

05.1,10;11;12

Влияние градиента давления ударной волны в α -Fe, облученном мощным ионным пучком, на появление максимума микротвердости на больших глубинах

© А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк, В.И. Лаврентьев,
С.Н. Волков, С.В. Плотников

Сумский институт модификации поверхности, Сумы, Украина
Технический университет, Усть-Каменогорск, Казахстан
Институт электрофизики УрО РАН, Томск, Россия
А.О. Востокмаш, Усть-Каменогорск, Казахстан

Поступило в Редакцию 22 мая 1997 г.

Представлены результаты исследований дефектной структуры и микротвердости в α -Fe, облученном импульсным мощным пучком, проведенные с помощью аннигиляции позитронов, просвечивающей электронной микроскопии и наноиндентера. Показано влияние градиента давления и глубины формирования фронта ударной волны в облученном мощным импульсным пучком α -Fe на образование и местоположение максимума плотности дислокаций и микротвердости в модифицированном слое.

Известно, что мощные ионные пучки используются для модификации поверхности, ионного перемешивания и осаждения пленок и покрытий [1–4]. Однако имеются нерешенные проблемы, которые не позволяют прогнозировать изменение физико-химических и служебных характеристик металлических материалов. Основной трудностью является учет всех процессов при воздействии мощным импульсным пучком, которые могут влиять на изменение дефектной структуры, микротвердости и их конечный профиль в материале. Можно перечислить некоторые из этих процессов, происходящих в металле при воздействии мощным импульсным пучком: нагрев, плавление, испарение, разлет пароплазменного облака (абляция), формирование ударной волны, закалка из жидкого и газообразного состояния, массоперенос и т.д. Целью же настоящего сообщения являлось экспериментальное исследование дефектной структуры и микротвердости после воздействия

мощного импульсного пучка на α -Fe и изучение эффектов, влияющих на изменение глубины модифицированного слоя.

В качестве объектов исследований были использованы отожженные образцы α -Fe размером $14 \times 14 \times 2$ mm с крупным зерном (1.5–3 mm). Облучение мощным импульсным пучком проводили на ускорителе с параметрами пучка $E_{cp} = 300$ keV, длительностью $t = 100$ ns, плотность тока изменялась от 10^2 до $2.5 \cdot 10^3$ A/cm² [5]. Состав пучка $C^+ \approx 50\%$; $H^+ \approx 50\%$. Остаточное давление в камере ускорителя 10^{-5} Торр. Сечение пучка было намного больше размера образцов.

Для электронно-микроскопических исследований дислокационной структуры, формирующейся в приповерхностных слоях мишени при воздействии мощным импульсным пучком, готовили фольги при заданном расстоянии от поверхности. Методика приготовления фольг описана в работе [6]. Время жизни позитронов измеряли на спектрометре с временным разрешением 220 ps, с фиксированной шириной на половине высоты Δt . Источником позитронов был ^{22}Na (B^+ , γ), выпаренный на алюминиевую фольгу в майларовом пакете. Интенсивность источника $\tau_1 = 150$ ps; $I_1 = 6.6\%$; $\tau_2 = 450$ ps; $I_2 = 2.6\%$. Спектр корректировали с помощью ^{207}Bi . Измерение микротвердости проводили на установке "Microtest". Измерение спектров резерфордского обратного рассеяния с каналированием (РОР/К) проводили с помощью пучка ионов $^4He^+$ с энергией 2 MeV. В зоне плавления поверхностного слоя железа проводилось измерение профиля дефектов с помощью пучка медленных позитронов с энергией от 0.2 до 30 keV, что позволяло анализировать слои толщиной от нескольких нанометров до $1.2 \mu m$ [7].

В результате закалки из жидкого состояния (возможно, и из газообразного) в поверхностном слое толщиной до $1.2 \mu m$ образуется высокая концентрация вакансионных кластеров, примесных комплексов и дислокаций, о чем свидетельствует увеличение S -параметра кривых доплеровского уширения аннигиляционного пика по сравнению с исходным (необлученным) образцом α -Fe (рис. 1, *a*). В слое, где происходит формирование максимальных термомеханических напряжений (граница жидкой и твердой фазы), образуется высокая концентрация кластеров вакансий $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и формируется развитая дислокационная структура, имеющая скалярную плотность $\rho = 6.5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (рис. 1, *a* (кривые 2, 3)). Результаты, полученные с помощью РОР/К (рис. 1, *b*), свидетельствуют о том, что концентрация междоузленных атомов также возросла, о чем свидетельствует увеличение χ для

