РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМОВЫХ ЛИМИТЕРОВ ПРИ МОЩНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

Грашин С.А., 1Архипов И.И., Будаев В.П., 2Гиниятулин Р.Н., Карпов А.В., Ключников Л.А., Крупин В.А., 2Литуновский Н.В., 2Мазуль И.В., 2Маханьков А.Н., Мартыненко Ю.В., Сарычев Д.В., Соломатин Р.Ю., 3Химченко Л.Н.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва,  
 Россия, [Grashin\_SA@nrcki.ru](mailto:Grashin_SA@nrcki.ru2)  
1Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва,  
 Россия, [igor\_arkhipov\_54@mail.ru](mailto:igor_arkhipov_54@mail.ru)  
2Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
 им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург, Россия, [amakh@sintez.niiefa.spb.su](mailto:amakh@sintez.niiefa.spb.su)  
3Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»  
 «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, L.Khimchenko@iterrf.ru

Планируемое использование вольфрама в качестве материала дивертора ИТЭР требует дополнительных исследований для изучения стойкости вольфрама в условиях высоких тепловых нагрузок в плазме токамака.

На токамаке Т-10 в 2015г. вместо графитовых были смонтированы лимитеры из вольфрама. Лимитеры изготовлены в НИИЭФА им. Ефремова из вольфрама марки ВМП «Полема», применяемого при производстве пластин дивертора ИТЭР. Вольфрам «Полема» не содержит каких- либо примесей и обладает высокой теплопроводностью и теплоемкостью. Вольфрам имеет поликристаллическую структуру с характерным размером зерна 30 мкм и пористую поверхность. Наблюдались микротрещины шириной до 2 мкм как на поверхности, так и в глубине образцов. Вольфрамовые лимитеры Т-10 не имеют активного охлаждения.

В ходе экспериментальной кампании вольфрамовые лимитеры Т-10 подверглись воздействию ~1800 рабочих импульсов. Из них ~250 – 300 импульсов оканчивались срывом и развитием пучка ускоренных электронов. В зоне выхода пучка ускоренных электронов (внутренняя и особенно наружная части кольцевого лимитера вблизи экваториальной плоскости токамака) с экстремальными тепловыми нагрузками свыше 1 ГВт/м2  наблюдалось сильное оплавление вольфрамовых элементов, а также сильное растрескивание как расплавленной области, так и прилегающих областей. Вблизи этой зоны наблюдались капли расплавленного вольфрама (диаметром до 3 мм) и перепыленный вольфрам. В других зонах камеры Т-10 следов эродированного вольфрама не обнаружено.

В зоне умеренных нагрузок (остальная часть кольцевого и подвижный лимитеры) — до 2 МВт/м2 следов оплавления нет, но наблюдается заметное растрескивание вольфрамовых элементов. Механизм развития таких трещин не связан с появлением и выходом ускоренных электронов. Одним из возможных механизмов, может быть развитие дуговых процессов на поверхности вольфрама.

Замена углеродных лимитеров на вольфрамовые не привела к значительным изменениям параметров рабочего режима Т-10. Основными примесями по-прежнему являются углерод и кислород. Периферийное излучение, определяемое легкими примесями, изменилось незначительно. Радиационные потери из центра, определяемые вольфрамом сильно выросли, профиль радиационных потерь пикирован. Дана оценка величины концентрации W в плазме Т-10.

Литература

1. R.A. Pitts, S. Carpentier, F. Escourbiac et al. Journal of Nuclear Materials 438 48 (2013).
2. V.P. Budaev, Yu.V. Martynenko, et al. Journal of Nuclear Materials 463 (2015)  237—240.
3. V.P. Budaev, Yu.V. Martynenko, S.A. Grashin et al. “Tungsten melting and erosion under plasma heat load in tokamak discharges with disruptions” Rep. on 22 PSI Conf., Rome 2016, Journal of Nuclear Materials (2016 in press)