

где

$$\Gamma_l = -\frac{2 - \cos 2k - \cos k \cos q - \lambda}{\sin k \sin q},$$

$$\Gamma_l = i \frac{2 - \cos 2k - \cos k \operatorname{ch} \kappa - \lambda}{\sin k \operatorname{sh} \kappa}.$$

Поперечное волновое число q связано с продольным k соотношением:

$$\cos q = \frac{1}{4} (\cos k (6 - 3\lambda - 2 \cos 2k) \pm \sqrt{D}),$$

где знак «+» выбирается для верхней области сплошного спектра, а знак «-» – для нижней, и

$$D = (6 - 3\lambda - 2 \cos 2k)^2 \cos^2 k - 8[(\lambda - 2)^2 + \lambda \cos 2k - 2 \cos^2 k].$$

Затухание κ связано с продольным k соотношением:

$$\operatorname{ch} \kappa = \frac{1}{4} (\cos k (6 - 3\lambda - 2 \cos 2k) \mp \sqrt{D}),$$

где знак «+» выбирается для нижней области сплошного спектра, а знак «-» – для верхней.

Используя сформулированные в [5] граничные условия на плоском дефекте, можно получить дисперсионное соотношение, связывающее фазу φ , волновые числа и λ :

$$\operatorname{tg} \varphi_{A,S} = \frac{g_1^{(A,S)} C_{1l}^{(A,S)} - f_1^{(A,S)} C_{2l}^{(A,S)}}{f_2^{(A,S)} C_{2l}^{(A,S)} - g_2^{(A,S)} C_{1l}^{(A,S)}}, \quad (\text{П.2})$$

УДК 539

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭВОЛЮЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

И.М.Неклюдов, Б.А.Шилев

г.Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Деградация физико-механических характеристик конструкционных материалов активных зон ЯЭУ происходит из-за образования радиационно-индуцированных элементов микроструктуры.

Соотношение концентрации стоков точечных дефектов, имеющих в материале до облучения, и концентрации радиационно-индуцированных стоков, зависящей от энергетического спектра нейтронов, плотности их потока и

где

$$f_1^{(A,S)} = 5 - 2\lambda - 2 \cos^2 k - \cos k \cos q + \Gamma_l \sin k \sin q + \varepsilon(1 \mp \cos k);$$

$$f_2^{(A,S)} = \Gamma_l [\cos q \mp \varepsilon] \sin k - \cos k \sin q;$$

$$g_1^{(A,S)} = -i \{ \Gamma_l \cos k \sin q + [\cos k \mp \varepsilon] \sin k \};$$

$$g_2^{(A,S)} = -i \{ \Gamma_l (1 - \lambda - \cos k \cos q) + \sin k \sin q + \varepsilon \Gamma_l (1 \pm \cos k) \},$$

а $\varepsilon = \gamma'/\gamma$ – параметр, характеризующий дефект, и равный отношению силовой константы взаимодействия дефектных слоев γ' к силовой константе в объеме кристалла γ . Верхний знак в этих формулах выбирается для антисимметричных колебаний (индекс "A"), а нижний знак для симметричных (индекс "S").

Библиографический список

1. N. Darynskii and G. A. Maugin. Wave Motion 23, 363 (1996).
2. Ким Ч. С., Сатанин А. М. // ЖЭТФ. – 115, 211 (1999).
3. Косевич А. М. // ЖЭТФ 115, 306 (1999).
4. Косевич А. М., Савотченко С.Е. // ФНТ. – 25, 737 (1999).
5. Косевич А. М., Мадокин Д. В., Савотченко С. Е. // ФНТ. – 25, 63 (1999).
6. Косевич А. М., Савотченко С.Е. // Научные ведомости БелГУ. Сер.: Физика, N1(10), 2000. – С.3.

матрицу и влияющие, как и примеси, на формирование каскадных зон смещений и развитие межузельных дислокационных петель. Генеалогическая схема последовательных взаимных превращений элементов сплава в потоке нейтронов свидетельствует о направленности процессов трансмутации исходных элементов в зависимости от энергетического спектра нейтронов.

В реакторах на тепловых нейтронах атомы исходных элементов преобразуются в реакциях (n, γ) в более тяжелые (с более высоким порядковым номером Z в периодической системе). В реакторах синтеза этот процесс направлен в противоположную сторону с образованием более легких элементов (реакция $n, 2n$). Промежуточное положение занимает реактор на быстрых нейтронах, в котором трансмутация атомов происходит в реакциях (n, p) и (n, α).