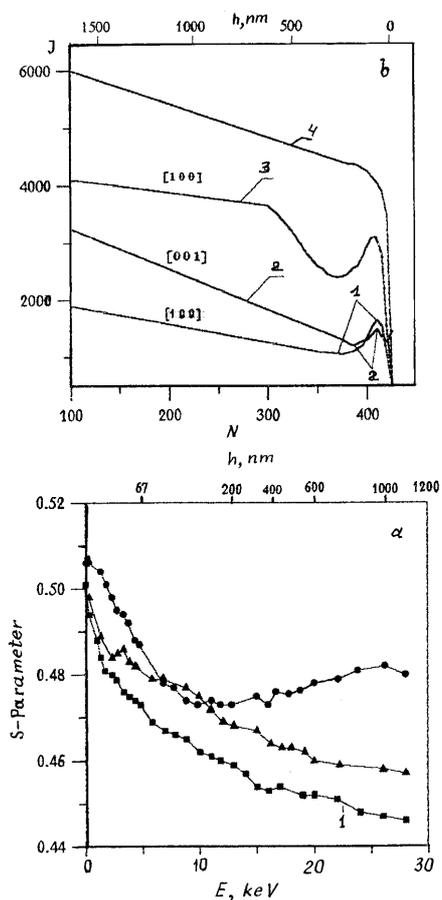


Рис. 1. *a* — зависимости S -параметра кривых доплеровского уширения аннигиляционного пика по глубине слоя α -Fe: 1 — исходное состояние; 2 — облученный мощным импульсным пучком с $j = 150 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 3 — облученный мощным импульсным пучком с $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; *b* — энергетические спектры резерфордского обратного рассеяния ионов с каналированием (ион $^4\text{He}^+$ с энергией 3 MeV): 1 — ориентация $\langle 100 \rangle$ в исходном состоянии; 2 — ориентация $\langle 001 \rangle$ в состоянии, облученном мощным импульсным пучком с $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 3 — ориентация $\langle 100 \rangle$ в состоянии, облученном мощным импульсным пучком с $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 4 — разориентированные зерна α -Fe.

направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ по сравнению с исходным ориентированным кристаллом (большим зерном). Следует отметить, что в направлении $\langle 100 \rangle$ образуется значительно больше междоузленных дефектов. В приповерхностном слое толщиной до $5 \mu\text{m}$ дислокационная структура представлена индивидуальными равномерно распределенными дислокациями. Непосредственно у поверхности средняя плотность дислокаций достигает $3.6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$. Существенные изменения в дислокационной структуре образца начинаются с глубины $30\text{--}40 \mu\text{m}$, где дислокационная структура становится весьма неоднородной. Наряду с хаотической дислокационной структурой, представленной отдельными дислокациями и дислокационными сплетениями, в структуре появляются малоугловые границы, которые изменяются от дислокационных сеток с углом разориентации ($5\text{--}7^\circ$) до областей с полиганизованной структурой. При облучении мощным импульсным пучком время тепловой релаксации существенно меньше длительности облучения, поэтому практически мгновенный нагрев металла вызывает в приповерхностной области генерирование напряжений в твердотельной матрице (термоудар); а далее происходит плавление и выброс материала со стороны облучаемой поверхности. Возникающий импульс отдачи создает дополнительное сжатие материала в твердой фазе. Покажем, что генерируемая в этом случае волна является ударной. Критерий образования ударной волны был получен для воздействия лазерного пучка [8], для нашего случая он будет иметь вид

$$\frac{IS}{\tau_u} > C_e^4 \rho_0 R_0, \quad (1)$$

$$Q = IS\tau, \quad (2)$$

$$\mu_\Lambda = R_0^{-1}, \quad (3)$$

где I — интенсивность, S — площадь облучения, R_0 — пробег ионов в материале. При используемых режимах облучения $I \sim 10^8 \text{ W/cm}^2 = 10^{12} \text{ W/m}^2$; $\tau \sim 10^{-7} \text{ s}$; $S \sim 10^{-4} \text{ m}^2$; для нашей мишени $C_e = 5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, $\rho_0 = 7.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $R_0 = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ получим

$$\frac{IS}{\tau} \approx 10^{15} \text{ и } C_e^4 \rho_0 R_0 \approx 10^{12}. \quad (4)$$

Таким образом, критерий образования ударной волны выполняется, а ее начальное давление составляет несколько ГПа, т.е. волна является слабой от 2 до 10 ГПа.

