

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Al, Ni, Cu ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АРГОНА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

М.В. Гольцев¹⁾, А. Хофман²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Беларусь, 220050, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 4, тел. + 375172208893, e-mail: Victor@phys.bsu.unibel.by

²⁾Объединенный институт ядерных исследований, Россия 141980, г. Дубна, Московская область, тел. + 7962164741

Исследовано изменение микротвердости чистых металлов Al, Ni, Cu, имплантированных ионами ^{40}Ar с энергией 46,3 МэВ в интервале доз $1 \cdot 10^{13} \dots 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Обнаружено упрочнение металлов, дозовая зависимость которого проявляется насыщение, что коррелирует с тонкой структурой, в частности с концентрацией кластеров дефектов. Установлена связь между изменениями микротвердости и пределом текучести имплантируемых металлов.

Введение

Модификация поверхности с применением ионных пучков является в настоящее время одним из перспективных направлений физики конденсированных сред. Учитывая возросшие параметры облучения, включающие использование ионов высоких и сверх высоких энергий, ионное модифицирование представляет большой научный интерес с позиций исследования структуры, физических, химических и механических свойств поверхностных слоев, а также и важное практическое значение в связи с возможностью получения износ- и коррозионностойких материалов.

В предыдущей работе [1] были представлены результаты исследования упрочнения ОЦК- и ГЦК-металлов при облучении ионами высоких (Xe с $E = 124 \text{ МэВ}$) и сверхвысоких (Kr с $E = 246 \text{ МэВ}$) энергий. С целью получения корреляционных данных и важных для практики прочностных характеристик, в настоящей работе помещены исследования модификации структуры и механических свойств Al, Ni, Cu, облученных ионами ^{40}Ar .

I. Материалы и методика эксперимента

Изменение механических свойств при имплантации ионов в первую очередь связано с дефектообразованием, появлением скоплений в виде кластеров и формированием дислокационной структуры. Подобные эффекты изучались на чистых (99,99%) металлах Al, Ni и Cu, предварительно отожженных в вакууме при температурах 575K (Al) и 975K (Ni и Cu).

Имплантация ионов аргона с энергией 46,3 МэВ проводилась в интервале доз $1 \cdot 10^{13} \dots 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при температурах порядка 300K на облучательном комплексе ОИЯИ. Плотность потоков ионов составляла $1 \cdot 10^{12} \text{ ион/сек.}$, неоднородность интенсивности ионного пучка не превышала 5%.

Величина проективного пробега ионов аргона R_p , согласно оценкам, выполненным с использованием программы SRIM, составляла для облученных образцов $R_{\text{Al}} = 12,6 \text{ мкм}$, $R_{\text{Ni}} = 5,1 \text{ мкм}$ и $R_{\text{Cu}} = 5,9 \text{ мкм}$. По этой же программе были рассчитаны значения сечения образования дефектов σ_d , пороговой энергии смещения E_d , концентрации дефектов K_v и др.

Исходя из достаточно больших глубин повреждения при имплантации, нами решались две

задачи: одна из них, научная, по изучению эффектов радиационного упрочнения, вторая, прикладная, по оценкам предела текучести $\sigma_{0,2}$ механических свойств. Величину изменения прочностных свойств определяли с использованием микротвердомера ПМТ-3 с микроскопом "Neophot-2", при нагрузках на индентор ($P = 0,1 \dots 1,0 \text{ Н}$).

Тонкую структуру имплантированных образцов изучали методами просвечивающей микроскопии с использованием электронного микроскопа JEM-200CX.

II. Экспериментальные результаты

Эффект упрочнения поверхностных слоев Al, Ni, Cu оценивали по изменению микротвердости, которая монотонно увеличивалась с ростом дозы имплантации. Значения микротвердости для глубин индентирования $\sim 3,0 \text{ мкм}$ во всех случаях была меньше проективного пробега ионов ^{40}Ar , что указывает на то, что измеряемая микротвердость характеризовала механические свойства слоя, упрочненного имплантацией ионов (рис.1).

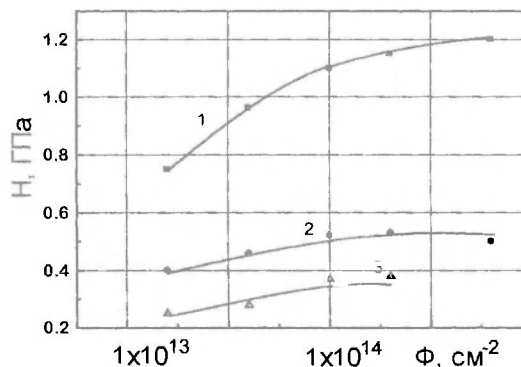


Рис. Зависимость микротвердости никеля (1), меди (2), и алюминия (3) от дозы облучения ионами аргона с энергией 46,3 МэВ

В предыдущей работе [1] было показано, что дозовая зависимость микротвердости хорошо описывается уравнением типа:

$$\Delta H = \Delta H_0 [1 - \exp(-\alpha \Phi)]^n, \quad (1)$$

$$\sigma_T (\text{МПа}) = 3,27 H_v (\text{кг/мм}^2) \quad (2)$$

где ΔH_0 – предельная величина, к которой стремится прирост микротвердости ΔH при дозах

$\Phi > 1/\alpha$, α – постоянная, p – коэффициент упрочнения, равный для Ni и Cu $-1/2$, для Al -1 .

