

04;05;11;12

Исследование эрозии поверхности различных сортов вольфрама и морфологии продуктов их эрозии в имитационных экспериментах по срывам плазмы

© М.И. Гусева, В.М. Гуреев, А.Г. Домантовский, Ю.В. Мартыненко, П.Г. Московкин,
В.Г. Столярова, В.М. Струнников, Л.Н. Пляшкевич, В.И. Васильев

Российский научный центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: martyn@nfi.kiae.ru

(Поступило в Редакцию 23 февраля 2001 г. В окончательной редакции 12 февраля 2002 г.)

Проведены исследования эрозии поверхности различных сортов вольфрама под воздействием мощных импульсных потоков плазмы, имитирующих срывы плазмы. На примерах поликристалла (W-131) и монокристалла вольфрама (грань (111)) сравниваются распределения продуктов эрозии, собранные под разными углами от мишени, по размерам. Наблюдалась характерная каплевидная эрозия поверхности. Мелкие капли или возвращаются на поверхность или отлетают параллельно поверхности. Крупные капли отлетают ближе к нормали к поверхности. У монокристалла вольфрама отсутствуют мелкие, размером менее $0.125 \mu\text{m}$ капли характерные для поликристаллических вольфрамов. Эрозия монокристалла вольфрама наименьшая из исследованных сортов вольфрама.

Введение

В проектируемом реакторе ИТЭР углеволокнистые композиты предполагается использовать на наиболее энергонапряженных участках дивертора, вольфрам — в элементах диверторного устройства, работающих в менее жестких условиях. Учитывая высокие энергетические пороги распыления вольфрама легкими ионами, следует полагать, что наиболее опасной эрозией вольфрама будут срывы тока плазмы, приводящие к плавлению его поверхности. Ранее нами были проведены исследования эрозии поверхности отечественного вольфрама и морфологии продуктов его эрозии при облучении потоком мощной импульсной дейтериевой плазмы, моделирующей срывы тока плазмы [1].

В настоящей работе проведены исследования эрозии поверхности различных сортов вольфрама под воздействием мощных импульсных потоков плазмы. На примерах поликристалла (W-131) и монокристалла вольфрама (грань (111)) сравниваются распределения продуктов эрозии по размерам, осевших на сборниках из монокристаллического кремния, ткани из SiO_2 и на поверхности облучаемых мишеней.

Методика эксперимента

Образцы вольфрама различных типов — W-131, PLANSEE, легированный до $\sim 1\% \text{La}_2\text{O}_3$, монокристаллов W (грань (111)) и W-Re, электрически полировались и затем облучались в электродинамическом плазменном ускорителе МКТ десятию импульсами дейтериевой плазмы с плотностью энергии 300kJ/m^2 . Длительность импульса составляла $60 \mu\text{s}$. Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве сборников продуктов эрозии использовались образцы монокристаллического

кремния. После экспозиции изучалась микроструктура поверхности образцов вольфрама и кремния в сканирующем электронном микроскопе JEOL. Химический анализ продуктов эрозии определялся методом микрорентгенографии с помощью приставки Link к электронному микроскопу.

Результаты эксперимента

Топография поверхности исследуемых образцов вольфрама после электрохимической полировки показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, а, в результате электрохимической полировки на поверхности W-131 проявились зерна размером от ~ 5 до $16 \mu\text{m}$. На поверхности мишени W + $1\% \text{La}_2\text{O}_3$ выявлены

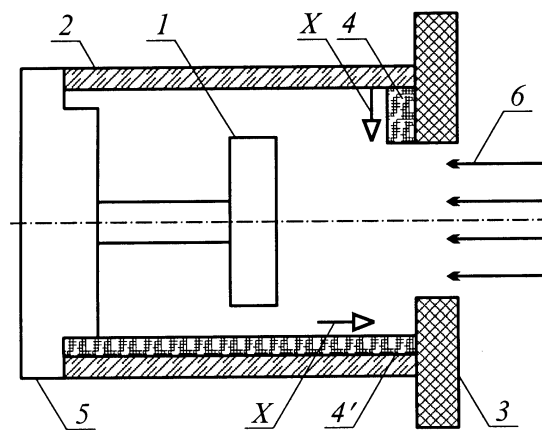


Рис. 1. Расположение кремниевого сборника относительно мишени: 1 — мишень, 2 — кварцевый детектор, 3 — вольфрамовая диафрагма, 4 — базальтовый фильтр, 4' — кремниевый коллектор, 5 — основание, 6 — поток плазмы.

