интерес при разработке материала покрытий для удержания атомов водорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власов Н. М., Федик И. И.* Тепловыделяющие элементы ядерных ракетных двигателей. М.: ЦНИИАтоминформ, 2001, 205 с.
2. *Власов Н. М., Драгунов Ю. Г.* Диффузионная проницаемость оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Проблемы машиностроения и автоматизации, 2012, № 3, с. 124–129.
3. *Драгунов Ю. Г., Власов Н. М., Иванов С. Д., Федик И. И.* Самоуравновешенные внутренние напряжения. М.: МГОУ, 2010, 391 с.