

## ФИЗИКА

УДК 548.0

М. Н. ВЕРЕЩАГИН, член-корреспондент Ф. Ф. КОМАРОВ,  
В. Г. ШЕПЕЛЕВИЧ, О. М. ОСТРИКОВ

**ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ  $N_2^+$  НА НЕГОМОГЕННУЮ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ АМОРФНОГО СПЛАВА  $Fe-Cr-Mo-V-B-Si$** 

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,  
Белорусский государственный университет

Поступило 12.04.2004

Ионная имплантация является одним из эффективных способов формирования аморфных слоев в облучаемых твердых телах [1]. При этом ее влияние на структурные изменения и физические свойства аморфных материалов в настоящее время мало изучено. Интересными представляются вопросы о характере воздействия на конденсированную систему, не имеющую дальнего порядка, «аморфизирующих» и «кристаллизующих» добавок, локализованных при ионной имплантации в приповерхностных слоях.

Цель данной работы — исследование влияния облучения ионами  $N_2^+$  на негомогенную пластическую деформацию аморфного сплава  $Fe-Cr-Mo-V-B-Si$ .

**Методика эксперимента.** Исследовался аморфный сплав  $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$  (мас.%), который получали спиннингованием на наружную поверхность медного закалочного диска. В качестве тигля для плавления сплава применяли кварцевую трубку со щелевидным отверстием 0,25–0,3 мм при избыточном давлении аргона 0,2–0,5 МПа. Скорость охлаждения лент составляла  $8 \cdot 10^5$  °C/с. Толщина ленты имела порядок около 40 мкм.

Рентгеноструктурный и рентгенофазный анализы выполнены на дифрактометре ДРОН-3 в монохроматическом  $Cu_{K\alpha}$  — излучении в следующем режиме: напряжение 30 кВ, ток 20 мА, скорость счетчика 2 град/мин. За эталон принят исходный сплав указанного состава, отожженный при 850 °C.

Исследование негомогенной пластической деформации производилось с помощью методики локального деформирования поверхности, суть которой заключалась в том, что поверхность аморфного материала деформировалась пирамидой Виккерса прибора ПМТ-3 [2–4]. С помощью растрового электронного микроскопа CamScan-4 производились снимки часто встречающихся проявлений пластической деформации аморфного сплава. Измерялись геометрические параметры полос сдвига двух типов: в виде полуколец (чешуйчатые навалы), окаймляющих отпечаток индентора, и в виде лучей, идущих от индентора. Фиксировалось число полос сдвига.

Ионная имплантация проводилась на установке «Везувий-1» в вакууме  $5 \cdot 10^{-6}$  Тор с использованием электромагнитной масс-сепарации по массам и зарядам имплантируемых ионов. Имплантировали ионы  $N_2^+$  с энергией 95 кэВ, дозами  $2 \cdot 10^{16}$ ,  $1 \cdot 10^{17}$  и  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Ионным пучком обрабатывалась поверхность, контактировавшая при получении лент с закалочным диском. Изучалось влияние ионной имплантации на негомогенную пластическую деформацию этой стороны лент.

**Результаты и их обсуждение.** Рентгеноструктурный и рентгенофазный анализы показали, что исследуемый сплав  $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$  рентгеноаморфный. Это проявилось в наличии на рентгенограмме размытого пика в области 110 ( $\alpha$ -Fe), что свойственно для аморфных сплавов на основе железа [5].

При деформировании поверхности аморфного сплава  $Fe_{46.3}-Cr_{40}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$  у отпечатка пирамиды Виккерса возникают полосы сдвига двух типов: в виде полуколец и лучей.

Результаты влияния ионной имплантации на негомогенную пластичность аморфного сплава представлены на рис. 1 и 2.