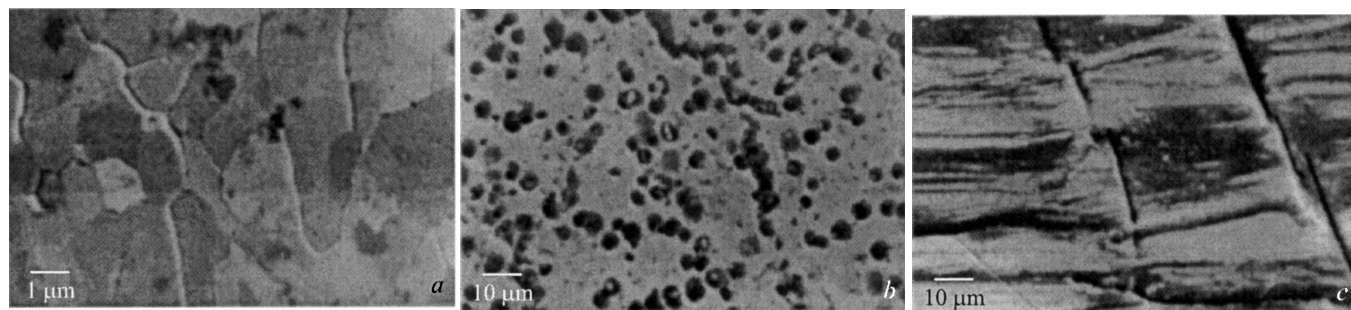


Рис. 2. Топография поверхности вольфрамовых мишеней после электрохимической полировки: *a* — W-13I; *b* — W + 1% La₂O₃; *c* — W-Re.

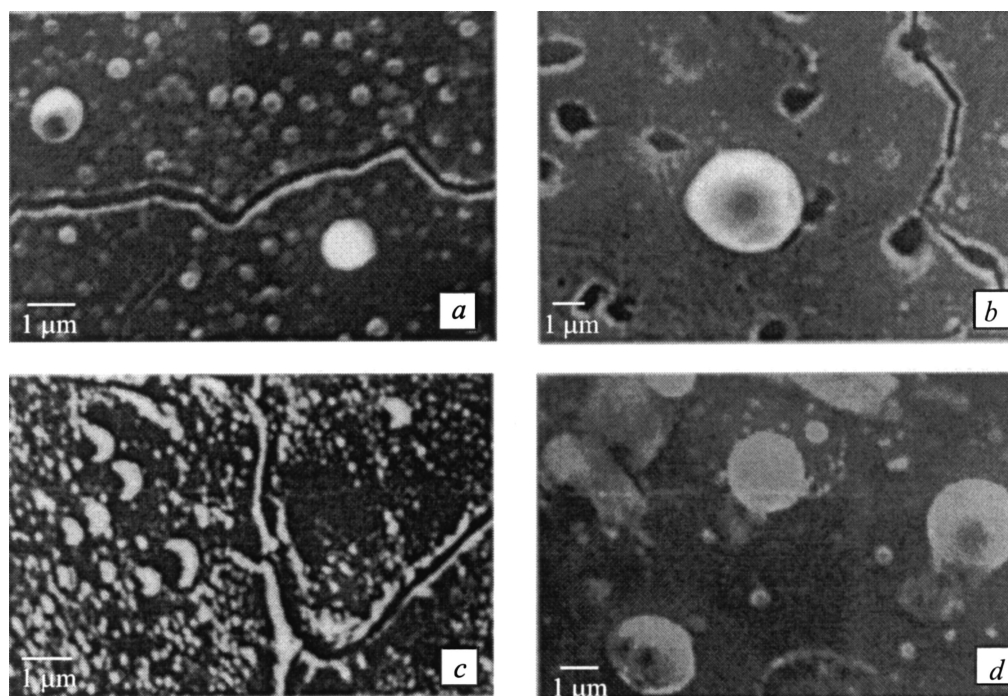


Рис. 3. Микроструктура поверхности вольфрамовых мишеней после воздействия 10 импульсов дейтериевой плазмы с плотностью энергии 300 кДж/м². *a* — W-13I; *b* — W + 1% La₂O₃; *c* — W-Re; *d* — W (грань (111)).

