

- [1] Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1986. 430 с.  
 [2] Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука, 1979. С. 128.  
 [3] Voeuf J.P., Marode E.A. // J. Phys. D. 1982. Vol. 15. P. 2169-2187.  
 [4] Алтазов Г.Д. // ЖТФ. 1970. Т. 50. Вып. 1. С. 97-107.  
 [5] Labahn R.W., Callaway J. // Phys. Rev. 1970. A. Vol. 2. N 2. P. 366-369.  
 [6] Коробкин В.В., Сонин А.Ю. Препринт ИОФ РАН. № 62. М., 1990.

## ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© Т.Б.Ашрапов, М.Сулайманов, Р.Г.Ханбеков, А.Э.Ражабов

Институт ядерной физики АН Узбекистана,  
702132 Ташкент, Узбекистан  
(Поступило в Редакцию 11 сентября 1995 г.)

Радиационная прочность реакторных конструкционных материалов при длительной эксплуатации ядерного реактора является важной характеристикой. Поэтому при разработке новых видов реакторных материалов необходимо рассмотрение вопроса радиационной механической стойкости [1]. В этой связи в данной работе предлагаются данные микротвердости алюминиевых сплавов после облучения потоками нейтронов.

Исследовались две марки алюминиевых сплавов: Al + 0.9 %Mg + 0.8 %Cu и Al + 2.4 %Mg + 0.3 %Cu. Образцы подвергались различной термической обработке: сплав Al + 0.9 %Mg + 0.8 %Cu — закалке, искусственному старению; сплав Al + 2.4 %Mg + 0.3 %Cu — отжигу при температуре 400°C, 1 ч. Образцы имели форму бруска (40 × 5 × 5 мм), стержня ( $l = 40$  мм,  $d = 5$  мм) и диска ( $d = 15$  мм,  $h = 3$  мм).

Измерение микротвердости материалов проводили как до облучения, так и после облучения нейтронами до флюенсов  $1.2 \cdot 10^{20}$  Н/см<sup>2</sup> при  $T < 100^\circ\text{C}$  в однородном нейтронном поле. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при различных нагрузках.

На рис. 1 представлены данные изменения микротвердости сплава Al + 0.9 %Mg + 0.8 %Cu, полученные при различных флюенсах облучения. Видно, что зависимость микротвердости от глубины имеет сложный характер. Величина микротвердости исходного образца меняется нелинейным образом в пределах 65–135 кгс/мм<sup>2</sup>, причем с углублением индентора в материал микротвердость волнообразно растет. Облучение при  $1.3 \cdot 10^{18}$ ,  $1.5 \cdot 10^{19}$ ,  $1.2 \cdot 10^{20}$  Н/см<sup>2</sup> уменьшает микротвердость, а при  $1.2 \cdot 10^{20}$  Н/см<sup>2</sup> значения микротвердости изменяются в интервале от 60 до 100 кгс/мм<sup>2</sup>.

Изменения микротвердости в сплавах Al + 2.4 %Mg + 0.3 %Cu после облучения нейтронами представлены на рис. 2. Видно, что состав примесей данной партии уменьшает интервал значения микротвердости от

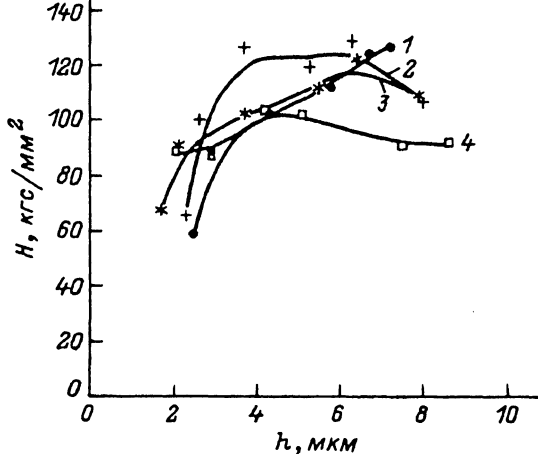


Рис. 1. Изменение микротвердости алюминиевого сплава Al + 0.9 %Mg + 0.8 %Cu, облученного нейтронами.

1 — исходный, 2 —  $1.3 \cdot 10^{18}$ , 3 —  $1.5 \cdot 10^{19}$ , 4 —  $1.2 \cdot 10^{20}$  Н/см<sup>2</sup>.

30 до 60 кгс/мм<sup>2</sup> в исходном материале, причем величина ее монотонно возрастает с глубиной проникновения индентора. Воздействие нейтронами увеличивает микротвердость, но характер зависимости меняется в пределах ошибки измерений. Только при флюенсах облучения  $1.2 \cdot 10^{20}$  Н/см<sup>2</sup> зависимость микротвердости сплава заключена в интервале значений 95–200 кгс/мм<sup>2</sup>. Таким образом, наблюдается различный характер изменения микротвердости двух марок алюминиевых сплавов. В первом сплаве Al + 0.9 %Mg + 0.8 %Cu облучение нейтронами приводит к уменьшению микротвердости, в то время как во втором сплаве Al + 2.4 %Mg + 0.3 %Cu увеличивается микротвердость материала.

