

04:06

Исследование вольфрама при циклическом воздействии струи плазменной пушки

© А.В. Воронин¹, В.К. Гусев¹, Е.В. Демина², А.Н. Новохацкий¹,
М.Д. Прусакова²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: voronin.mhd@mail.ioffe.ru

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, Москва
E-mail: elenadyom@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2014 г.

Представлены результаты исследований циклического воздействия струи плазменной пушки, имитирующей нестационарные тепловые нагрузки события Edge Localized Modes на вольфрамовые элементы, разрабатываемые для дивертора реактора ИТЭР. Обнаружены значительные изменения структуры и морфологии поверхностного слоя. После 100-кратного облучения образуется столбчатая или „хребтовая“ структура, перпендикулярная облучаемой поверхности. 1000-кратное облучение радикально изменяет характер топографии. Происходит смена механизма разрушения — утонченные „хребты“ расплавляются с образованием капельных структур. Поверхность становится грубой, формируется рекристаллизованный слой глубиной $\sim 100 \mu\text{m}$. Образуется рыхлый слой под облучаемой поверхностью.

Проблема выбора защитных материалов для элементов конструкций, обращенных к плазме, является одной из наиболее острых при разработке термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы. В настоящее время в качестве основного материала дивертора, способного выдерживать большие тепловые нагрузки, рассматривается вольфрам. Весьма вероятно, что во время переходных процессов типа срывов тока или многократных локальных неустойчивостей Edge Localized Mode (ELM) событий, приводящих к резкому росту тепловых потоков, на поверхности вольфрама будет происходить большое количество циклов плавления и затвердевания, что может способствовать образованию тонкого хрупкого поверхностного слоя из-за эффектов многократной кристаллизации в присутствии дейтерия или водорода.

При дальнейшем взаимодействии с плазмой возможно отслаивание участков подобного слоя, что, в свою очередь, может приводить к срыву тока через плазму. Предполагается, что за время одного разряда в камере реактора поверхностный слой дивертора может переплавляться до 1000 раз. В мировой практике проводятся исследования повреждаемости вольфрама как при облучении в установках типа токамак, так и с помощью других плазменных источников. Однако все существующие установки, как правило, либо создают тепловые нагрузки, недостаточные для процесса плавления вольфрама, либо не могут обеспечить многократное (≥ 1000) его плавление. Данная работа ставит своей задачей восполнить по возможности этот пробел и направлена на экспериментальное изучение циклического воздействия плазмы на вольфрамовые элементы, разрабатываемые для дивертора реактора ИТЭР. Целью работы являлось исследование структуры и морфологии многократно переплавленных (поврежденных) поверхностных слоев после облучения струей плазменной пушки с большой кинетической энергией.

В качестве объектов исследования использовали 2 вида ИТЭР-подобного вольфрама: 1 — JSC POLEMA и 2 — PLANSEE Double Forged. Исследование циклического взаимодействия плазмы с вольфрамом проводилось на стенде плазменной пушки [1]. Параметры плазменной струи в циклическом режиме, обеспечивающие многократное переплавление вольфрама, были следующие: плотность тепловой нагрузки 0.8 MJ/m^2 , длительность импульса $10 \mu\text{s}$ (мощность 100 GW/m^2), плотность плазмы $(0.5-5) \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$, скорость потока $100-200 \text{ km/s}$ [2]. Создаваемая в данной работе тепловая нагрузка от плазменной струи заметно превышала величины, получаемые в современных установках типа токамак.

Для сравнения нестационарных тепловых нагрузок от различных источников используют тепловой фактор воздействия ε [3]. Для ELM-событий в ИТЭР $\varepsilon_{ELM} = 77-123 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$, а плавлению вольфрама соответствует величина $\varepsilon_{meltW} \sim 48 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$. В случае использования плазменной струи пушки $\varepsilon_{gun} \sim 230 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$, что является довольно большой величиной. Поскольку пушка позволяла осуществить в среднем до 200 импульсов в автоматическом режиме в течение одного дня, становится возможным получить за сравнительно короткий срок оценку повреждения материала в процессе облучения, имитирующего работу термоядерного реактора.

Образцы облучали в нескольких режимах: 1) число импульсов до 150; 2) число импульсов 1000. Исследование облученных образцов проводили с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) (LEO 430, Япония). Торцевые шлифы готовили методом механической шлифовки и полировки с последующим слабым травлением в реактиве следующего состава: 1 g NaOH, 3.5 g $K_3Fe(CN)_6$ и 75 ml воды.

