

кинетическая энергия ($E-T$) будет меньше пороговой энергии захвата E_c . Иными словами, условия замещения при столкновении будут определяться неравенствами типа: $E > E_d/\alpha$, $E < E_c/(1-\alpha)$.

При имплантации ионов мышьяка ($M_1=74,9$) в никель ($M_2=58,7$), принимая $E_d=E_c=25$ эВ и используя предложенную в работе [7] модель, легко определить, что в нашем случае замещения при столкновении возможны, если энергия ионов мышьяка ($\alpha=0,98$) в конце пробега составит ≥ 25 эВ.

При дозе облучения $2 \cdot 10^{16}$ ион/см² и выше наблюдается распад пересыщенного метастабильного раствора с образованием мелкодисперсных выделений второй фазы, которые представляют собой соединения арсенида никеля со структурой β -Ni₅As₂.

Список литературы

1. Ионная имплантация / Пер. с англ.; Под ред. О. П. Елютина. М., 1985.
2. Гольцев В. П., Данилькевич М. И. // Материаловедение в машиностроении. Минск, 1983.
3. Hume-Rothery W., Smallman R. E., Haworth C. W. The structure of Metals and Alloys. London, 1969. P. 329.
4. Sood D. K., Dearnaley G. // Radiat. Eff. 1978. V. 39. P. 157.
5. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М., 1962.
6. Sigmund P. // Phys. Rev. 1969. V. 184. № 2. P. 383.
7. Brice D. K. // Inst. Phys. Conf. Ser. 1976. V. 28. P. 334.

Поступила в редакцию 07.04.86.

УДК 539.12.04

В. П. ГОЛЬЦЕВ, С. И. ЖУКОВА, Т. М. МАСЮК

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЮРАЛЮМИНИЯ

Преимущества ионной имплантации делают этот метод весьма перспективным для модификации физических свойств металлов и сплавов, контролируемых состоянием поверхности. На широком круге материалов продемонстрирована возможность целенаправленного изменения таких характеристик, как износостойкость, усталостная прочность [1], однако положительный эффект наблюдается не для любых комбинаций ион—мишень и режимов облучения. Использование метода ионной имплантации ставит перед исследователями множество вопросов, связанных с интерпретацией результатов, поскольку в каждом случае требуется выяснение механизма, ответственного за наблюдаемые эффекты.

В настоящей работе исследовалось влияние имплантации ионов сурьмы на процесс установившейся ползучести и микротвердость алюминиевого сплава Д16. После механической обработки образцы отжигались при $T=720$ К, а затем подвергались химической полировке. Имплантация ионов сурьмы с энергией 35 кэВ и плотностью ионного тока 9 мкА/см² осуществлялась в непрерывном режиме на ускорителе ИЛУ-4 до дозы облучения 10^{17} ион/см². Согласно [2], проциорванный пробег и страглинг ионов сурьмы равны 23 и 6,8 нм соответственно.

Стадия установившейся ползучести в условиях четырехточечного изгиба изучалась при температуре 600—700 К и напряжении 2—15 МПа на установке, описанной в [3]. Микротвердость определялась с помощью ПМТ-3 при нагрузке 0,1—2 Н.

Для всех исследованных образцов скорость установившейся ползучести $\dot{\epsilon}$ в избранном режиме деформации хорошо описывается уравнением Виртмана: $\dot{\epsilon} = A\tau^n \exp(-U/kT)$, где U — энергия активации установившейся ползучести; n — параметр, характеризующий чувствительность скорости ползучести к напряжению τ ; A — константа, зависящая от свойств материала.

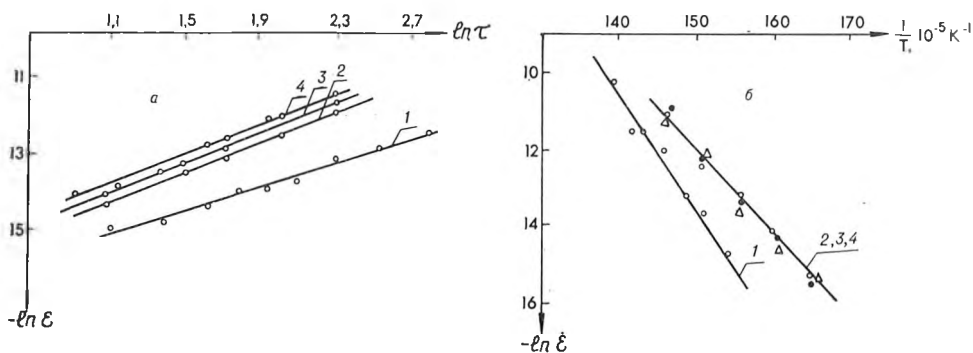


Рис. 1. Зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения (а) и температуры (б) исходных и имплантированных сурьмой образцов при дозе имплантации: 1 — 0; 2 — $2 \cdot 10^{16}$; 3 — $6 \cdot 10^{16}$; 4 — 10^{17} ион/см²

Из приведенной на рис. 1 зависимости скорости ползучести от напряжения и температуры следует, что после имплантации наблюдается значительное увеличение скорости ползучести. Так, например, при $\tau = 10$ МПа $\epsilon_{\text{импл}}/\epsilon_{\text{неимпл}} = 4$. Величина деформации, накапливаемая на установившейся стадии, для имплантированных образцов приблизительно на порядок больше, чем для исходных. Уменьшение величины энергии активации ползучести и увеличение чувствительности скорости ползучести к напряжению также свидетельствует о снижении сопротивления ползучести после имплантации ионов сурьмы (см. таблицу).