преципитаты La₂O₃, большинство из которых имеют сферическую форму, диаметр выделений La₂O₃ варьируется от 2 до 6 μm (рис. 2, *b*). На поверхности образца W-Re выявились сетки дислокаций (рис. 2, *c*).

На рис. 3 показана микроструктура поверхности тех же мишеней после воздействия импульсной дейтериевой плазмы. Мишени W-13I и W-Re растрескались по границам зерен (*a*) и по линиям дислокаций (*c*) соответственно. Трещины наблюдаются и на поверхности мишени W-1% La₂O₃ (*b*), которая испещрена дырками, образующимися в местах выделений La₂O₃. Характерно, что на поверхности монокристаллического вольфрама (грань (111)) видимых повреждений нет, поверхностный слой расплавлен, некоторая часть вольфрамовых капель возвращается из экранирующей плазмы обратно на мишень. Капли вольфрама можно видеть также на поверхности всех исследуемых образцов независимо от типа. На микроснимках поверхности облученных мише-

ней можно видеть капли, расположенные на трещинах, что свидетельствует о том, что они осели уже после расплавления и растрескивания поверхности.

Рис. 4 иллюстрирует поверхность кремниевого сборника в экспериментах с поликристаллическим W-13I (*a*). Поверхность сборника покрыта мелкими каплями. Максимальный диаметр капель не превышает 1 μm. Размер капель на поверхности мишени близок к осевшим на сборник. Это хорошо видно из рис. 5, на котором представлено распределение капель по диаметрам на Si (кривая 1) и на W-13I (кривая 2). Максимумы в распределениях 1 и 2 находятся в области 0.1–0.125 μm. На рис. 5 также представлены распределения капель по диаметрам для поликристаллического вольфрама (кривая 3), полученное в нашей предыдущей работе [1], в которой положение сборников продуктов эрозии (базальтового фильтра и кремния) отличалось от геометрии эксперимента в настоящей работе.

Сборник располагался перед мишенью под небольшим углом к нормали. Микрофотография такого кремниевого сборника с уловленными каплями вольфрама показана на рис. 4, *b*. Сравнение с рис. 4, *a* показывает, что размер уловленных частиц и положение максимума распределения существенно зависят от положения сборника. Характерно, что в этом случае в отличие от распределения 1 были зафиксированы частицы диаметром более $1\ \mu\text{m}$.

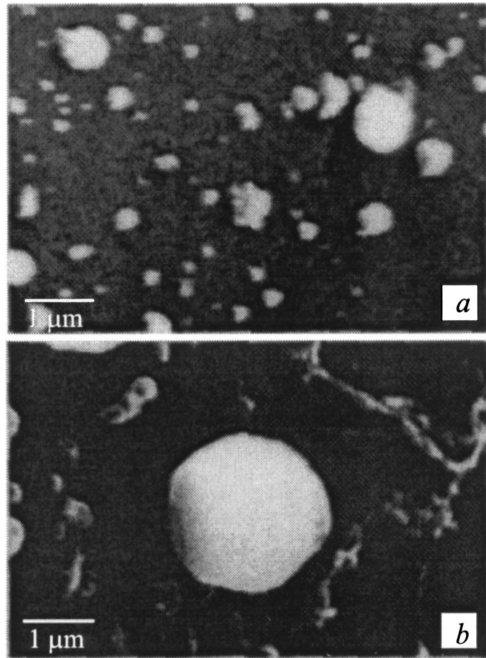


Рис. 4. Поверхности кремниевых сборников, расположенных рядом с облучаемой мишенью параллельно (*a*) и перпендикулярно (*b*) мишени после эксперимента с поликристаллическим вольфрамом.

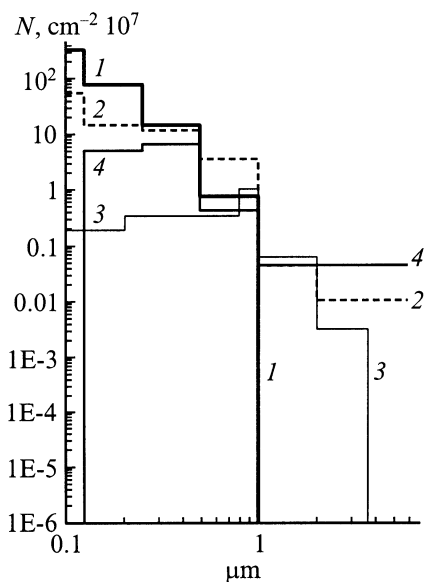


Рис. 5. Распределение капель по диаметрам на поверхности Si сборников (1, 4) и на поверхностях облученных мишеней (2 — W-13I, 3 — поликристаллический W [1]).

