

05;10

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

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

Сумский институт модификации поверхности
Технический университет, Усть-Каменогорск
Институт электрофизики УрОРАН, Томск
АО "Востокмаш", Усть-Каменогорск

*Поступило в Редакцию 20 ноября 1997 г.
В окончательной редакции 18 июня 1998 г.*

Представлены результаты исследований дефектной структуры и микротвердости в α -железе, облученном импульсным мощным ионным пучком (МИП), проведенные с помощью аннигиляции позитронов, электронной микроскопии и наноиндентора. Показано влияние градиента давления и глубины формирования фронта ударной волны (ФУВ) в облученном МИП 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 МИП, которые в основном влияют на изменение дефектной структуры, микротвердости и их конечный профиль в материале. Можно перечислить некоторые процессы происходящие в металле при воздействии МИП: нагрев, плавление, испарение, разлет пароплазменного облака (абляция), формирование ударной волны (УВ), закалка из жидкого и газообразного состояния, массоперенос и т. д.

Целью настоящего сообщения являлось экспериментальное исследование дефектной структуры и микротвердости после воздействия МИП на α -Fe и изучение закономерностей, влияющих на изменение глубины модифицированного слоя.

В качестве объектов исследования были использованы отожженные образцы α -Fe размером $14 \times 14 \times 2$ mm с крупным зерном (1.5–3) mm. Облучение МИП было проведено на ускорителе с параметрами пучка: $F_{av.} = 300$ keV, длительность $\tau = 100$ ns, плотность тока изменялась от 10^6 до $2.5 \cdot 10^7$ A/m² [5]. Состав пучка: $C^+ \approx 50\%$, $H^+ \approx 50\%$. Остаточное давление в камере ускорителя 10^{-5} Torr. Сечение пучка было намного больше размера образцов.

Для электронно-микроскопических исследований дислокационной структуры, формирующихся в приповерхностных слоях мишени при МИП-воздействии, 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 $\Delta\tau = 208$ ps. Источником позитронов был $^{22}\text{Na}(\beta^+, \gamma)$, выпаренный на алюминиевую фольгу в майларовом пакете. Интенсивность источника $\tau_r = 150$ ns; $I_1 = 6.6\%$; $\tau_2 = 450$ ps; $I_2 = 26\%$. Спектр корректировался с помощью ^{207}Bi . Измерение микротвердости проводилось на установке "Micromet". Измерение спектров резерфордовского обратного рассеяния с каналированием (РОР/К) проводили с помощью пучка ионов $^4\text{He}^+$ 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 μm [7].

Подробный анализ приповерхностного слоя, который был расплавлен в результате облучения α -Fe мощным ионным пучком (МИП), был проведен с помощью пучка медленных позитронов и резерфордовского обратного рассеяния с каналированием ионов (РОР/К).

В результате закалки из жидкого состояния (а возможно, и газообразного) в поверхностном слое толщиной до 1.2 μm образуется высокая концентрация вакансионных кластеров, примесных комплексов и дислокаций, о чем свидетельствует увеличение S -параметра кривых доплеровского уширения аннигиляционного пика (ДУАП) по сравнению с исходным (необлученным) образцом α -Fe (рис. 1, а). В слое, где происходит формирование максимальных термомеханических напряжений

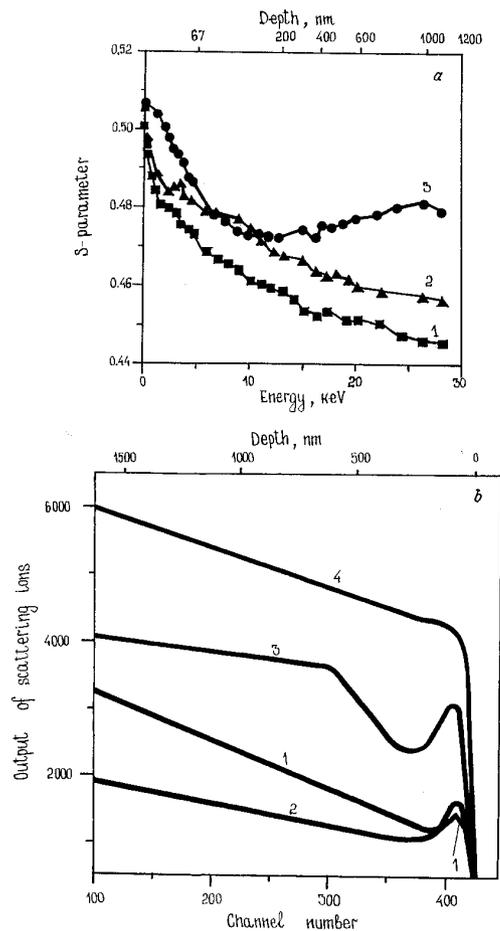


Рис. 1. *a* — зависимость *S*-параметра кривых ДУАП по глубине слоя α -Fe: 1 — исходное состояние; 2 — облучение МИП при $j = 100 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 3 — облучение МИП при $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$. *b* — энергетические спектры резерфордского обратного рассеяния ионов с каналированием (ионы $^4\text{He}^+$ с энергией 3 MeV): 1 — ориентация $\langle 100 \rangle$ в исходном состоянии; 2 — ориентация $\langle 001 \rangle$, облучение МИП при $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 3 — ориентация $\langle 100 \rangle$, облучение МИП при $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 4 — разориентированное зерно α -Fe.