Полученные зависимости качественно подобны аналогичным кривым, полученным в [1], в связи с чем, зависимость (1) может быть с успехом использована для оценки упрочнения металлов при ионном облучении.

Изучение тонкой структуры имплантированных образцов позволило выявить кластеры точечных дефектов, характерных и для случая облучения металлов легкими ионами. В частности, интегральные концентрации кластеров дефектов p_i , полученные известным методом секучих показали, что для меди, при дозах облучения $1 \cdot 10^{12}$; $2.2 \cdot 10^{13}$ и $6 \cdot 10^{13}$ ион/см², концентрации равны $p_1 = 1.9 \cdot 10^{16}$, $p_2 = 5 \cdot 10^{16}$ и $p_3 = 8.2 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Из анализа микроструктуры следует, что в поврежденном слое преобладают кластеры размерами до 5 нм.

Отметим, что с ростом энергии иона увеличивается проективный пробег. Так для ^{40}Ar при $E = 46,3$ МэВ пробег в меди составляет 5,6 и 26,0 мкм. Средние расстояния между соседними треками ионов ^{40}Ar составляют соответственно для дозы облучения $3,8 \cdot 10^{13}$ и $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² $- 1,6 \cdot 10^{-7}$ и $3,2 \cdot 10^{-7}$ см. Таким образом, следует принять, что отмеченное на рисунке насыщение упрочнения с дозой облучения может быть связано с процессами перекрытия каскадов смещений от близких треков ионов.

Заметим, что общим параметром упрочнения металлов является предел текучести σ_T , соответствующий, как правило, напряжению при деформации 0,2%, т.е. $\sigma_{0,2}$. В этом случае представляло интерес установить связь между микротвердостью H_d и условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$.

Известна связь между твердостью H_v и напряжением, соответствующем относительной деформации 8% [2]:

Опыт показал, что для облученных образцов прирост $\Delta\sigma_8$ пропорционален приросту $\Delta\sigma_{0,2}$. Приняв допущение о замене данных σ_8 на $\sigma_{0,2}$ можно записать согласно [3]:

$$\sigma_{0,2} (\text{МПа}) = 3,27 H_v B^n (\text{кг/мм}^2), \quad (3)$$

где $B = 0,1$, n – коэффициент упрочнения.

В работах [4, 5] экспериментально была определена зависимость между H_v и H_d для Al, Cu и Ni:

$$H_v = \alpha (p) H_d (p). \quad (4)$$

Используя уравнения (3) и (4) получим уже искомую связь между $\sigma_{0,2}$ и H_d :

$$\sigma_{0,2} (\text{МПа}) = 3,27 \alpha (p) H_d (p) (0,1)^n (\text{кг/мм}^2),$$

где $\alpha (p) = 0,70$ [6], $n = 0,27$ [7].

Заключение

Упрочнение чистых металлов Al, Ni, Cu при росте дозы облучения ионами высоких энергий (доза повреждения $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с.н.а.) имеет тенденцию к насыщению. Упрочнение может быть связано с образованием кластеров радиационных дефектов с размерами порядка 5 нм.

При энергиях ионов более 40 МэВ их пробеги составляют 5...30 мкм, что дает возможность оценки степени повреждения и установления механических свойств.

Список литературы

1. Гольцев М.В., Хофман А. // Взаимод. излуч. с твердым телом: Докл. III международной конференции. – Мн., 1999. – Ч. II – С. 42-43.
2. B.W. Mott: Micro-Indentification Hardness Test// Butlwor. Public. – London, 1956. – p.157.
3. Onchi I., Kayano H. // I. Nucl. Mater. – 1983. – 116. – p.211.
4. Schuster I., Cernaigan A. // I. Nucl. Mater. – 1988. – 151. – p.108.
5. Hofman A., Kochanski T. // Rap. IAE – 2152/vi: Otwock – Swierk – 1995.
6. Yasuda., Shinoharak. // I. Nucl. Mater. – 1994 – 212-215. – p.1698-1702.
7. Hofman A., Kochanski T. // Nucleonika, v. 93. №3. – 1994. – p.35-42.

MODIFICATION OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al, Ni, Cu BY HIGH ENERGY IONS OF Ar IRRADIATION

M.V.Goltsev¹⁾, A.Hofman²⁾

¹⁾Belarusian State University, F. Scorina Av. 4, Minsk 220050, Belarus

Tel. +375 17 2208893, e-mail: e-mail: Victor@phys.bsu.unibel.by

²⁾United Institute of Nuclear Researches, 141980, Dubna, Moscow reg., Russia

Tel. +7962164741

The change of microhardness of pure metals Al, Ni, Cu implanted by Ar ions with 46,3 MeV energy in dose interval $1 \cdot 10^{13} \dots 1 \cdot 10^{15}$ cm⁻² has been investigated. It has been founded the strengthen of metals, which dose dependence shows saturation and it correlates with thin structure and with cluster defects in particular. The connection between changes of microhardness and the limit of fluidity of implanted metals has been determined.