

**Н. М. В л а с о в, Ю. Г. Д р а г у н о в** (Подольск, РОНЦ МГОУ). **Релаксация остаточных напряжений при нейтронном облучении материала.**

Нейтронное облучение конструкционных материалов сопровождается образованием пар Френкеля: вакансий и межузельных атомов [1]. Радиационные точечные дефекты диффузионно мигрируют на различные стоки с образованием межузельных дислокационных петель, тетраэдров дефектов упаковки и вакансионных пор. Это приводит к изменению теплофизических, упругих и прочностных характеристик облучаемого материала. Остаточные напряжения ускоряют протекание диффузионных процессов. При формировании примесных сегрегаций из межузельных атомов радиационного происхождения происходит релаксация остаточных напряжений. Целью данного сообщения является анализ кинетики релаксации остаточных напряжений в цилиндрической оболочке при нейтронном облучении.

Межузельные атомы размещаются, как правило, в тетра- и октапозициях кристаллической решетки металла или образуют гантельные конфигурации. Для простоты математического моделирования рассмотрим первый вариант расположения межузельных атомов. Характерный размер тетра- или октапозиций существенно меньше размера межузельного атома. Поэтому при размещении последнего увеличивается параметр кристаллической решетки. Потенциал взаимодействия (энергия связи) межузельного атома с остаточными напряжениями определяется известным соотношением [2]

$$V = -\frac{\sigma_{ii}}{3}\delta v, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ii}$  — первый инвариант тензора остаточных напряжений,  $\delta v$  — изменение объема материала при размещении межузельного атома. Модельная схема образования остаточных напряжений в цилиндрической оболочке достаточно прозрачна. Из двусвязной области вырезают клин с углом раствора  $\omega$  и соединяют берега разреза. После такой операции двусвязная область приобретает остаточные напряжения, первый инвариант тензора которых имеет вид [2]

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

где  $\mu$  — модуль сдвига,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $r_0$  и  $R$  — внутренний и внешний радиусы цилиндрической оболочки. При этом внешняя поверхность оболочки находится в состоянии растяжения, а внутренняя — в состоянии сжатия. Диффузионная подвижность межузельных атомов при  $T < 0,6 T_{пл}$  превышает подобную характеристику для вакансий. Поэтому далее рассмотрим перераспределение межузельных атомов с учетом остаточных напряжений. Соответствующая задача математически формулируется следующим образом: при  $r_0 \leq r \leq R$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = \Delta C + \frac{\nabla(C \nabla V)}{kT}, \quad C(r, 0) = C_0, \quad C(r_0, t) = C_p^1, \quad C(R, t) = C_p^2, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $D$  — коэффициент диффузии межузельных атомов,  $C_p^1$  и  $C_p^2$  — равновесные концентрации межузельных атомов на границах рассматриваемой области ( $C_p^2 > C_p^1$ ). Физический смысл начального и граничных условий задачи (3) вполне очевиден. В начальный момент времени концентрация радиационных межузельных атомов равна  $C_0$ . Это соответствует определенному времени нейтронного облучения при достижении некоторой дозы в единицах сна (число смещений на атом). После прекращения облучения температура повышается и начинается диффузионное перераспределение межузельных атомов. Это приводит к релаксации остаточных напряжений вследствие образования концентрационных напряжений противоположного знака. На границах области достаточно быстро устанавливается равновесная концентрация межузельных атомов и далее сохраняется в процессе их диффузионного перераспределения.

С учетом соотношений (1) и (2) математическая формулировка задачи (3) упрощается, поскольку логарифмическая функция в цилиндрической системе координат является гармонической, а ее градиент обратно пропорционален радиусу в той же системе координат. Проведен сравнительный анализ кинетики релаксации остаточных напряжений путем решения уравнения диффузии с учетом последних в объеме и на границах области. Показано, что остаточные напряжения являются энергетическим барьером, который в первую очередь реагирует на нейтронное облучение. Другими словами, облучение должно устранить остаточные напряжения для беспрепятственного радиационного повреждения материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Was Gary S. Fundamentals of Radiation Materials Science Metals and Alloy. Springer, 2007, 827 p.
2. Драгунов Ю. Г., Власов Н. М., Иванов С. Д., Федик И. И. Самоуравновешенные внутренние напряжения. М.: МГОУ, 2010, 391 с.