

Наблюдение anomalно больших пор в никеле при бомбардировке его ионами углерода

КРОТОВ В. И., ЛЕБЕДЕВ С. Я., БЫКОВ В. Н.

УДК 621.039.531:546.74

В настоящее время проявляется большой интерес к моделированию радиационного распухания путем облучения конструкционных металлов и сплавов ускоренными ионами [1—3]. Использование ускорителей позволяет за несколько часов облучения ионным пучком получать в поверхностном слое образца такую плотность смещений, какая достигается при облучении в реакторе только за несколько лет. Однако для обоснования правомерности экстраполяции результатов, полученных путем моделирования, на условия реакторного облучения необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

В связи с этим были изучены особенности развития пористости в никеле под действием ионов аргона и углерода с энергией 70 кэВ. Облучение осуществлялось на ускорителе ИЛУ-100 [4]. Никелевый образец (толщиной 0,1 мм и диаметром 3 мм) перед облучением отжигался при 800°С в течение 1 ч в вакууме 10^{-5} торр. Затем образец электролитически утонялся и просматривался на электронном микроскопе для контроля качества утонения. Облучение проводили: а) ионами углерода с энергией 70 кэВ до доз $5 \cdot 10^{17}$ и 10^{18} ион/см² при 550°С; б) ионами аргона с энергией 70 кэВ до доз 10^{17} и $7 \cdot 10^{17}$ ион/см² при 550°С; в) ионами гелия до дозы $2 \cdot 10^{16}$ ион/см² с последующим облучением ионами углерода энергией 70 кэВ до дозы $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² при 550°С.

Результаты электронно-микроскопического исследования облученных образцов приведены в таблице.

На рис. 1, 2 представлены электронно-микроскопические фотографии образцов, облученных ионами углерода до дозы 10^{18} ион/см², а также ионами гелия и с последующим облучением ионами углерода.

При обработке результатов использовались фотографии участков образцов, толщина которых превышала пробег ионов, составляющий, по расчетным данным, 1000—1100 и ~ 200 —300 Å для ионов углерода и аргона соответственно.

На участках образцов с достаточно малой толщиной (<500—800 и <150—200 Å при облучении ионами углерода и аргона соответственно) поры не наблюдались. Очевидно, что с уменьшением толщины образца увеличивается относительный выход вакансий на поверхность, а когда толщина образца становится меньше длины пробега иона, то плотность смещений резко падает. Начиная с указанных толщин равновесная концентрация вакансий в образце оказывается недостаточной для роста пор. Однако даже при очень малых толщинах образца ~ 200 —300 Å (в случае облучения ионами аргона), когда, казалось бы, вакансии должны интенсивно стекаться к поверхности, достаточно высокая плотность смещений обеспечивает необ-

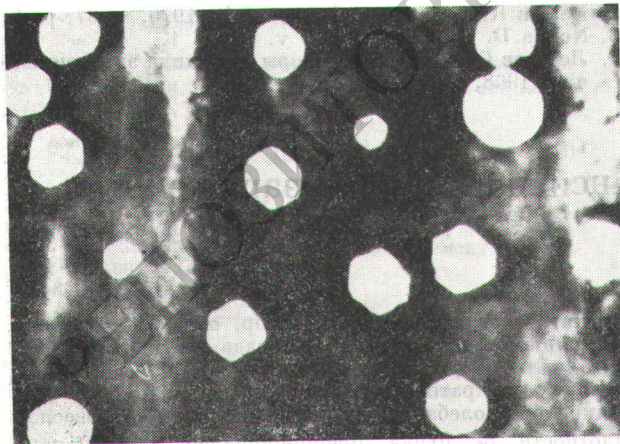


Рис. 1. Электронно-микроскопическая фотография образца никеля, облученного ионами углерода с энергией 70 кэВ при 550°С дозой 10^{18} ион/см² ($\times 90\,000$).

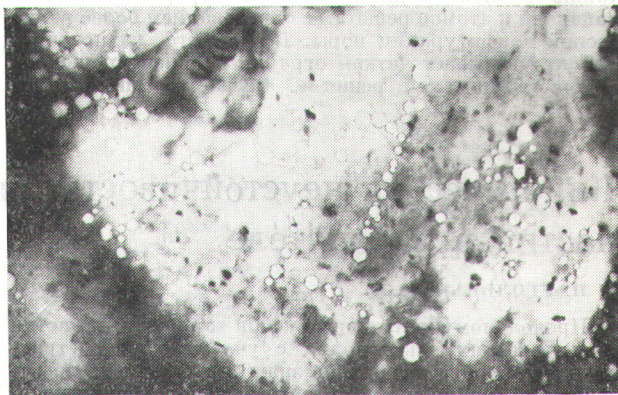


Рис. 2. Электронно-микроскопическая фотография образца никеля, облученного ионами гелия с энергией 50 кэВ при комнатной температуре дозой $2 \cdot 10^{16}$ ион/см² с последующим облучением ионами углерода с энергией 70 кэВ при 550°С дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² ($\times 90\,000$).