Рассмотрим результаты исследования **JSC POLEMA вольфрама**: Как было показано в работах [4,5], малоцикловое воздействие струи плазменной пушки заметно влияет на характер поверхностного слоя вольфрама. Уже после 5 циклов облучения образуется расплавленный слой глубиной от 3 до 6 μm , имеющий волнообразный рельеф, а на расстоянии 20–30 μm от облученной поверхности в структуре на отдельных участках отчетливо наблюдается смещение блоков относительно друг друга по их границам. Как показали дальнейшие исследования, область термического воздействия со следами сдвиговых межзеренных явлений может распространяться на глубину 100–200 μm и более от облучаемой поверхности. Многоцикловое воздействие плазменной струи еще более изменяет характер облученной поверхности (рис. 1). После 150 импульсов наблюдается одинаковая по всей площади резко выраженная ямочно-пиковая волнообразная поверхность (рис. 1, *a*). Характер поверхности свидетельствует о том, что вольфрам находился в расплавленном состоянии. На поверхности видна развитая сеть микротрещин, возникших в результате термических напряжений при охлаждении материала с высокой скоростью. После 1000 импульсов наблюдается формирование капельно-дендритной структуры на относительно плоском плато, которая также пронизана сетью микротрещин (рис. 1, *b*). Глубина поврежденного поверхностного слоя после 100 и 1000 импульсов облучения отчетливо видна на поперечных шлифах облученных образцов, на которых представлена микроструктура поверхностного слоя. В первом случае (рис. 1, *c*) наблюдается дефектная рыхлая ямочно-пиковая структура с амплитудой 60–70 μm . После 1000 импульсов (рис. 1, *d*) ямочно-пиковая структура исчезает, а возникает сглаженный „заваренный“ рельеф перемещенного расплавленного и застывшего металла на глубине до 90 μm . Таким образом, видно, что при многократном увеличении числа циклов произошла смена механизма разрушения облученного вольфрама — утонченные разрыхленные „хребты“ расплавились с

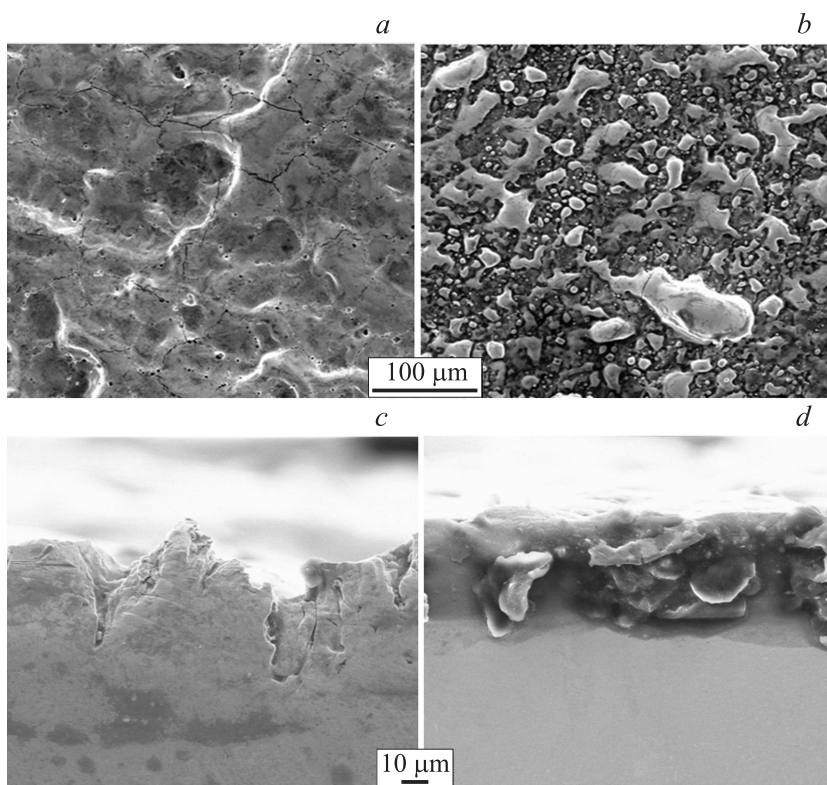


Рис. 1. Микроструктура поверхности и торцевых шлифов JSC POLEMA-вольфрама после 150 и 1000 циклов воздействия плазменной струи.

образованием так называемой заваренной поверхности и расположенных на ней капельных структур, которые, в свою очередь, в процессе облучения под действием плазменного потока могут отрываться от поверхности в расплавленном состоянии и вновь оседать на нее.

В случае исследования **PLANSEE Double Forged** вольфрама структура облученной поверхности образцов после 100 и 1000 импульсов облучения также заметно отличается (рис. 2). В первом случае после