Ранее нами при исследовании данных материалов были получены сложные зависимости изменения линейных размеров, где был выявлен масштабный фактор. Так как мы имели образцы различной формы, то была возможность осуществить некоторый анализ.

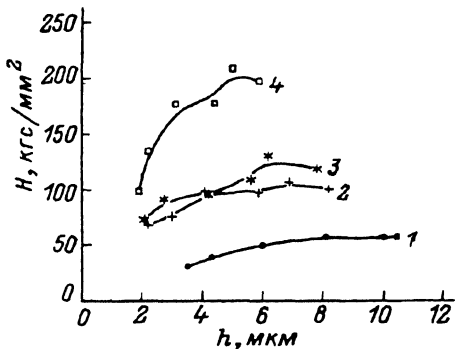


Рис. 2. Изменение микротвердости алюминиевого сплава Al + 2.4 %Mg + 0.3 %Cu, облученного нейтронами.

1 — исходный, 2 —  $1.5 \cdot 10^{18}$ , 3 —  $1.5 \times 10^{19}$ , 4 —  $1.2 \cdot 10^{20}$  Н/см<sup>2</sup>.

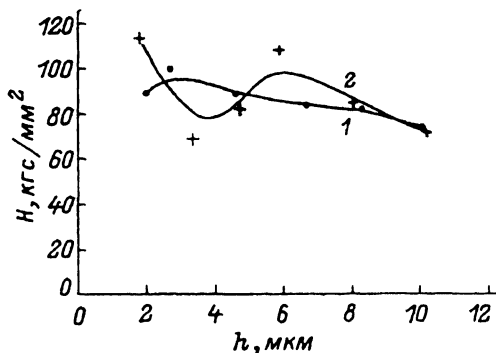


Рис. 3. Изменение микротвердости алюминиевого сплава Al + 0.9 %Mg + 0.8 %Cu, облученного нейтронами  $1.3 \cdot 10^{18}$  Н/см<sup>2</sup>. 1 — поверхность 40 × 5 мм, 2 — поверхность 5 × 5 мм.

В этой связи были проведены измерения на образцах в виде бруска ( $40 \times 5 \times 5$  мм), облученных флюенсом  $1.3 \cdot 10^{18}$  Н/см<sup>2</sup>. Обнаружено (рис. 3), что облучение и форма измеряемой базы влияют незначительно на микротвердость. На поверхности размером  $40 \times 5$  мм значение микротвердости меняется в интервале от 85 до 100 кгс/мм<sup>2</sup> с одним максимумом на глубине 3 мкм. При измерении микротвердости на поверхности размером  $5 \times 5$  мм изменения имеют большой интервал значений 70–115 кгс/мм<sup>2</sup>, причем наблюдаются два максимума на глубине 2 и 6 мкм. Таким образом, имеется различие в изменениях микротвердости при разных размерах поверхности одного и того же образца. Это в некоторой степени коррелирует с данными, полученными по изменениям линейных размеров после облучения нейтронами образца различной формы.

Механизм этого явления изучен недостаточно. Поэтому в наших исследованиях возможно утверждение, что такая сложная зависимость микротвердости от флюенса и формы, измеряемой поверхности связана с ускоренной радиационной диффузией примеси, а также с исходными дефектами в структуре (дислокациями).

Огромное многообразие таких эффектов обнаружено при лазерном отжиге авторами [2,3]. К числу подобных эффектов следует отнести направленное смещение имплантированной примеси и зависимость количества оттесненных к поверхности внедренных ионов от первоначальной дозы имплантации [3].

В работе [4] была сделана попытка качественно понять причину эффекта направленного смещения на основе представлений об электронном ветре, увлекающем примесь за счет упругого рассеяния. Следует учитывать разупорядоченность атомной структуры, что меняет вероятность реализации стимулированных атомных перестроек на порядки [5]. По-видимому, рассмотренные теоретические модели и механизмы, описанные в отмеченных выше работах, хотя они предлагались для объяснения “лазерных” экспериментов, будут также базовыми для понимания физики процесса в представленном нами эксперименте по нейтронному облучению алюминиевых сплавов.

### Список литературы

- [1] Конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза. М.: Наука, 1988. 231 с.
- [2] Смирнов Л.С., Деуреченский А.В., Качурин Г.А., Нудаев Е.В. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. С. 207.
- [3] Фоти Дж.В. Ионная имплантация в полупроводниковые и другие материалы. М.: Мир, 1980. 320 с.
- [4] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статическая физика. М.: Наука, 1964. 585 с.
- [5] Deitchor M., Crumlel G. et al. // Nucl. Inst. and Meth in Phys. Res. 1987. Vol. B22. P. 497–498.