

## КОНЦЕНТРАЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОР

В.Л.Орлов, А.В.Орлов

*На основании механизма диффузионно-деформационной неустойчивости квазиравновесных избыточных вакансий металла при облучении предложена модель, позволяющая расчет области влияния отдельного зародыша радиационной поры и, как следствие, концентрации пор. Показано, что в области неустойчивости начинают формироваться скопления вакансий, образующие периодическую пространственную структуру. Период структуры определяется параметрами восходящей диффузии вакансий и характеристик стоков. Проведен расчет температурной зависимости концентрации радиационных пор, получено удовлетворительное согласие с экспериментами. Обсуждается дозовая зависимость концентрации пор, возникающих при облучении.*

При облучении металлов и сплавов быстрыми нейтронами и заряженными частицами наблюдается эффект радиационного распухания, связанный с процессами порообразования в материале. Образование пор – следствие “конденсации пара” избыточных вакансий, создаваемых облучением. Экспериментальные результаты свидетельствуют о существовании достаточно узкого интервала концентраций радиационных пор для конкретного материала. Этот факт, а также результаты наблюдения сверхрешеток радиационных пор свидетельствуют о том, что растущий зародыш поры имеет вполне определенную, фиксированную область влияния, внутри которой невозможно образование зародышей других пор.

В работе [1] предложен механизм диффузионно-деформационной неустойчивости, направленный на развитие теоретических представлений о радиационном порообразовании. Суть механизма заключается в том, что высокие концентрации избыточных вакансий создают интегральное поле упругих растягивающих напряжений, приводящих к снижению энергии Гиббса. В результате возникает процесс восходящей диффузионной вакансии. Предложенный физический механизм лежит в основе расчетов концентрации радиационных пор.

### 1. Образование пространственной периодической структуры радиационных скоплений

Рассмотрим условия, приводящие к становлению стационарной концентрации избыточных вакансий при облучении металла. Пренебрегаем при этом концентрацией межузельных атомов, предполагая их исчезновение в результате “быстрой” рекомбинации и

эффективного поглощения дислокациями. Уравнение баланса вакансий имеет вид

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = K_0 - K \cdot C_v. \quad (1)$$

Здесь  $K_0$  – скорость генерации вакансий, коэффициент  $K$  описывает исчезновение вакансий на стоках, исключая стоки в виде растущих скоплений. В стационарном случае:

$$K_0 = K \cdot C_{v0}. \quad (2)$$

Предполагая, что при установлении стационарной концентрации избыточных вакансий порог неустойчивости оказывается преодоленным, и начинается формирование вакансионных скоплений.

Для простоты рассматриваем плоскую геометрию, считая все величины зависящими только от одной координаты  $x$ . В таком случае форма вакансионного скопления определяется зависимостью  $C(x) = C_v(x) - C_{v0}$ . Уравнение баланса вакансий во время формирования растущих скоплений имеет вид (с учетом (2)):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -K \cdot C + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Здесь  $D_B = -D > 0$  – коэффициент восходящей диффузии:

$$D_B = D_0 \cdot \left( \frac{\sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} - 1 \right) \cdot \exp\left( \frac{-E_m - \sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} \right). \quad (4)$$

В стационарном случае

$$\frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{K \cdot C}{D_0 \cdot \left( \frac{\sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} - 1 \right) \exp\left( \frac{-E_m - \sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} \right)} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) дает периодическое пространственное распределение вакансий вдоль оси  $x$ . Размер периодичности равен:

$$d = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{D_0}{K} \left( \frac{\sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} \right) \cdot \exp\left( \frac{-E_m - \sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} \right)}. \quad (6)$$

## КОНЦЕНТРАЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОР

Начальный этап развития скоплений вакансий характерен тем, что в это время концентрация избыточных вакансий мало отличается от  $C_{v0}$ , и, следовательно, может быть рассчитана концентрация скоплений (в дальнейшем – пор).

$$N_v = \frac{1}{8 \cdot \pi^3} \left[ \frac{K}{D_0 \cdot \left( \frac{\sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} - 1 \right) \cdot \exp\left( \frac{-E_m - \sigma \cdot \Omega}{k \cdot T} \right)} \right]^{3/2} \quad (7)$$

На начальном этапе преобразования  $C(x)$  является гармонической функцией. В дальнейшем происходит трансформация формы  $C(x)$ : в непосредственной близости от растущих скоплений начинают резко возрастать концентрация вакансий и их градиент. В области же между скоплениями уменьшается концентрация избыточных вакансий и их градиент. На рис.1 качественно представлены профили распределений  $C(x)$  в различные времена развития вакансионные скопления.

