

А.Г. ПОСКАКАЛОВ^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹,
О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹, М.С. ЗИБРОВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
²Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва
³Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ МОЩНЫХ 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. 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].

В силу кратковременности импульсных событий ранее предполагалось незначительное влияние данных процессов на общее накопление дейтерия в материалах первой стенки. Однако в работах [2,3] установлено, что данное утверждение требует детального изучения. Удалось выяснить, что накопление дейтерия после 10 плазменных импульсов выполненных на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия) выше, чем накопление дейтерия после стационарного плазменного воздействия на образец температурой 600 или 700 К (при аналогичной интегральной дозе облучения), что может указывать на доминирующее влияние событий подобных ЭЛМ на накопление дейтерия по сравнению со стационарным режимом. Кроме того определено, что с ростом числа импульсов накопление дейтерия в вольфраме увеличивается. Исследование поверхностного слоя образцов толщиной 6 мкм методом ядерных реакций показало незначительное содержание дейтерия в данном слое, тогда как основной накопление происходит в глубине образца, что объясняется высоким градиентом температуры у поверхности во время импульсных плазменных событий.

В настоящей работе проводилось облучение вольфрама потоком водородной плазмы длительностью 0,8 мс и тепловой нагрузкой 0,4 –

2,2 МДж/м² (0,5 – 2,8 ГВт/м²) с целью исследовать закономерности захвата газа поверхностным слоем вольфрама во время облучения импульсным потоком плазмы. После плазменного облучения образцы исследовались с использованием электронной микроскопии, методом термодесорбционного анализа, методом ядерных реакций. Так же было выполнено моделирование диффузионных процессов происходящих во время облучения с помощью пакета TMAP7.

На рисунке 1 приведены экспериментальные данные термодесорбционной спектроскопии после одного выстрела с различной тепловой нагрузкой. Можно видеть, что интегральное накопление непрерывно растет с увеличением нагрузки. Для образцов, поверхностный слой которых плавился в ходе облучения, количество захваченного дейтерия находилось на уровне $(2 - 5) \cdot 10^{20}$ D/м², что почти на порядок превосходит соответствующее значение при минимальной нагрузке.

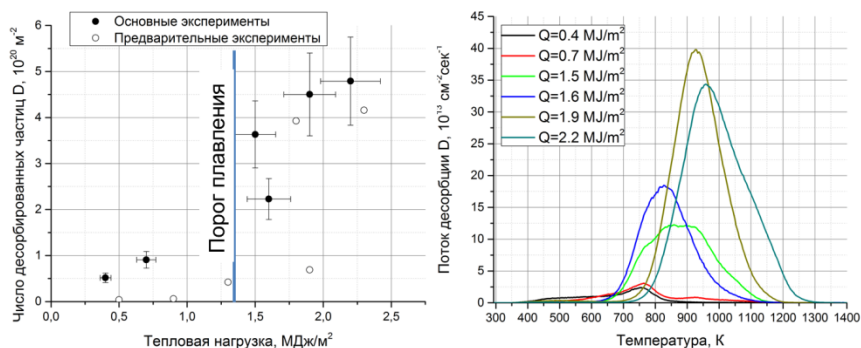


Рисунок 1. Слева - зависимость числа десорбированных частиц с единицы поверхности от тепловой нагрузкой (граница плавления вольфрама при импульсе длительностью 0,8 мс - 1,4 МДж/м²). Справа – спектры термодесорбции дейтерия.

Спектры термодесорбции преимущественно расположены в высокотемпературной области 700-1200 К и постепенно смещаются в область больших температур с увеличением нагрузки. Интересно, что схожие спектры наблюдались при ТДС анализе вольфрамовых пластин, являющихся частью лимитера токамака Т-10 [5].

Для выявления основных механизмов накопления в ходе воздействия импульсных плазменных нагрузок на поверхность вольфрама, было проведено моделирование с помощью расчетной программы TMAP7, которая позволяет моделировать коллективное движение частиц в

твердом теле на базе решения одномерного уравнения диффузии. Хорошее согласие было получено только в предположении неоднородного профиля ловушек, вызванного отжигом дефектов в приповерхностной области при тепловых нагрузках. При этом основное накопление происходит на глубинах в несколько десятков микрометров. На основе сравнения экспериментальных данных и моделирования видно, что основная причина высокого накопления – формирование большого градиента температуры в ходе облучения и наличие в глубине холодной области с большой концентрацией ловушек.

Список литературы

- [1] D.V. Kovalenko, et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions. // (2017) Nuclear Materials and Energy, 12, pp. 156-163.
- [2] А.Г. Посакалов. Изменение структуры приповерхностного слоя вольфрама и накопление дейтерия при импульсных плазменных нагрузках. "ВАНТ. Термоядерный синтез" (Том 41 Выпуск 1 2018 г.).
- [3] O.V. Ogorodnikova, et. al. D and He retention in W with and without He-induced W “fuzz” after irradiation with pulsed high-temperature D-plasma. Journal of nuclear materials.
- [4] ITER Vacuum Handbook.
- [5] А.А. Писарев и др. Анализ вольфрамовых пластин лимитера токамака Т-10 после длительной кампании (данный сборник).