Разупрочнение имплантированных образцов проявляется и в уменьшении их микротвердости H , причем максимальный эффект наблюдается при малых глубинах проникновения индентора h (рис. 2). Относительное изменение $\Delta H/H_0$ составляет 70 % для $h = 5$ мкм.

Следует отметить, что доза имплантации в рассмотренном интервале $2 \cdot 10^{16} - 10^{17}$ ион/см² слабо влияет на изменение параметров установившейся ползучести и микротвердости исследуемого сплава.

Аналогичное снижение прочностных свойств обнаружено при радиационном воздействии на структуру и механические свойства сплава Ni—Vc и X20H78TЮР, облученных нейтронами, наблюдалось в [5]. Структурные исследования, проведенные авторами, показали, что облучение приводит к разрушению упрочняющих выделений.

Для объяснения обнаруженных в настоящей работе эффектов разупрочнения изучено распределение примесей до и после имплантации ионов сурьмы в дюралюминий методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия с энергией 1,4 МэВ и рентгеноспектрального микроанализа. Из приведенных на рис. 3 спектров РОР для исходных образцов и после облучения дозой 10^{17} см⁻² видно, что в результате имплантации уменьшается содержание меди и кислорода, который находился в необлученных образцах на поверхности, возможно, в связанном состоянии Al_2O_3 .

Исследуемый алюминиевый сплав Д16 является сложной многокомпонентной системой (4,5 % Cu; 1,6 % Mg; 0,4 % Mn; 0,3 % Fe; <0,1 % Si; остальное — Al). После предварительного гетерогенизирующего отжига исходные образцы содержали выделения избыточных упрочняющих фаз, средний размер которых составлял 9 мкм.

Параметры стадии установившейся ползучести сплава Д16, имплантированного сурьмой

| Доза имплантации, ион/см ² | U , эВ | n |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|
| 0 | $2,34 \pm 0,03$ | $1,6 \pm 0,1$ |
| $2 \cdot 10^{16}$ | $1,88 \pm 0,03$ | $2,0 \pm 0,1$ |
| $6 \cdot 10^{16}$ | $1,90 \pm 0,03$ | $2,1 \pm 0,1$ |
| 10^{17} | $1,88 \pm 0,03$ | $2,0 \pm 0,1$ |

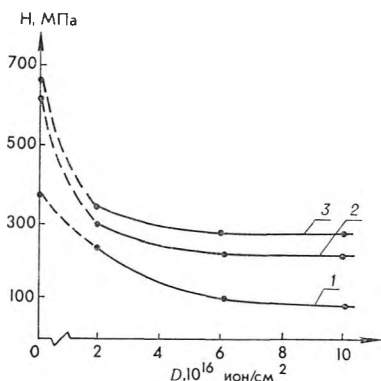


Рис. 2. Дозовая зависимость при различных глубинах проникновения индентора:

1 — $h = 5$; 2 — 7; 3 — 9 мкм

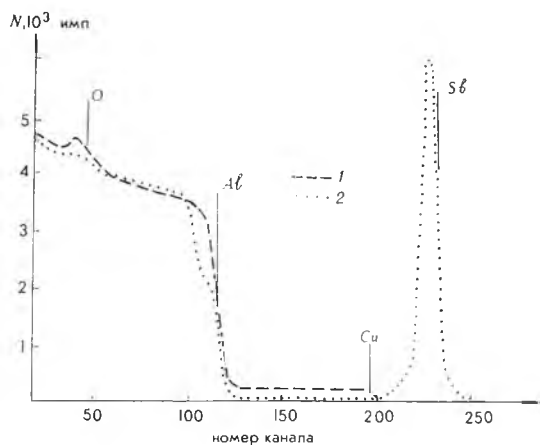


Рис. 3. Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов гелия для исходного образца (1) и после имплантации $10^{17} \text{Sb}^+/\text{см}^2$ (2)

Рентгеноспектральный микроанализ показал, что медь и железо, находящиеся в исходных образцах в стабильных соединениях (возможно, FeAl_3 , CuAl_2 и CuMgAl_2), в имплантированных образцах диффундируют в глубь от поверхности: интенсивность характеристического излучения $\text{CuK}\alpha$ и $\text{FeK}\alpha$ для облученных образцов уменьшилась на порядок в области твердого раствора и примерно в пять раз в области упрочняющих выделений. Кроме того, размеры включений уменьшились почти в два раза по сравнению с необлученными образцами. Распределение сурьмы по образцу равномерное с уровнем гомогенности 12%. Эти результаты несколько отличаются от данных, приведенных в [6], где имплантация ионов сурьмы с энергией 200 кэВ в алюминий технической чистоты вызывала диффузию меди и железа от поверхности образца и к ней соответственно.

Таким образом, обнаруженный нами эффект разупрочнения алюминиевого сплава Д16, имплантированного сурьмой, можно связать с частичным разрушением включений второй фазы и последующей диффузией основных легирующих примесей от поверхности образца в глубь кристалла.

Список литературы

1. Ионная имплантация // Под ред. Дж. К. Хирвонена. М., 1985.
2. Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск, 1980.
3. Гуманский Г. А., Фишер А. // Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1: Физ. Мат. Мех. 1975. № 2. С. 92.
4. Афанасьев В. Д., Гофман Ю. И., Степина Е. И., Цымбал В. А. Радиационные эффекты в металлах и сплавах. Киев, 1976. С. 18.
5. Гринчук П. П., Лобода Е. М. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Топливные и конструкционные материалы. М., 1976. Вып. 1(4). С. 26.
6. Madakson P. B. // Journ. Appl. Phys. 1984. V. 55(9). P. 3308.

Поступила в редакцию 15.09.86.