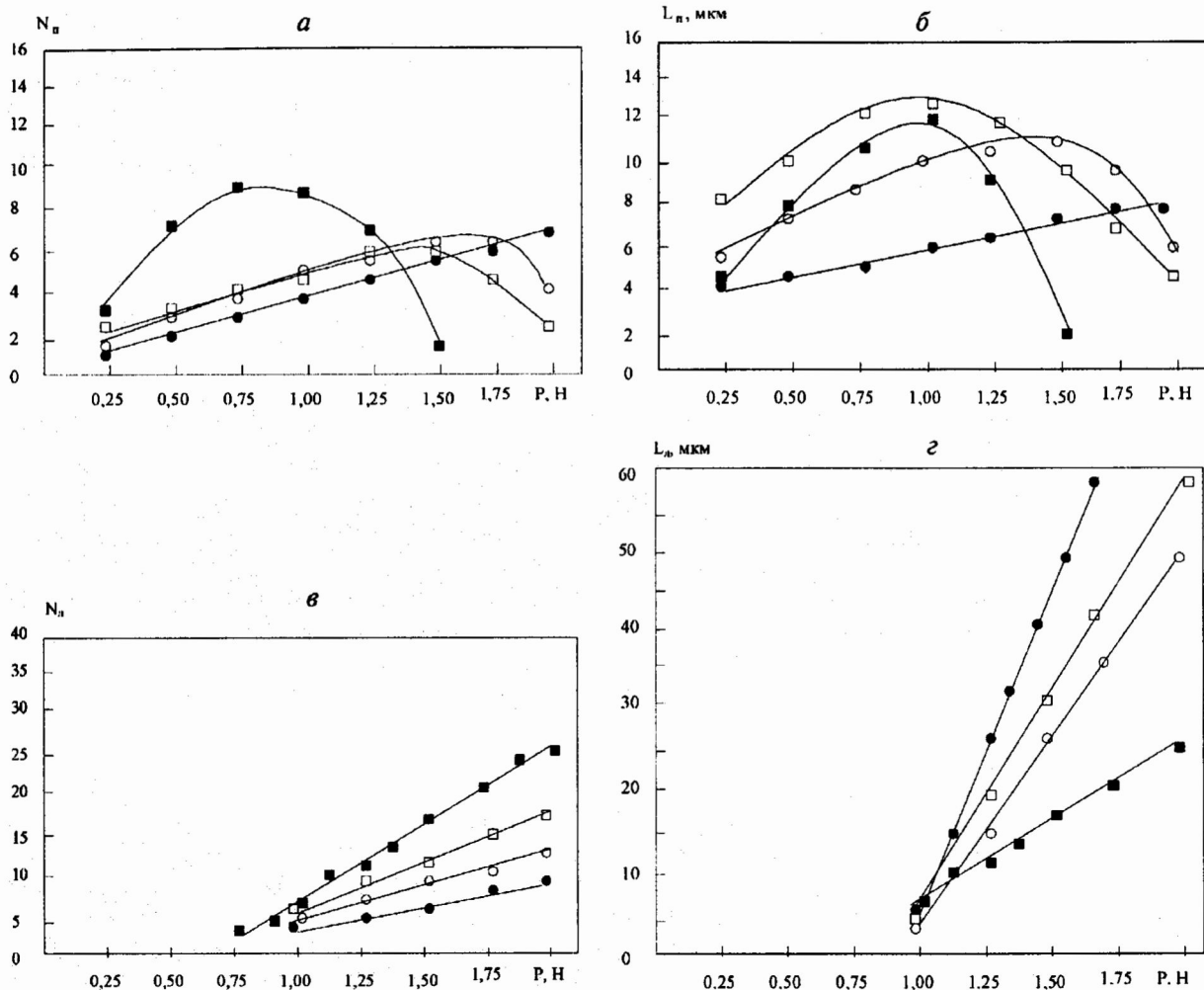


Рис. 1. Зависимость среднего числа ( $N_n$ ) и удаления от грани индентора ( $L_n$ ) полос сдвига типа полуколец, а также среднего числа ( $N_n$ ) и длины ( $L_n$ ) полос сдвига типа лучей от нагрузки на индентор  $P$  у сплава  $\text{Fe}_{82.3}\text{-Cr}_{4.0}\text{-Mo}_{7.2}\text{-V}_{0.5}\text{-B}_{4.0}\text{-Si}_{2.0}$ : ■ — исходного и облученного ионами дозой; □ —  $2 \cdot 10^{16}$ ; ○ —  $1 \cdot 10^{17}$  и ● —  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; а)  $N_n = f(P)$ ; б)  $L_n = f(P)$ ; в)  $N_n = f(P)$ ; г)  $L_n = f(P)$

Из рис. 1, а видно, что имплантация ионов азота приводит к уменьшению числа полос сдвига в виде полуколец. При этом максимум функции  $N_n = f(P)$  смещается в область более высоких нагрузок. В случае же облучения дозой  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> в исследуемом интервале нагрузок зависимость  $N_n = f(P)$  линейная (рис. 1, а). Уменьшение числа полос сдвига происходит на фоне увеличения удаленности от отпечатка индентора полос сдвига в виде полуколец при дозе облучения  $2 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. С ростом дозы облучения  $L_n$  уменьшается (рис. 1, б).

Полосы сдвига в виде лучей появляются у индентора при нагрузках на него около 1 Н. Из рис. 1, в и г видно, что имплантация ионов азота приводит к уменьшению числа полос сдвига данного типа и увеличению их длины.

Полученные результаты могут быть объяснены внутренними напряжениями, сформированными в приповерхностных слоях фольги имплантированными ионами. Для аморфных сплавов на основе железа азот является кристаллизующей примесью [6]. Поэтому в качестве другого фактора, влияющего на неомогенную пластичность исследуемого материала, можно выделить кристаллизацию имплантированного слоя.