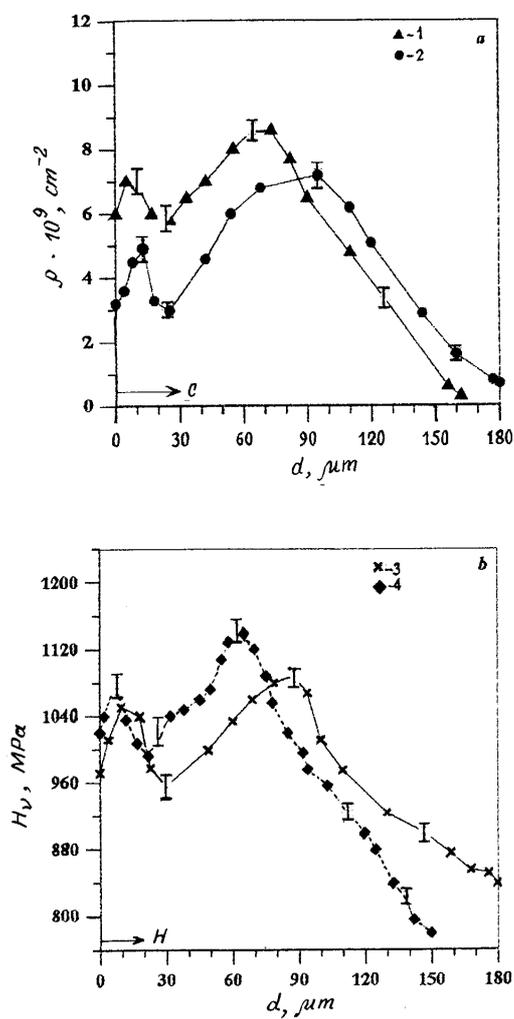


Рис. 2. Зависимости плотности дислокаций (a) и микротвердости (b) в α -Fe, облученном мощным импульсным пучком по глубине упрочненного слоя (C — плотность дислокаций исходных состояний, H — микротвердость необлученного образца): 1,3 — $j = 150 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 2,4 — $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$.

Давление в ударной волне при ее распространении в глубь мишени падает, что вызывает уменьшение H_v с глубиной (рис. 2). Однако фронт ударной волны становится круче (это подтверждается нашими расчетами) и градиент давления возрастает, достигая максимума в области формирования фронта ударной волны. Наиболее интенсивная генерация как собственных, так и примесных дефектов будет происходить в области фронта ударной волны. Междоузельники существенно подвижнее вакансий, поэтому их сток к дислокациям закрепляет последние, снижая их подвижность. Импульс ударной волны приобретают как атомы матрицы, так и дефекты (центры рассеяния).

На рис. 2, a, b приведены зависимости средней плотности дислокаций (кривые 1, 2) и микротвердости от расстояния до облученной мощным импульсным пучком поверхности α -Fe. Полученные зависимости имеют ярко выраженные максимумы у поверхности и в глубине модифицированного слоя. Повышение потока энергии (плотности тока) мощного импульсного пучка приводит к смещению второго максимума ближе к поверхности, т.е. сказывается влияние градиента давления ударной волны и местоположение формирования фронта ударной волны.

В результате измерения времени жизни позитронов в облученных мощным импульсным пучком образцах α -Fe было получено, что позитроны захватываются кластерами вакансий (три и более вакансий) с временем жизни $\tau_2 = 224 \pm 5$ ps и $I_2 = 34.5\%$. Фиксируя время $\tau_1 = 108$ ps, мы получили $\tau_2' = 165 \pm 2$ ps, которое соответствует времени жизни позитронов, локализованных на дислокациях, что хорошо совпадает с результатами работы [7].

Таким образом, экспериментальные результаты свидетельствуют об образовании широкого спектра дефектов от кластеров вакансий до дислокаций и ячеистой дислокационной структуры в области существования максимального градиента ударной волны. Полученные зависимости свидетельствуют о возможности целенаправленного изменения свойств материалов путем подбора соответствующего режима облучения.

Работа частично финансировалась ГКНТ Украины, проект "Радуга" 7.5.4/73-93.

Авторы признательны сотрудникам лаборатории Sandia National Laboratories и Los Alamos National Laboratory за обсуждение полученных результатов на семинарах. Два соавтора А.Д. Погребняк и А.Н. Валяев благодарят ISF за финансовую поддержку их участия в конференции IBMM'96 Albuquerque, U.S.A.

Список литературы

- [1] *Pogrebnyak A.D., Ruzimov Sh.M.* // Phys. Lett. 1987. V. 120. P. 259–262.
- [2] *Pogrebnyak A.D.* // Phys. Stat. Sol. 1990. V. 117. P. 17–51.
- [3] *Davis A., Remnev G., Stinnett R., Yatsui K.* // MPS Bulletin. 1996. V. 21. P. 58–62.
- [4] *Yatsui K., Grigoriu C., Kubo H., Masugata K., Shimotori Y.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 1214–1216.
- [5] *Погребняк А.Д., Шаркеев Ю.П., Махмудов Н.А., Первалова Т.И., Тухтаев Ш.М.* // Поверхность. 1993. В. 3. P. 95–101.
- [6] *Иванов Ю.Ф., Погребняк А.Д., Мартыненко В.А., Ошнер Р.* // ФХОМ. 1996. В. 6. С. 13–19.
- [7] *Zecca A., Brusa R., Paridaense V., Naia D., Pogrebnyak A.D., Markov A.B., Rotstein V.P.* // Phys. Lett. 1993. V. 175. P. 433–440.
- [8] *Steverding B., Werhheiser A.H.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 1971. N 4. P. 545–552.