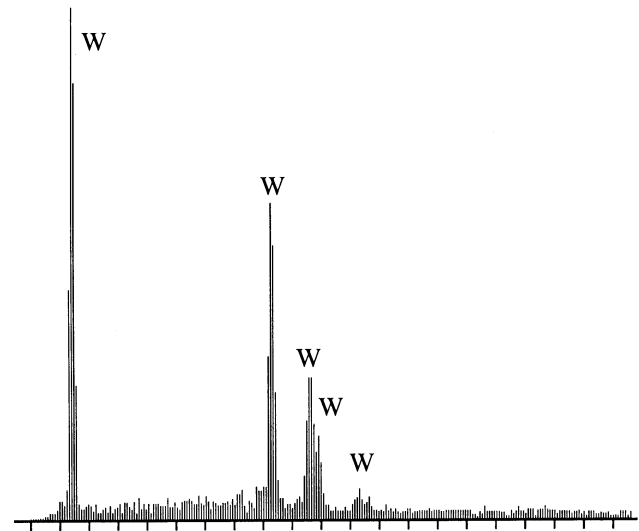


Рис. 6. Дифрактограмма капли на рис. 3, *b*.

Кривая распределения 4 иллюстрирует распределение по размерам продуктов эрозии, вернувшихся из экранирующей плазмы на мишень W (111).

На рис. 6 представлена дифрактограмма капли, из которой следует, что продуктом эрозии является вольфрам (примесь молибдена, по-видимому, попала со стенок камеры; ранее нами использовались винты из молибдена в конструкции крепления образцов).

Из рассмотрения рис. 5 можно сделать следующие выводы.

1. Мелкие частицы или возвращаются (кривая 2 имеет максимум в области диаметров $0.1 \div 0.125\ \mu\text{m}$) или отлетают параллельно поверхности (кривая 1 имеет максимум в том же диапазоне размеров).

2. Крупные частицы отлетают в основном ближе к нормали к поверхности (кривая 3). Частицы, собранные на фильтр, расположенный перед мишенью, под небольшим углом к нормали, имеют максимум для больших диаметров — в диапазоне $0.7 \div 1\ \mu\text{m}$.

3. На поверхности монокристалла вольфрама (кривая 4) отсутствуют частицы диаметром $< 0.125\ \mu\text{m}$.

Обсуждение результатов

Наличие видимых волн на некоторых поверхностях расплавленного металла после воздействия плазменных потоков, имитирующих срыв плазмы, свидетельствует о возбуждении капиллярных волн в результате тангенциальной неустойчивости на поверхности жидкости, над которой движется пар-плазма. Этот поток обусловлен градиентом давления в экранирующей плазме и направлен от центра к периферии. Согласно теории [2] таких волн, их частота равна

$$\omega = \kappa U (\rho' / (\rho + \rho')), \quad (1)$$

где U и ρ' — скорость и плотность пара над поверхностью, ρ — плотность жидкости, κ — волновой вектор волны.

Максимальный инкремент имеют волны с волновым вектором $\kappa_{\max} = 2\rho'U^2/3\alpha$ и $\lambda_{\max} = 2\pi/\kappa_{\max} = 3\pi\alpha/\rho'U^2$. При этом инкремент равен

$$\gamma = 2\rho'U^3/3\alpha \cdot (\rho'/3\rho)^{1/2}.$$

При параметрах экранирующей плазмы $n_i = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и $U = 3 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$ $\omega = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\gamma = 10^6 \text{ s}^{-1}$, $\lambda = 20\text{--}30 \mu\text{m}$, что хорошо согласуется с наблюдаемыми длинами волн.

Размеры вылетающих частиц — капель на 1–1.5 порядка меньше, что свидетельствует о разбрызгивании лишь вершук — гребней волн. Давление „ветра“ $P = \rho'U^2$ действует на одну, подветренную, сторону волны и сносит (сдвигает) гребень волны. Полученные из этого условия размеры капель действительно на порядок меньше длины волны.