Если на основании дислокационного подхода [7] предположить, что полосы сдвига в виде полуколец состоят из краевых дислокаций, а в виде лучей — из винтовых, то благодаря тому, что краевые дислокации преодолевают препятствия переползанием, наличие сформированных ионным пучком в приповерхностных слоях стопоров и выделений новой фазы, приводит к наблюдаемому на эксперименте уменьшению числа и удаленности от индентора полос сдвига в виде полуколец.

Винтовые дислокации преодолевают препятствия огибанием, что не сопровождается существенными энергетическими потерями, поэтому длина лучей не убывает, а растет благодаря внутренним напряжениям, вызванным ионной имплантацией.

Работа источников дислокаций зависит от расстояния между стопорами. Чем оно меньше, тем выше напряжения начала генерации дислокаций. Имплантация приводит к увеличению плотности стопоров, и это способствует затруднению генерации дислокаций при деформировании поверхности. А так как активность генерации дислокаций прямо связана с числом полос сдвига, то имплантация ионов азот и приводит к уменьшению числа полос сдвига двух типов.

В качестве подтверждения наличия процессов кристаллизации поверхностных слоев в данной работе выступило наблюдаемое у отпечатков индентора выкрашивание, интенсивность которого растет с ростом нагрузки на индентор и дозы облучения (рис. 2). У исходных образцов выкрашивание не наблюдалось. Представленные на рис. 2 результаты рассчитывались по формуле

$$S = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^N d_i^2,$$

где  $d$  — диаметр области выкрашивания, измеренный экспериментально,  $N$  — количество областей выкрашивания.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т03-144).

### Литература

1. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М., 1990.
2. Верещагин М. Н., Шепелевич В. Г., Остриков О. М., Цыбранкова С. Н. // Докл. НАН Беларуси. 2003. Т. 47, № 4. С. 107–109.
3. Верещагин М. Н., Шепелевич В. Г., Остриков О. М., Цыбранкова С. Н. // Кристаллография. 2002. Т. 47, № 4. С. 691–696.
4. Верещагин М. Н., Шепелевич В. Г., Остриков О. М., Цыбранкова С. Н. // Физика металлов и металловедение. 2002. Т. 93, № 5. С. 101–104.
5. Girzhon V. V., Rudnev Yu. V., Anpilogov D. I., Smolyakov A. V. // Cripta. Mater. 1998. Vol. 39(6). P. 815–823.
6. Алехин В. П., Хоник В. А. Структура и физические закономерности деформации аморфных сплавов. М., 1992.
7. Глезер А. М., Молотилев Б. В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М., 1992.

VERESHCHAGIN M. N., KOMAROV F. F., SHEPELEVICH V. G., OSTRIKOV O. M.

### INFLUENCE OF THE IMPLANTATION OF $N^+_2$ IONS ON THE INHOMOGENEOUS PLASTIC WARP OF AN AMORPHOUS ALLOY Fe—Cr—Mo—V—B—SI

### Summary

The influence of the implantation of different-dose nitrogen ions on the regularities of the inhomogeneous plastic warp of an amorphous Fe—Cr—Mo—V—B—Si alloy is studied. It is found that the ion implantation decreases the number of shift bands in the region of local surface warp. In this case, the length of shift bands in the form of semi-rings decreases and in the form of beams — increases. The flaking of warp regions in the ion — implanted amorphous strips is revealed.

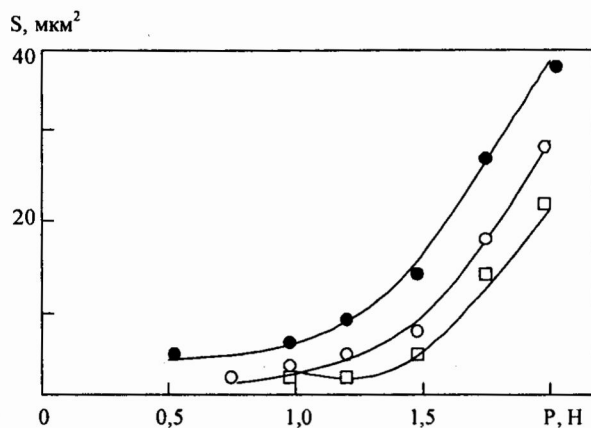


Рис. 2. Зависимость площади  $S$  областей выкрашивания от нагрузки на индентор  $P$  у сплава  $Fe_{82.3}-Cr_{4.0}-Mo_{7.2}-V_{0.5}-B_{4.0}-Si_{2.0}$  облученного ионами дозой: □ —  $2 \cdot 10^{16}$ ; ○ —  $1 \cdot 10^{17}$  и ● —  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>