

04;07;11;12

Автоионномикроскопическое изучение воздействия высокоинтенсивного потока ионов лазерной плазмы на вольфрам¹

© А.Л. Суворов, Ю.Н. Чеблуков, А.Ф. Бобков, С.В. Зайцев,
С.В. Латышев, Е.Н. Скороходов, А.Э. Степанов

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Поступило в Редакцию 19 июня 1998 г.

Приведены результаты автоионномикроскопических исследований структуры вольфрамовых образцов, подвергнутых воздействию высокоинтенсивного ионного потока ($\sim 10^{22}$ ион/см²·с) свинцовой лазерной плазмы. Обнаружена аморфизация поверхностного слоя, установлен спектр образуемых дефектов. Определены предельные механические свойства облученных острийных образцов. Намечены перспективные направления дальнейших исследований.

Интерес к исследованию взаимодействия лазерной плазмы с поверхностью твердых тел связан с тем, что оно может имитировать деградацию материалов в создаваемых установках термоядерного синтеза. Важным обстоятельством является и то, что в подобных экспериментах возможно изучение воздействия коротких, высокоинтенсивных импульсов ионного тока на конструкционные материалы вплоть до их полного разрушения.

Целью настоящей работы явилось автоионномикроскопическое изучение [1] дефектной структуры вольфрамовых образцов, подвергнутых воздействию свинцовой плазмы, создаваемой импульсным СО₂-лазером. При проведении эксперимента свинцовая мишень находилась под небольшим углом к оси лазерного луча и направляла лазерный факел на стандартные для методики автоионной микроскопии острийные образцы. При этом расстояние между свинцовой мишенью облучаемой поверхностью острий варьировалось от 4 до 14 мм. Все образцы облучались одновременно. Флюенс ионов свинца в месте расположения острий составил $\sim 10^{16}$ ион/см² за один импульс лазера для расстояния

¹ Настоящая работа профинансирована Международным научно-техническим центром (МНТЦ) в рамках выполнения проекта № 467.

4 mm и $\sim 10^{15}$ ion/cm² для расстояния 12 mm. Основная масса ионов имела энергию порядка 0.5 keV.

Указанные параметры облучения были рассчитаны с помощью квазидвумерной гидродинамической модели разлетающейся лазерной плазмы [2] для использованного в экспериментах CO₂-лазера (энергия лазерного луча ≈ 3 J, диаметр пятна фокусировки ≈ 1 mm, длительность лазерного импульса ≈ 1 μ s). Модель успешно использовалась ранее для расчета зарядового состава ионов в разлетающейся лазерной плазме [3], температуры лазерной плазмы [4] и ряда рекомбинационных эффектов [5]. Как показали расчеты коллекторных экспериментов [6], квазидвумерная гидродинамическая модель, несмотря на весьма грубое моделирование бокового растекания плазмы, пригодна для расчета плотности ионного тока в разлетающейся плазме с точностью до фактора 1.5 \div 2.0.

При небольших дистанциях установки образцов от свинцовой мишени (4 \div 8 mm) их внешний вид в оптическом микроскопе явно отражал механическое и термическое воздействие; первое проявлялось в пластическом изгибе и в отрыве вершин острий, причем поверхность разрушения соответствовала хрупкому отрыву. Увеличение дистанции между остриями и свинцовой мишенью до 10 \div 14 mm (т. е. снижение мощности воздействия) приводило к тому, что отрыв острий не наблюдался, но на их вершине происходило плавление тонкого поверхностного слоя с образованием за счет капиллярных поверхностных сил характерного шарика.