Скорость отлета капли при этом направлена параллельно поверхности и равна

$$V_{\parallel} = U(\rho'/2\pi\rho)^{1/2} \cong 3 \cdot 10^2 \text{ cm/s}.$$

Кроме того, капля имеет и перпендикулярную поверхности составляющую скорости, обусловленную подъемом волны, вследствие развития неустойчивости

$$\begin{aligned} V_{\perp} &= a\gamma = 2a\rho'U^3/3\alpha(\rho'/3\rho)^{1/2} \\ &= U\pi^2(\rho'/3\rho)^{1/2} \cong 10^3 \text{ cm/s}, \end{aligned}$$

где a — амплитуда волны, предполагаемая в момент отрыва равной $a = \lambda/4$.

В результате скорость отлета капли есть векторная сумма $V = V_{\perp} + V_{\parallel}$, $V \cong 10^3 \text{ cm/s}$.

В работе [3] показано, что скорость, с которой отлетают зерна по нормали к поверхности, уменьшается и после пролета кнудсеновского слоя (т.е. слоя порядка длины пробега ионов или атомов), в экранирующей плазме становится равной:

$$V_1 = (V_{\perp}^2 + 1.5p \cdot l/(\rho\Delta))^{1/2}.$$

Отсюда видно, что маленькие капли (маленькие Δ) тормозятся сильнее. Существует минимальный размер зерен, которые могут преодолеть этот слой,

$$\Delta_{\min} = 1.5p \cdot l/(\rho V_0^2).$$

Капли размером $\Delta < \Delta_{\min}$ возвращаются на поверхность. Это объясняет преобладание мелких капель среди возвращенных на поверхность образца и осевших на кремниевый сборник, расположенный рядом с образцом.

Заметим, что скорость капель вольфрама $\sim 10^3 \text{ cm/s}$ примерно на порядок меньше скорости графитовых кусочков, отлетающих в результате хрупкого разрушения. Это приводит к тому, что капли за время импульса отлетают от поверхности всего на расстояние $\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$, где температура экранирующей плазмы невелика и не „сгорают“ за время импульса. Это

объясняет лучшую наблюдаемость вольфрамовых капель по сравнению с графитовыми пылинками, например, в установке МК-200.

Обратим внимание на то, что на некоторых образцах после воздействия импульсов плазмы волн не видно, а капли присутствуют. Это объясняется тем, что за время остывания расплавленного слоя

$$t = (h^2/\chi)[(T_0^2/T_m^2 - 1)]$$

(h — глубина расплавленного слоя, χ — температуропроводность, T_0 — температура поверхности во время импульса, T_m — температура плавления) волны успевают затухнуть. Время затухания

$$\gamma^{-1} = 2 \cdot \nu \cdot \kappa^2 \cong 10^{-4} \text{ s}.$$

Капли, как правило, видны, если расплавленный слой мелкий (h мал).

Заключение

1. Для вольфрама характерна капельная эрозия поверхности при имитации срывов плазмы.

2. Мелкие капли или возвращаются на поверхность или отлетают параллельно поверхности. Крупные капли отлетают ближе к нормали к поверхности.

3. Сорт вольфрама влияет на специфику капельной эрозии. У монокристалла вольфрама отсутствуют мелкие $< 0.125 \mu\text{m}$ капли, характерные для поликристаллических вольфрамов.

4. Экспериментально наблюдаемые длины волн и размеры капель хорошо согласуются с теорией капиллярных волн, возбуждаемых „ветром“ экранирующей плазмы, и модели отрыва гребешков волн этим „ветром“.

5. Воздействие экранирующей плазмы на отлетающие капли существенно влияет на угловое распределение отлета капель и на вероятность их возвращения на поверхность.

Работа Ю.В. Мартыненко и П.Г. Московкина поддержана Советом по грантам Президента РФ и государственной поддержкой ведущих научных школ (грант № 00-15-96526).

Список литературы

- [1] Guseva M.I., Gureev V.M., Martynenko Yu.V. et al. // Morphological Features of Erosion Products for Graphite and Tungsten Targets Exposed by Powerful Plasma Flows. JCT/HT's Task Related Meeting on Materials Effects of Disruptions for Task T438. Troitsk: Institute for Innovations and Fusion Research, 1999.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТЛ, 1954.
- [3] Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1999. № 2. С. 31–34.