

ДИФфуЗИОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛУЧАЕМЫХ МЕТАЛЛАХ

И.И. Новиков, В.Г. Жарков, Г.Ф. Жарков

На основе найденных ранее [1] соотношений для эволюции концентрации радиационных точечных дефектов дано описание экспериментально обнаруженного явления диффузионной релаксации внутренних напряжений в кристаллах. Получено удовлетворительное согласие развитой теоретической модели с экспериментальными данными.

В работе [1] были получены соотношения, описывающие концентрацию радиационных точечных дефектов в кристаллах при доминировании постоянных стоков. Отмечалось, что на основе полученных выражений можно экспериментально определить такие важные характеристики облучаемого материала, как сечение процесса выбивания атома из его равновесного положения, рекомбинационный объем точечных дефектов и т. п. В работе [2] были описаны параметры геометрического расположения дислокационных петель, которые необходимо учитывать при экспериментальном определении вышеназванных характеристик.

Однако, если характеристики отклика материала на облучение известны, то полученные соотношения можно также использовать для количественного описания тех или иных диффузионных процессов в облучаемом материале в условиях доминирования постоянных стоков для точечных дефектов.

В настоящей работе предлагается количественное описание процесса диффузионной релаксации внутренних напряжений, возникающих в материалах, подвергнутых предварительной механической обработке. В [3] было показано, что при облучении алюминия и сплавов циркония электронным пучком в колонне высоковольтного электронного микроскопа в ряде случаев наблюдается всестороннее плоское растяжение или сжатие облучаемого участка. Для объяснения такого поведения была предложена феноменологическая модель диффузионной релаксации внутренних напряжений, существовавших в материале до облучения.

На основе полученных в [1] соотношений можно провести более детальное описание наблюдавшегося в [3] эффекта.

Рассмотрим дискообразную область материала, находящегося под растягивающим (сжимающим) напряжением в условиях облучения. Эти напряжения, обусловленные, например, взаимодействием рассматриваемого объема с окружающими его областями материала, приводят к появлению нескомпенсированных между собой потоков межузельных атомов (МА) и вакансий (В) на границу области (в частности, на границы зерен), что в свою очередь приводит к возникновению деформации данного объема и постепенной релаксации напряжений.

Рассмотрим случай облучения Zr электронным пучком интенсивностью $\sim 10^{19}$ см⁻²·с⁻¹, что соответствует интенсивности повреждения $R \sim 10^{-4}$ смещ/ат·с. В условиях эксперимента [3] коэффициент рекомбинации точечных дефектов $A = 7,4 \cdot 10^9$ с⁻¹ ($T = 300$ К); сила стока поверхности образца (см. [4]) для МА $I_s = 4,8 \cdot 10^2$ с⁻¹ и для В $V_s = 2,2 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ (для толщины облучаемого участка 0,3 мкм); сила стока границ зерен соответственно $I_{gb} = 2 \cdot 10^2$ с⁻¹ и $V_{gb} = 9 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ (для диаметра зерен 0,7 мкм); суммарная сила стока $I = 10^3$ с⁻¹ и $V = 4,6 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹; коэффициент диффузии МА $D_1 = 3,7 \cdot 10^{-8}$ см²/с.

Для данных условий эксперимента можно воспользоваться соотношениями [1] для концентрации точечных дефектов, записанными в асимптотическом приближении:

$$i = (RV/AI)^{1/2} (1 - e^{-2Vt})^{-1/2}, \quad v = (RI/AV) (1 - e^{-2Vt})^{1/2}, \quad (1)$$

где i , v — соответственно концентрации МА и В.

Полагая, что параметр решетки $a \sim 3$ Å, объемная плотность атомов $n_0 = 3,7 \cdot 10^{22}$ см⁻³, получим следующие значения потоков точечных дефектов на поверхность J_s и на границы зерен J_{gb} :

$$J_s^{(i)} = \int_{10^{-3}}^{10^3} n_0 I_s i(t) dt \cong 4,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2} \approx J_s^{(v)}; \quad J_{gb}^{(i)} \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2} \approx J_{gb}^{(v)},$$

т. е. в отсутствие напряжений потоки МА и В равны друг другу, что соответствует отсутствию деформаций в облучаемой области.

Оценим изменение потока МА, вызванное приложением растягивающего напряжения σ . Наблюдаемому в /3/ максимальному значению деформации $\epsilon = 0,4\%$ соответствует напряжение $\sigma = B\epsilon \approx 4 \cdot 10^9$ дин/см², где $B \approx 10^{12}$ дин/см² — объемный модуль упругости Zr. При радиусе зерна $r \approx 0,3$ мкм градиент химического потенциала МА /5/ будет равен $|\nabla\mu| \approx a^3 \sigma / r$. Величина плотности избыточного потока, вызванного действующим напряжением, равна $j = iD_1 \sigma / RT$. Находя величину i при $t = 1$ с из выражения (1) и подставляя ее в последнее соотношение, получим $j = 4 \cdot 10^{11}$ см⁻² с⁻¹, т. е. избыточный интегральный поток МА на 1 см² поверхности зерна составит $4 \cdot 10^{14}$ МА. Такое количество поглощенных межузельных атомов приведет к деформации зерна на 0,04%, что меньше экспериментальных значений $0,15 \div 0,4\%$ в несколько раз.

Следует отметить, однако, что ряд авторов (см. литературный обзор в /4/) считает не совсем корректными литературные значения A и R , которые использовались и в наших оценках. В частности, отмечается, что реальная величина A может быть на 2 порядка ниже, а величина R на 4 порядка выше их литературных значений. Принимая это во внимание и полагая, например, $A = 1,5 \cdot 10^8$ с⁻¹, $R = 10^{-3}$ смеш/ат·с (что соответствует уменьшению A в 50 раз и увеличению R в 10 раз по сравнению с использованными выше значениями), получаем величину эффекта деформации в 3 раза большую максимальной экспериментальной.

Таким образом, в рамках допустимого интервала значений параметров A и R согласие между теоретической оценкой величины эффекта и его экспериментальным значением можно считать вполне удовлетворительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарков В. Г., Новиков И. И., Жарков Г. Ф. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 11, 63 (1985).
2. Жарков В. Г., Новиков И. И., Жарков Г. Ф. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 63 (1985).
3. Новиков И. И. и др. Атомная энергия, 56, вып. 3, 142 (1984).
4. Жарков В. Г., Новиков И. И., Жарков Г. Ф. Препринт ФИАН № 140, М., 1985 г.
5. Косевич А. М. Физическая механика реальных кристаллов. Киев, Наукова думка, 1981 г., с. 300.

Поступила в редакцию 18 октября 1985 г.