

А.Г. ПОСКАКАЛОВ^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹,
О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва

ИЗМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА И НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

В Международном термоядерном реакторе ИТЭР в качестве обращенных к плазме материалов будут использоваться вольфрам (W) и бериллий (Be). Из вольфрама будет изготовлено защитное покрытие диверторных пластин, а из бериллия — поверхность первой стенки. Наиболее значительные повреждения защитных покрытий ожидается во время переходных плазменных процессов, таких как ЭЛМ-события, тепловая стадия срыва, ослабленный срыв. Тепловые нагрузки на пластины дивертора в токамаке масштаба ИТЭР в стационарной стадии DT-разряда будут достигать ~ 10 МВт/м², приводя к повышению температуры пластин в среднем до 1400 К; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины 0,6 – 3,5 ГВт/м², что будет вызывать периодическое повышение температуры материала до температуры, сопоставимой с температурой плавления материала [1, 2]. Лазерные источники, источники на основе ионных и электронных пучков, а также мощные плазменные ускорители применяются для исследования эрозии обращенных к плазме материалов и испытания защитных покрытий токамака ИТЭР.

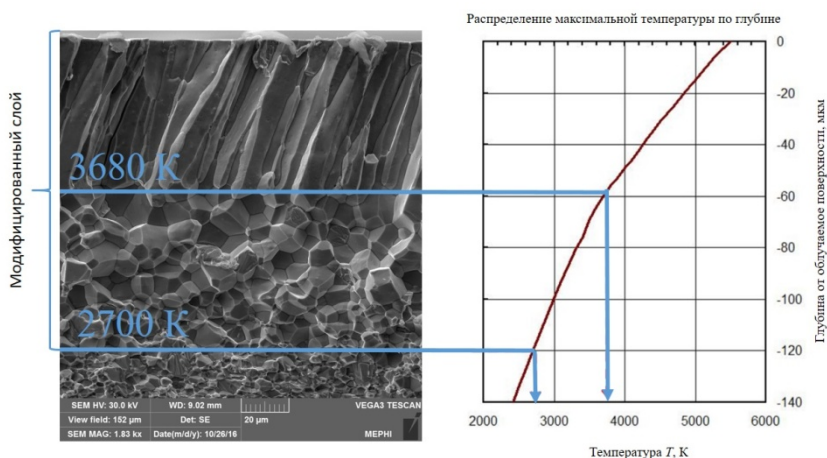
Согласно проведенным ранее исследованиям на плазменном ускорителе КСПУ-Т (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия) [5], и установке на основе электронного пучка JUDITH (Forschungszentrum Jülich, Germany) [6] установлено, что формирование трещин на поверхности вольфрама является основным механизмом разрушения вольфрама при импульсных тепловых нагрузках, лежащих ниже порога плавления его поверхности. При превышении порога плавления существенный вклад в общую эрозию вносят движение расплавленного слоя и выброс капель.

В настоящей работе проводилось облучение вольфрама потоком водородной плазмы длительностью 0,8 мс и тепловой нагрузкой 0,2 – 2,5 МДж/м² (0,3 – 3 ГВт/м²) с целью: (а) исследовать закономерности изменения кристаллической структуры поверхностного слоя вольфрама под действием

плазменного облучения; (б) исследовать закономерности захвата газа приповерхностным слоем вольфрама во время облучения импульсным потоком плазмы.

После плазменного облучения образцы исследовались с использованием электронной микроскопии. Осуществлялось исследование облученной поверхности вольфрама, а также сколов, выполненных поперек облучаемой поверхности. Методами термодесорбционного анализа производилось исследование захваченного вольфрамом во время облучения газа.

В результате исследования поперечных шлифов облученных образцов установлено, что при тепловых нагрузках превышающих порог плавления кристаллическая структура вблизи облучаемой поверхности образца вольфрама претерпевает существенные изменения уже после 1 импульса. Толщина модифицированной области растет с ростом тепловой нагрузки и достигает максимального значения в исследованном диапазоне плотности энергии около 100 мкм (рисунок 1).



Самый верхний слой состоит из одного ряда игольчатых кристаллов, ориентированных перпендикулярно облучаемой поверхности. Толщина

кристаллов $0,4 - 0,6$ мкм, а длина, совпадающая с толщиной слоя, не превышает 4 мкм. Наблюдаемая структура слоя типична для случая быстрой направленной кристаллизации. Этим можно объяснить то, что структура наблюдается непосредственно вблизи поверхности, где скорость кристаллизации достигает максимальных значений.