Концентрация атомов-трансмутантов различной природы в процессе генерации достигает равновесной величины, которая соизмерима с величиной концентрации элементов различной структуры. Перечень атомов-трансмутантов, спектр их размерных параметров и равновесная концентрация зависят от энергетического спектра нейтронов и плотности их потока.

Концентрация атомов продуктов ядерных реакций трансмутации превосходит равновесную концентрацию радиационной микроструктуры в реакторах на тепловых нейтронах (ВВЭР, PWR, сталь), в 1,5-2,0 раза она меньше в реакторах синтеза, и в ~10 раз меньше в реакторах на быстрых нейтронах ($T=300-350^\circ\text{C}$). Соотношение этих концентраций (с учетом концентрации атомов технологической примеси) влияет на процессы формирования элементов радиационной микроструктуры в матрице и во внутриматричном пространстве кристаллических веществ. В зависимости от размерных параметров атомы в межузельном пространстве ограничивают или способствуют увеличению геометрических размеров элементов радиационной микроструктуры, что приводит к возрастанию или уменьшению равновесной концентрации.

Сечение образования вакансионных кластеров получено сверткой энергетической зависимости образования субкаскадов/каскад по энергетическому спектру первичновыбитых атомов. Плотность стока вакансионных кластеров (их размер и концентрация, размер и концентрация дислокационных петель) зависит от концентрации атомов в межузельном пространстве кристаллических веществ (атомов легирующих элементов, примесей и атомов-продуктов ядерных реакций), влияющих на процесс спонтанной рекомбинации, выживание дефектов в каскадах смещений, коллапсирование вакансий в кластеры.

Соотношение плотности фиксированных стоков, введенных в материал до облучения, и равновесной плотности радиационных стоков, образуемых при облучении, определяют величину коэффициента радиационно-стимулированной диффузии, конкуренцию потоков свободно-мигрирующих дефектов на эти стоки и параметры процесса образования выделений. Высокая равновесная плотность стока вакансионных кластеров уменьшает коэффициент радиационно-стимулированной диффузии и задерживает во времени образование и развитие выделений. При низкой равновесной плотности стока вакансионных кластеров, соответствующей низкой плотности нейтронов деления, коэффициент радиационно-стимулированной диффузии близок к своему максимальному значению. В этом случае процесс образования выделений определяется скоростью генерации свободно-мигрирующих интерстиций при фокусированных соударениях, генерируемых ядрами-продуктами реакции радиационного захвата тепловых и замедляющихся нейтронов, и в каскадах смещений, образованных нейтронами деления, после спонтанной рекомбинации. Зависимость плотности стока вакансионных кластеров от времени их жизни (температуры среды) и плотности потока нейтронов деления позволяет при известной плотности фиксированных стоков выбрать радиационные условия эксплуатации металлов и сплавов, по известным радиационным условиям определить

параметры штатной термомеханической обработки металлов и сплавов до помещения их во внутрикорпусное пространство реакторов. Диффузия свободно-мигрирующих дефектов и их комплексов строго определяется концентрациями и соотношением концентраций радиационно-индуцированных и образованных в процессе термомеханической обработки элементов микроструктуры.

С повышением температуры ($T > 400$ °С) каскадные вакансионные кластеры диссоциируют, превращаясь в источники моновакансий, межузельные малые дислокационные петли быстро мигрируют к дислокациям, декорируя последние.

Изменяется соотношение между концентрациями элементов микроструктуры,

образованных при облучении и при термомеханической обработке. Возрастает роль диффузионных и микромеханических процессов. Приводятся фактические результаты влияния трансмутаций на особенности эволюции радиационного повреждения.

Библиографический список

1. И.М. Неклюдов и др. Трансмутация в радиационном повреждении циркония и его сплавов в активной зоне реактора ВВЭР-1000 // Труды IX Международного совещания "Радиационная физика твердого тела". – Севастополь, 28 июня – 3 июля 1999 г. – М.: НИИ ПМТ. – 1999. – С.501-507.

2. И.М. Неклюдов и др. Математическое моделирование процессов трансмутационного изменения состава и концентрации примесей в стали 15Х2НМФА // Научные ведомости БГУ. – 1998. – №1. – С.47-54.