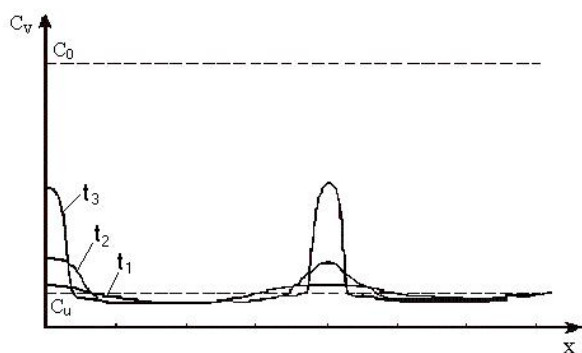


Рис.1. Пространственные профили концентрации вакансий в различные моменты времени развития неустойчивости  $t_3 > t_2 > t_1$

Переход в вышеприведенных рассуждениях к сферической геометрии не вносит существенных изменений в представление об области влияния поры. Действительно, при замене переменной  $z=r \cdot C$  для  $z$  получаем уравнение аналогичное (5).

### 2. Расчет концентрации радиационных пор

В качестве примера соответствия проведенного теоретического анализа экспериментально полученным результатам [2], проведен расчет температурной зависимости концентрации радиационных пор для никеля. Исходные данные для расчета:

$D_0 = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  – предэкспоненциальный множитель;

$E_m = 1,4 \text{ эВ}$  – энергия миграции вакансии;

$\sigma \cdot \Omega = 1,1 \cdot k \cdot T$  – упругая энергия, приходящаяся на один атом металла;

$K_0 = 2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  – скорость генерации вакансий;

$K_0/C_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с.н.а.} \cdot \text{с}^{-1}$  – скорость повреждения;

$C_{v0} = 2 \cdot 10^{26}$  – стационарная концентрация избыточных вакансий;

$K = 1 \text{ м}^3/\text{с}$  – скорость ухода вакансий на стоки, отличные от пор.

На рис.2 приведены результаты расчета зависимости концентрации радиационных пор в никеле от температуры облучения. Здесь же отмечены экспериментальные результаты.

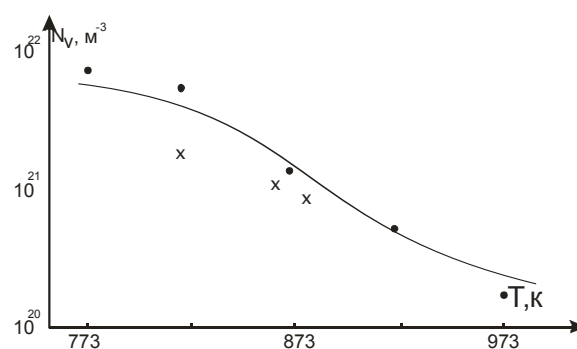


Рис.2. Температурная зависимость концентрации пор для никеля (экспериментальные точки: • – облучение ионами  $Ni^{+}$ , x – реакторное облучение)

### 3. Обсуждение

Результаты расчетов, приведенные на рисунке 2, позволяют утверждать, что механизм диффузионно-деформационной неустойчивости удовлетворительно описывает температурную зависимость концентрации радиационных пор.

Второй, не менее важный вопрос, связанный с концентрацией радиационных пор заключается в теоретическом объяснении зависимости этой концентрации от дозы облучения. Механизм диффузионно-деформационной неустойчивости предполагает при фиксированной температуре облучения наличие неизменной концентрации растущих пор. Экспериментальные же результаты [2] указывают на тот факт, что указанное постоянство концентрации пор выполняется для больших доз. При малых дозах наблюдается резкое уменьшение (в 2 - 4 раза) концентрации радиационных пор с уменьшением дозы.

Имеющиеся экспериментальные результаты могут найти вполне естественное объяснение. На ранних этапах облучения кон-

центрация избыточных вакансий еще не достигает своего стационарного значения и величина упругих напряжений  $\sigma$  не слишком велика. По мере роста дозы с продолжением облучения упругие напряжения достигают критического значения, необходимого для развития неустойчивости, прежде всего в наиболее плотноупакованных кристаллографических направлениях. Именно в этих направлениях возникает неустойчивость системы избыточных вакансий, начинают расти вакансионные скопления – зародыши пор. Так, в кубических кристаллах, очевидно, должна возникать простая кубическая решетка (в общем случае не слишком близкая к идеальной) радиационных пор.

При дальнейшем наборе дозы облучения устанавливается стационарное значение концентрации избыточных вакансий и выполняются условия развития неустойчивости по другим менее плотноупакованным кристаллографическим направлениям. В результате возникают дополнительные скопления вакан-

сий (поры), расположенные между ранее зародившимися. Так в ОЦК-решетке возникают дополнительные поры в центре куба, а в ГЦК-решетке – в центрах граней исходной простой кубической решетки радиационных пор.

Исходя из предлагаемой модели, можно предполагать, что при увеличении дозы концентрация радиационных пор в ОЦК-металлах увеличивается в 2 раза, а в ГЦК-металлах – в 4 раза, а затем остается неизменной. Эти предположения находятся в соответствии с имеющимися экспериментальными результатами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов В.Л., Орлов А.В. Малышкина А.Г. – Известия вузов. Физика, 2003, №2. - С 31-35.
2. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. Радиационные дефекты и распухание металлов. Киев. – Наук. думка, 1988 - 296 с.