In situ исследование модификации поверхности вольфрама при тепловом ударе мощным пучком электронов на установке BETA

1,2Васильев А.А., 1,2,3Аракчеев А.С., 1,2,3Бурдаков А.В., 1,2Вячеславов Л.Н., 1Кандауров И.В., 1,2Касатов А.А., 1,2Куркучеков В.В., 1,2Попов В.А., 1,2Черепанов Д.Е., 1,2Шошин А.А.

1Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
2Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия  
3Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Вольфрам является одним из наиболее вероятных компонентов первой стенки термоядерных установок благодаря своим хорошим термомеханическим свойствам, устойчивости к высоким нейтронным потокам и низкому накоплению радиоактивного трития. Помимо постоянного потока тепла на поверхность дивертора токамака-реактора ИТЭР можно ожидать быстрые импульсные тепловые нагрузки в результате ЭЛМов первого типа, которые могут приводить к усилению эрозии плазмоприемников. Хотя работы по изучению устойчивости вольфрама к тепловым ударам широко распространены, они, в-основном, сосредоточены на анализе результатов воздействия на образцы после извлечения из экспериментальной камеры и несут опосредованную информацию о процессах модификации материалов. На установке BETA (Beam of Electrons for material Test Applications) применяется in situ подход в исследовании процесса разрушения вольфрама, который в совокупности с классическими post mortem методами дает более полное описание динамики модификации поверхности.

Тепловой удар на образец создается мощным источником пучка электронов с плазменным катодом и мультиапертурной электронно-оптической системой диодного типа. Электроны вытягиваются из плазмы дугового источника, ускоряются до энергии до 120 кэВ и транспортируются в сходящемся магнитном поле до поверхности образца. Полный ток, поглощаемый мишенью может составлять до 40 А, а максимальная длительность импульса может достигать 1 мс. Итоговое тепловое воздействие хорошо описывается нормальным распределением с параметром потока тепла 15 – 300 МДж/м2с0.5 в максимуме и полной шириной на полувысоте 10 – 20 мм в зависимости от рабочего режима. На данной установке используются пассивные и активные диагностики эрозии поверхности облучаемого материала. В течении импульса воздействия происходит регистрация собственного теплового излучения вольфрама при помощи быстрых ПЗС-камер и системы лавинных фотодиодов. Данная диагностика была абсолютно прокалибрована по ленточной вольфрамовой лампе, что позволило получить двумерное распределение температуры на поверхности образца и временную динамику температуры в отдельных участках мишени. С помощью этой методики был обнаружен локальный перегрев поверхности, который может быть вызван отсоединением части материала в результате распространения трещин вдоль облучаемой поверхности. Таким образом, из динамики температуры поверхности после теплового удара можно сделать вывод о наличии внутренних повреждений вольфрама. В другой оптической диагностике применяется подсветка поверхности образца непрерывным лазером, отраженное и рассеянное излучение которого регистрируется с пространственным и временным разрешением. Данная техника позволяет наблюдать модификацию поверхности мишени при относительно низких температурах образца, при которых тепловое свечение мало для детектирования, например, в момент образования сети крупных трещин на вольфраме. Помимо этого, изменение интенсивности отраженного и рассеянного излучения может дать сведения о результатах воздействия теплового удара, которые не влияют напрямую на локальное увеличение температуры: увеличение шероховатости из-за неравномерной пластической деформации зерен или изгибание пластины в результате теплового расширения поверхностного слоя.