Результаты электронно-микроскопического исследования облученных образцов

Характеристика	Бомбардирующий ион			
	Углерод		Аргон	
Доза, см ⁻²	5 · 10 ¹⁷	10 ¹⁸	10 ¹⁷	5 · 10 ¹⁷
Концентрация пор, см ⁻³	~ 10 ¹⁴	~ 10 ¹⁴	~ 10 ¹⁶ —10 ¹⁷	~ 10 ¹⁶ —10 ¹⁷
Максимальный размер пор, Å	1500	2200	200	400
Минимальный размер пор, Å	300—500	500—1000	—	—
Пористость, %	5	13	—	0,5

ходимую для роста пор концентрацию вакансий. По-видимому, определенную роль играет и увеличение выхода внедренных атомов материала мишени на поверхность по мере снижения толщины образца, что также способствует повышению концентрации вакансий за счет снижения рекомбинации.

В образцах, облученных ионами углерода до доз 5 · 10¹⁷ и 10¹⁸ ион/см², концентрация пор практически одинакова и составляет ~ 10¹⁴ см⁻³ (см. таблицу). Очевидно, это обусловлено концентрацией активных центров, на которых происходит конденсация вакансий. С увеличением дозы облучения новые поры не образуются, а происходит дальнейший рост имеющихся пор. Это соображение подтверждается минимальным размером пор (см. таблицу). Определенный разброс в размерах пор, по-видимому, связан либо с различной эффективностью центров конденсации вакансий, либо с местными неоднородностями в структуре образца, влияющими на скорость стока вакансий к данному центру.

Максимальный размер пор (~ 2200 Å) примерно вдвое превышает расчетную длину пробега иона углерода в никеле. Случайный выход в направлении каналирования в результате соударений с атомами решетки как исходного иона, так и вторичных и т. д. атомов из каскада соударений может создать повреждения на глубине, значительно превышающей пробег иона.

Выход поры за пределы зоны повреждений можно также объяснить диффузионным перераспределением вакансий и атомов решетки с образованием более равновесной конфигурации поры. Кроме того, на подобный эффект указывает четкая огранка и ориентировка пор в кристаллической решетке. Создается впечатление,

что рост пор был ограничен только толщиной образца, составлявшей в среднем ~ 1500 Å. Более крупные, не выходящие на поверхность поры наблюдались в более толстых участках.

В образцах, облученных ионами аргона, отмечается чрезвычайно высокая концентрация пор (~ 10¹⁶—10¹⁷). Подсчет числа пор затрудняется обилием разнообразных мелких пор, размеры которых не превышают 30—50 Å, а также сильным перекрытием изображений пор на фотографиях. В данном случае внедрение атомов аргона в металл образца приводит к образованию значительного числа активных центров конденсации вакансий в процессе облучения. Разброс в размерах пор можно объяснить различием в их «возрасте», тогда как при облучении ионами углерода все поры имеют одинаковый «возраст».

В образцах, облученных последовательно ионами гелия и углерода (см. рис. 2), на отдельных участках наблюдалась определенная упорядоченность в расположении пор.

Таким образом, ионное облучение позволяет выявить некоторые закономерности развития пор, необходимые для изучения радиационного распухания материалов.

Поступило в Редакцию 12/IX 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nelson R., Mazey D. AERE-R 6046, 1969.
2. Nelson R. e. a. J. Nucl. Materials, 1970, v. 37, p. 1.
3. Norris D. Rad. eff., 1972, v. 14, p. 1.
4. Лебедев С. Я. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1968, № 4, с. 225.

Кинетическая неустойчивость интенсивного пучка заряженных частиц в накопителе

НАУГОЛЬНЫЙ Н. Н.

Продольному движению пучков заряженных частиц в циклических ускорителях с учетом сил пространственного заряда посвящено значительное число работ. Обширная библиография по этому вопросу приведена, например, в работе [1].

В гладкой нерезонансной камере с идеальной проводимостью неустойчивость пучка может быть вызвана так называемой неустойчивостью «отрицательной массы» (НОМ). Неустойчивость развивается при энергиях выше критической [$\eta \equiv \gamma^{-2} - \alpha < 0$, где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ —

УДК 621.384.61

известный релятивистский фактор, $\alpha = (1 - n)^{-1}$ для постоянного показателя n [2] спада ведущего магнитного поля по радиусу] на частотах $\omega = v\omega_0(1 + \delta)$, близких к кратной частоте обращения $\omega_0(|\delta| \ll 1$). Инкремент колебаний $\text{Im } v\omega_0\delta$ при малой равновесной плотности ρ_0 пучка пропорционален $\rho_0^{1/2}$. Однако из результатов настоящей работы следует, что с увеличением интенсивности накопленного тока вместо гидродинамической НОМ возникает кинетическая неустойчивость пучка. Возможность ситуации, при которой кине-