Во всех случаях анализу структуры образцов в автоионном микроскопе предшествовала дополнительная электрополировка с целью утонения вершины. Автоионномикроскопические исследования дефектной структуры образцов осуществлялись по стандартной методике [7] с привлечением расчетов и моделирования на ЭВМ [8]. Микроскопические изображения многих поверхностных атомных слоев вблизи исходной вершины острия показали полную разупорядоченность, хотя и отражали содержание некоторых зародышей структуры (рис. 1). Анализ таких изображений позволяет сделать заключение об аморфизации значительного приповерхностного слоя образцов. По-видимому, это связано со сверхбыстрым охлаждением некоторой зоны острия после окончания действия ионного импульса. Проведенные оценки показали, что охлаждение вершины острия происходило главным образом не за счет теплоотвода через массивную часть материала, а путем излучения,

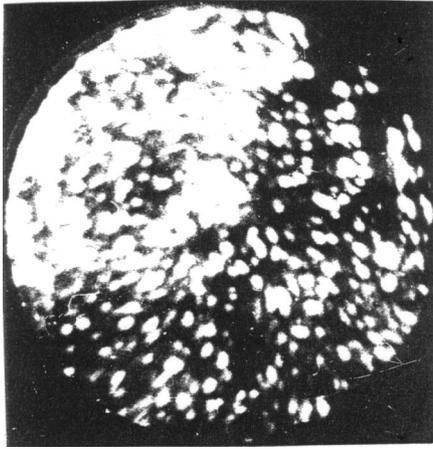


Рис. 1. Типичное автоионное изображение поверхности облученного образца, демонстрирующее аморфизацию структуры вблизи поверхности облучения.

чему способствовала высокая удельная поверхность этой области. Учитывая, что скорость охлаждения dT/dt приближенно равна

$$dT/dt = 2\sigma T^4 / (3kn_0R_0),$$

где T — температура образца, σ — постоянная Стефана–Больцмана, k — постоянная Больцмана, n_0 — число атомов вольфрама в единице объема и R_0 — радиус острейшего образца. При температуре плавления вольфрама ($T_m \approx 3700$ К) и $R_0 \leq 0.5 \mu\text{m}$ она может превысить $dT/dt > 10^7$ grad/s, что достаточно для предотвращения кристаллизации даже чистых металлов [9].

По мере испарения многих поверхностных атомных слоев полем, начиная со слоев, приближенно удаленных от исходной облучаемой поверхности на $0.5 \div 1.0 \mu\text{m}$, на изображениях все в большей и большей степени проявляется кристаллическая структура. При этом идентифицируется широкий спектр дефектов: начиная от единичных точечных (вакансий и межузельных атомов в комплексах с атомами примесей [10]) и их комплексов невысокой кратности до дислокаций, дислокационных петель и микротрещин. Существенное разупорядочение структуры образцов снижалось и, в конце концов, для большинства образцов удавалось получить изображения, демонстрирующие весьма совершенную кристаллическую структуру.

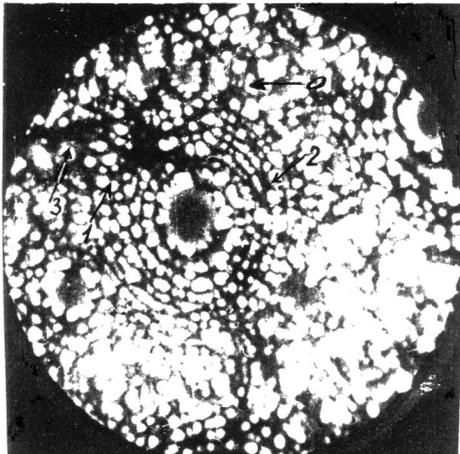


Рис. 2. Автоионное изображение структуры облученного образца на глубине $\sim 0.5 \mu\text{m}$ от облучаемой поверхности (обозначения стрелок — в тексте).

Типичное автоионное изображение переходной области облученного образца приведено на рис. 2. На нем стрелкой 1 указана микропора, стрелкой 2 — дислокация с вектором Бюргера $\mathbf{b} = a[100]$ вблизи центрального полюса (011) и стрелками 3 — граница зерен. В среднем переходная область залегала на глубине $1.0 \div 3.0 \mu\text{m}$. Пример автоионного изображения более совершенной структуры приведен на рис. 3. Лишь в правой верхней его части видна микропора со средними линейными размерами $2.0 \div 6.0 \text{ nm}$, при этом она имеет явную вытянутость вдоль кристаллографического направления [110]. Подчеркнем, что подобную вытянутость имела большая часть наблюдавшихся микропор, что, возможно, связано с исходной текстурой образцов (проволочных заготовок).

