UDC 539/2

BUNDLE OF SOLID SOLUTION IN A CYLINDRICAL SHELL WITH INTERNAL STRESSES

Olga I. Chelyapina

RESC MSOU
142114, Podolsk, Moscow region, Russia K.Gotvald street, st.2/40
The applicant of the degree for candidate of sciences, associate professor
E-mail: chelyapina@pochta.ru

In this article analyzes the kinetics of the separation of the solid solution from substitutional impurities in the internal stresses field of the cylindrical shell.

Keywords: internal stresses; cylindrical shell; diffusion process; logarithmic dependence; linear expansion coefficient.

Большинство элементов конструкции ядерной техники представляют собой цилиндрические оболочки. В качестве материала оболочек применяют сплавы. Легирование материала примесями замещения улучшает физико-механические свойства, но легирующие элементы чувствительны к уровню и характеру распределения внутренних напряжений. Примеси замещения большого атомного радиуса по отношению к основному металлу (надразмерные примеси) мигрируют в область напряжений растяжения, а соответствующие примеси малого атомного радиуса (подразмерные примеси) в область напряжения сжатия. Так происходит расслоение твердого раствора из примесей замещения разного сорта [1].

Рассмотрим следующий вариант образования внутренних напряжений. 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. Первый инвариант тензора напряжений (плоская деформация) определяется выражением [3].

$$\sigma_{ll} = \frac{\mu\omega(1+\nu)}{2\pi(1-\nu)}\left\{1+2\ln\frac{r}{R}+\frac{2\left(\frac{r_0}{R}\right)^2}{1-\left(\frac{r_0}{R}\right)^2}\ln\frac{r_0}{R}\right\}, \tag{1}$$

где μ - модуль сдвига, ν - коэффициент Пуассона, ω- угол поворота берегов разреза оболочки, r_0 и R – внутренний и внешний радиусы оболочки. Для каждого типа внутренних напряжений температурных, концентрационных и остаточных в цилиндрической оболочке сохраняется логарифмическая зависимость от радиальной координаты соотношения (1) при соответствующей перенормировке постоянных [4].Это позволяет сформулировать единый подход к определению их совместного действия. Потенциал взаимодействия атома примеси с полем внутренних напряжений определяется соотношением

$$V = -\frac{\sigma_{ll}}{3}\delta\nu , \tag{2}$$

где $\delta\nu$ – изменение объема материала при размещении атома примеси. Равновесная концентрация примесей замещения зависит от потенциала V

$$C_p = C_0 \exp\left(-\frac{V}{kT}\right), \tag{3}$$

где C_0 - средняя концентрация атомов примеси, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Кинетика массопереноса описывается нестационарным уравнением диффузии в поле потенциала V при соответствующих начальном и граничных условиях

$$\frac{1}{D}\frac{\partial C}{\partial t} = \Delta C + \frac{\nabla (C\nabla V)}{kT}, \quad r_0 < r < R,$$

$$C(r,0) = C_0,\ C(r_0,t) = C_p^{\ 1},\ C(R,t) = C_p^{\ 2}, \tag{4}$$

где D- коэффициент диффузии атомов примеси, $C_p^{\ 1}$ и $C_p^{\ 2}$ – равновесные концентрации примесей замещения при $r = r_0$ и $r = R$ соответственно. Рассмотрим диффузную миграцию надразмерных примесей. В этом случае $C_p^{\ 1} > C_p^{\ 2}$, поскольку в принятой модели внутренняя область цилиндрической оболочки находится в состоянии растяжения, а внешняя – в состоянии сжатия. Краевые условия при $r = r_0$ и $r = R$ означают, что на этих границах мгновенно устанавливается и далее сохраняется равновесная концентрация атомов примеси в соответствии с потенциалом V. Это обусловлено тем, что максимальное и минимальное значения σ_{ll} достигаются именно на границах цилиндрической оболочки. Логарифмическая зависимость потенциала V от радиальной координаты упрощает задачу (4)

$$\frac{1}{D}\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1+\alpha}{r}\frac{\partial C}{\partial r},\ r_0 < r < R,$$

$$C(r,0) = C_0,\ C(r_0,t) = C_p^{\ 1},\ C(R,t) = C_p^{\ 2}, \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{\mu\omega(1+\nu)\delta\nu}{3\pi(1-\nu)kT} < 0.$$

Решение уравнения (5) при $\alpha = -1$ описывает концентрационное поле примесей замещения с учетом влияния внутренних напряжений.

$$C - C_0 = \frac{R(C_p^{\ 1} - C_0) - r_0(C_p^{\ 2} - C_0) + r(C_p^{\ 2} - C_p^{\ 1})}{R - r_0} +$$

$$+\frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left[(-1)^n (C_p^{\ 2} - C_0) - (C_p - C_0)\right] \times \sin\frac{\pi n(r - r_0)}{R - r_0}\exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 Dt}{(R - r_0)^2}.\right) \tag{6}$$

Внутренние напряжения в рамках принятой модели преобразуют уравнение диффузии с цилиндрической симметрией в плоскую. Физически это означает, что диффузионный процесс изменяется, не только количественно, но и качественно. Это приводит к более высокой скорости формирования концентрационного профиля из примесей замещения, что следует из вида уравнения (5).

Примечания:

1. Власов Н.М. Равновесные и неравновесные примесные атмосферы. Доклады РАН, 2001. Том 377.№4. С.464-467.
2. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 939с.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Перев. с англ. М.: Наука, 1979. 560 с.

УДК 539/2

РАССЛОЕНИЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ С ВНУТРЕННИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Ольга Ивановна Челяпина

РОНЦ МГОУ, Подольск, Россия.
142114, г. Подольск, Московская область, Россия, ул. К. Готвальда, зд.2/40
Соискатель, доцент
E-mail: chelyapina@pochta.ru

В данной статье проводится анализ кинетики расслоения твердого раствора из примесей замещения в поле внутренних напряжений цилиндрической оболочки.

Ключевые слова: внутренние напряжения, цилиндрическая оболочка, диффузионный процесс, логарифмическая зависимость, коэффициент линейного расширения.