(граница жидкой и твердой фазы), образуется высокая плотность кластеров вакансий $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и формируется развитая дислокационная структура (имеющая скалярную плотность $6.5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (рис. 1, *a*, кривые 2, 3)). Результаты, полученные с помощью РОР/К (рис. 1, *b*), свидетельствуют о том, что концентрация межузельных атомов также возросла, о чем свидетельствует увеличение χ для 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 межузельных дефектов. В приповерхностном слое толщиной до $5 \mu\text{m}$ дислокационная структура представлена равномерно распределенными индивидуальными дислокациями. Непосредственно у поверхности средняя плотность дислокаций достигает $3.6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Существенные изменения в дислокационной структуре образца начинаются с глубины $30-40 \mu\text{m}$, 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 однородного распределения дислокаций до сложных дислокационных переплетений и границ с углом разориентации $(5-7)^\circ$. При облучении МИП время тепловой релаксации существенно меньше длительности облучения, поэтому практически мгновенный нагрев металла вызывает в приповерхностной области генерирование термонапряжений в твердотельной матрице (термоудар), вследствие чего 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 УВ был получен для воздействия лазерного пучка [8]; для нашего случая он будет иметь вид

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

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

и

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

$$n = 1,$$

где I — интенсивность; S — площадь облучения; R_0 — пробег ионов в материале.

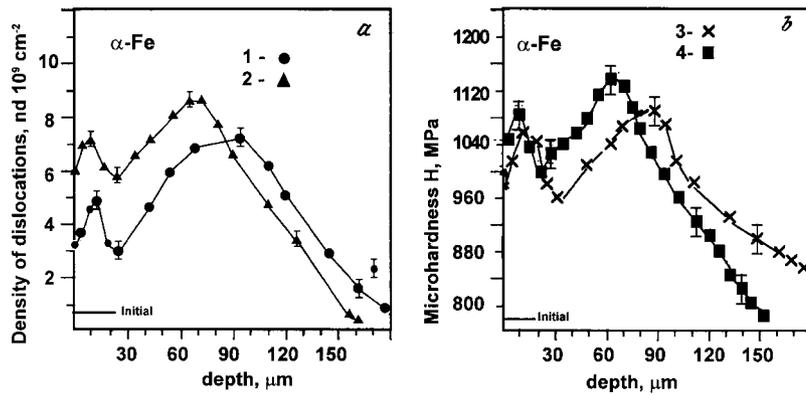


Рис. 2. Зависимости плотности дислокаций (*a*) и микротвердости (*b*) в α -Fe, облученном МИП, по глубине упрочненного слоя: 1, 3 — $j = 100 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$; 2, 4 — $j = 400 \text{ A/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ ns}$.

При используемых режимах облучения $I \cong 10^8 \text{ W/cm}^2 = 10^{12} \text{ W/m}^2$, $\tau = 10^{-7} \text{ s}$; $S \cong 10^{-4} \text{ m}$ для нашей мишени $C_e = 5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, $\rho_0 = 7.8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $R_0 \cong 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$. Получим $(IS/\tau) \cong 10^{15}$ и $C_e^4 \rho_0 R_0 \cong 10^{12}$.

Таким образом, критерий образования УВ выполняется, а ее начальное давление составляет несколько ГПа, т.е. волна является слабой (от 2 до 10 ГПа). Давление в УВ при ее распространении в глубь мишени падает, что вызывает уменьшение H_V с глубиной (рис. 2). Однако фронт УВ становится круче (это подтверждается нашими расчетами), и градиент возрастает, достигая максимума в области формирования ее фронта (ФУВ).

Наиболее интенсивная генерация как собственных, так и примесных дефектов будет происходить в области ФУВ. Междоузельные дефекты существенно подвижнее вакансий, поэтому их сток к дислокациям закрепляет последние, снижая их подвижность. Импульс УВ приобретают как атомы матрицы, так и дефекты (центры рассеяния).

На рис. 2, *a*, *b* приведены зависимости средней плотности дислокаций (кривая 1, 3) и микротвердости (2, 4) от расстояния до облученной МИП поверхности α -Fe. Полученные зависимости имеют ярко выраженные

максимумы у поверхности и в глубине модифицированного слоя. Повышение потока энергии (и плотности тока) МИП приводит к смещению второго максимума ближе к поверхности, т. е. сказывается влияние градиента давления УВ и местоположения формирования фронта ударной волны.

Работа частично финансировалась ГКНТ Украины (проект 75.4/73-93 "Радуга").

Авторы признательны сотрудникам лаборатории Sandia National Laboratories и Los Alamos Laboratory за обсуждение полученных результатов на семинарах.

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.* // MRS 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., Перевалова Г.И., Тухтаев Ш.М.* // Поверхность. 1993. В. 3.
- [6] *Иванов Ю.Ф., Погребняк А.Д., Мартыненко В.А., Ошнер Р.* // ФХОМ. 1996. В. 6. С. 13–19.
- [7] *Zecca A., Brusa R., Paridaens V., Naia D., Pogrebnyak A.D., Markov A.D., Rotstein V.P.* // Phys. Lett. 1993. V. 175. P. 433–440.
- [8] *Steverding B., Werhheiser A.H.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 1971. № 4. P. 545–552.