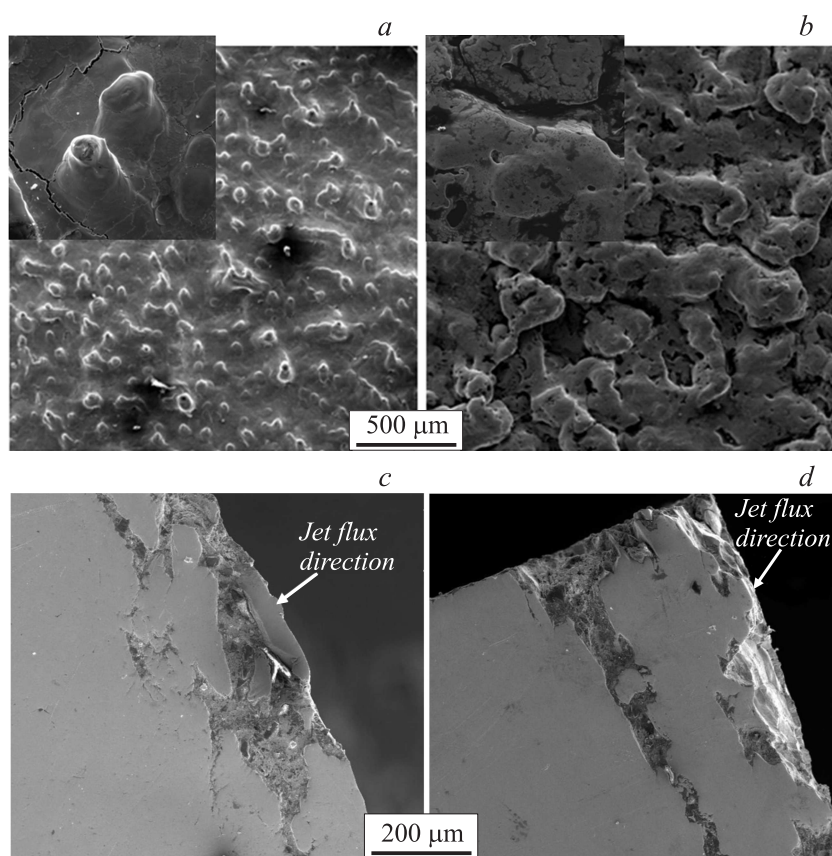


Рис. 2. Микроструктура поверхности (*a, b*) и торцевых шлифов (*b, c*) PLANSEE Double Forged-вольфрама после 100 и 1000 циклов облучения.

серии облучений плазмой образуется поверхность с наличием „катушечных“ структур, расположенных практически перпендикулярно плоскости облучения (рис. 2, *a*). После 1000 циклов воздействия облученная поверхность из-за многократного плавления заметно огрубляется, пространственные элементы структуры становятся шире (рис. 2, *b*). Как и в случае JSC POLEMA вольфрама после воздействия 1000

импульсов структура приобретает вид грубо переплавленного металла. На поперечных шлифах после 100 циклов облучения наблюдаются клиновидные трещины, идущие от облученной поверхности в глубь материала, и образование рыхлого слоя под поверхностью облучения (рис. 2, *c*). Глубина трещин составляет около $30\ \mu\text{m}$, а их местоположение связано, по-видимому, с границами блоков, выходящих на облучаемую поверхность. Наблюдаются сдвиговые полосы, а также области разрыхления материала, свидетельствующие, вероятно, также об ударно-волновом воздействии на материал. Увеличение числа импульсов до 1000 приводит к расширению области повреждения в трещинах и формированию рыхлого слоя вдоль поверхности облучения на глубине $100\text{--}200\ \mu\text{m}$ (рис. 2, *d*). Полученные результаты исследования устойчивости вольфрама к воздействию водородной плазмы, генерируемой пушкой с высокой кинетической энергией, находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в ряде исследований с использованием других плазменных источников, в частности устройств плазменного фокуса при воздействии дейтериевой плазмы [6].

Таким образом, анализ облученных поверхностей вольфрама показал 3 основных механизма деградации материала: плавление поверхностного слоя глубиной несколько μm ; разрушение приповерхностного слоя $15\text{--}250\ \mu\text{m}$; пластическое смещение и динамическая рекристаллизация вещества. Структура JSC POLEMA вольфрама оказалась более устойчивой к разрушению. Значительные изменения поверхностного слоя обнаружены после многократного облучения потоком плазменной струи. Поверхность становится грубой, формируется рекристаллизованный слой глубиной $\sim 100\ \mu\text{m}$. На поперечных шлифах наблюдаются клиновидные трещины, идущие от облученной поверхности в глубь материала, образуется рыхлый слой под поверхностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.619.21.0001, уникальный идентификатор проекта RFMEF161914X0001), а также Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), научно-исследовательские контракты: 16939 и 16960.

Список литературы

- [1] *Voronin A.V.* et al. // *Nukleonika*. 2008. V. 53. P. 103.
- [2] *Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Судьенков Ю.В.* // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. В. 8. С. 36–42.
- [3] *Pitts R.A.* et al. // *J. Nuclear Materials*. 2011. V. 415. S957–S964.
- [4] *Анкудинов А.В., Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Демина Е.В., Прусакова М.Д., Судьенков Ю.В.* // *ЖТФ*. 2014. Т. 84. В. 3. С. 36–43.
- [5] *Воронин А.В., Судьенков Ю.В., Семенов Б.Н., Атрошенко С.А., Наумова Н.С.* // *ЖТФ*. 2014. Т. 84. В. 7. С. 36–43.
- [6] *Shirokova V., Laas T., Ainsaar A.* et al. // *J. Phisica Scripta*. 2014. V. 159. (to be published).