В ряде случаев на автоионных изображениях облученных образцов наблюдался "поворот" отдельных участков атомных плоскостей. Предположительно это можно объяснить возникновением зародышей дислокационных петель вакансионного типа в плоскостях $\{101\}$ [11]. Механизм их формирования при конденсации точечных дефектов подробно рассмотрен в [12].

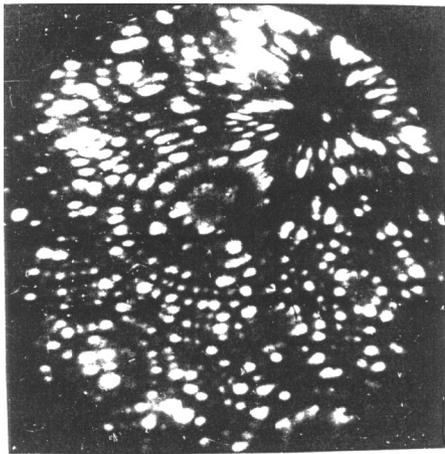


Рис. 3. Автоионное изображение структуры облученного образца на глубине $\sim 3.0 \mu\text{m}$ от облучаемой поверхности.

По методике, описанной, например, в [13] (разрушение острижных образцов пондеромоторными силами электрического поля), для части облученных образцов была определена предельная прочность; в среднем она составила $\sigma_T \geq 2100 \text{ kg/mm}^2$, что явно превышает соответствующее значение для необлученных образцов ($\sim 1950 \text{ kg/mm}^2$ [14]).

Таким образом, плазменная обработка острижных вольфрамовых образцов приводит к существенной деградации их структуры на глубину до $\sim 3.0 \mu\text{m}$, причем на некоторых свойствах материала она может сказываться и положительно. По-видимому, облучение образцов-острий будет полезным для автоионномикроскопического исследования возможных нелинейных процессов в твердых телах. Кроме того, лазерная плазма дает возможность моделировать взаимодействие головной части космических аппаратов с атмосферой планет. Это обусловлено тем, что характерная скорость ($\sim 10^6 \text{ cm/s}$) ионов в лазерной плазме совпадает со второй космической скоростью и варьированием расстояния от мишени до исследуемых образцов можно создавать плотность потока ионов в лазерной плазме, эквивалентную плотности потока газа на движущуюся со второй космической скоростью головную часть космического аппарата на высоте $30 \div 100 \text{ km}$ от поверхности планет, подобных Земле.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность А.Н. Балабаеву и А.Н. Шумшурову за помощь при облучении образцов.

Список литературы

- [1] *Muller E.W., Tsong T.T.* Field ion Microscopy. Principles and Applications. N. Y.: Elsevier, 1969.
- [2] *Латышев С.В.* // Препринт ИТЭФ № 66. М., 1983.
- [3] *Голубева А.А., Латышев С.В., Шарков Б.Ю.* // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. С. 1854.
- [4] *Латышев С.В., Рудской И.В.* // Препринт ИТЭФ № 2. М., 1986.
- [5] *Бобаиов С.В.* и др. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. С. 1383.
- [6] *Латышев С.В., Чеблукое Ю.Н.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. С. 28.
- [7] *Суворов А.Л.* Автоионная микроскопия радиационных дефектов в металлах. М.: Энергоиздат, 1982.
- [8] *Suvorov A.L., Razinkova T.L., Sokolov A.G.* // Phys. Stat. Sol. 1980. V. 61a. P. 11.
- [9] *Золотухин И.В., Бармин Ю.В.* Стабильность и процессы релаксации в металлических стеклах. М.: Металлургия, 1991.
- [10] *Suvorov A.L., Dolin D.E.* // Appl. Surf. Sci. 1996. V. 94/95. P. 384.
- [11] *Зайцев С.В., Суворов А.Л.* // Поверхность. 1985. № 9. С. 104.
- [12] *Хирт Дж., Лоте И.* Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972.
- [13] *Суворов А.Л.* Структура и свойства поверхностных атомных слоев металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [14] *Суворов А.Л.* и др. // Атомная энергия. 1975. Т. 38. С. 412.