Второй слой наблюдается всегда, когда есть плавление поверхности вольфрама. Его нижняя (наиболее удаленная от облучаемой поверхности) граница достаточно резкая и совпадает с расчетной границей расплавленного слоя (в момент его максимальной толщины). Слой состоит из столбчатых кристаллов ориентированных перпендикулярно облучаемой поверхности. Характерная длина кристаллов сравнима с толщиной расплавленного слоя, поэтому растет с ростом плотности энергии, и в области максимальной тепловой нагрузки ($2,5 \text{ МДж/м}^2$) достигает значений $50 - 60$ мкм, а ширина варьируется в диапазоне $5 - 20$ мкм.

Третий, самый нижний слой, имеет размытую нижнюю (наиболее удаленную от облучаемой поверхности) границу и представляет собой переходную область от слоя столбчатых кристаллов к неизменной структуре в глубине материала. Этот слой имеет толщину сопоставимую с толщиной предыдущего (расплавленного) слоя и состоит из равноосных кристаллов с характерным размером в диапазоне $5 - 20$ мкм. Размер кристаллов уменьшается как с глубиной, так и с уменьшением тепловой нагрузки. Соответственно можно сделать вывод, что размер кристаллов падает с уменьшением максимальной температуры в области их формирования.

Сопоставление экспериментальных данных с данными численного решения уравнения теплопроводности при параметрах, соответствующих условиям облучения, позволяет установить температурные границы для второго и третьего слоя. Как отмечено выше, нижняя граница второго слоя (слоя столбчатых кристаллов) совпадает с расчетной границей расплава, то есть соответствующей температуре плавления вольфрама, равной 3683 (K) . Третий слой (слой равноосных кристаллов) сверху ограничен, соответственно, температурой плавления, а положение его нижней границы варьируется в диапазоне температур $2600 - 3100 \text{ (K)}$.

Согласно данным термодесорбционного анализа вольфрамовых образцов, облученных водородной плазмой, установлено, что имеет место захват дейтерия в поверхностном слое вольфрама. Для образцов вольфрама, у которых происходило плавление поверхности во время облучения, количество дейтерия, выходящего с единицы поверхности в результате термодесорбции, находится на уровне $(3 - 4) \cdot 10^{16}$ частиц/см², и на порядок

превосходит соответствующие значения, полученное для образцов, на которых следы плавления отсутствовали $\sim 1 \cdot 10^{15}$ частиц/см² (рисунок 2).

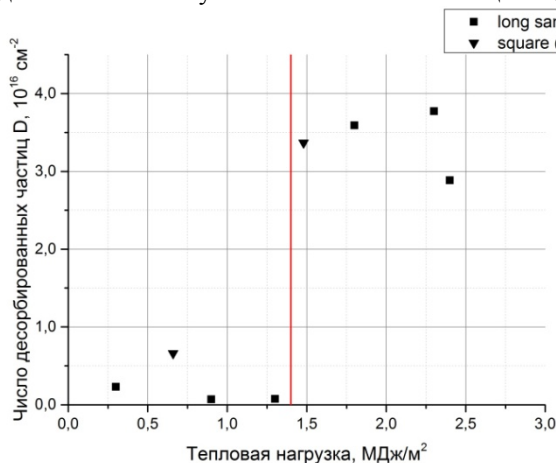


Рисунок 2. Зависимость числа десорбированных частиц с единицы поверхности от тепловой нагрузкой (граница плавления вольфрама при импульсе длительностью 0,8 мс - 1,4 МДж/м²).

Этот факт указывает на существенный рост захвата изотопов водорода вольфрамом при плазменно-тепловых нагрузках превышающих порог его плавления.

Литература:

- [1] Loarte A. et al. Progress on the application of ELM control schemes to ITER scenarios from the non-active phase to DT operation. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 033007.
- [2] Loarte A. et al. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation. — Phys. Scr., 2007, vol. 128, p. 222—228.
- [3] V.P. Budaev et al, Tungsten recrystallization and cracking under ITER-relevant heat loads, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 237–240
- [4] Gerald Pintsuk, Characterization of ITER tungsten qualification mock-ups exposed to high cyclic thermal loads, Fusion Engineering and Design 98–99 (2015) 1384–1388