РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫЙ ВОЛЬФРАМ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ [[1]](#footnote-1)\*)

Хрипунов Б.И., Койдан В.С., Семенов Е.В., Муравьев С.В., Унежев В.Н., Гуреев В.М., Цветков А.А.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Экспериментально моделируется эффект радиационного повреждения материалов и воздействия на них плазмы в термоядерном реакторе. Основным исследуемым материалом является вольфрам (Plansee, Австрия, и ПОЛЕМА, Россия), как материал, который будет использован в диверторе международного реактора ИТЭР.

С помощью облучения вольфрама тяжелыми ионами высоких энергий МэВ-ного диапазона на циклотроне У-150 моделируется нейтронный эффект и получаются образцы с высоким уровнем радиационных повреждений в поверхностном слое, который прогнозируется для термоядерного реактора (до 100 смещений на атом (сна)) при его длительной непрерывной работе. Экспозиция облученных образцов вольфрама в стационарной дейтериевой и гелиевой плазме проводилась на установке ЛЕНТА, на которой плазменный столб генерируется с помощью электронного пучка (пучково-плазменный разряд) в продольном магнитном поле 0,15 Т. Основные параметры облучения плазмой: энергия плазменных ионов бомбардирующих поверхность 250 эВ, температура образцов 1000ºС, ионный ток на мишень (30-80) мА/см2, полный поток ионов дейтерия (1,7 – 4,1)∙1021 Dion/см2. На облученных образцах изучены изменения микроструктуры поверхности (СЭМ), измерены скорость и коэффициент эрозии материалов.

Выполнено расчетное исследование генерации радиационных повреждений в вольфраме ионами высокой энергии и проведен сравнительный анализ характеристик образования дефектов при облучении материала ионами азота и ионами гелия при равных значениях ионного флюенса 1017 ион/см‑2. Показано, что в поверхностном слое глубиной до 8 мкм средний уровень повреждения составляет <D> = 1,5 сна (Dmax = 10 сна) при использовании ионов азота 30 МэВ и <D> = 0,13 сна (Dmax = 1 сна) при использовании гелия с энергией до   
5 МэВ.

Впервые проведены облучения образцов вольфрама пучком ионов азота N3+ энергией 28 МэВ до 1017 ион/см2. Исследование облученных материалов в плазме показало, что непосредственно облучение быстрыми ионами азота не приводит к видимым изменениям в структуре поверхности. Напротив, после экспозиции повреждённых материалов в дейтериевой плазме обнаруживается существенное изменение микроструктуры. Эффект связан главным образом с изменением кристаллической структуры материала - под воздействием плазмы происходит протравливание поверхности по границам зерен, на поверхности образуются глубокие каверны, также привязанные к этим границам.

Температурный эффект изучался на образцах вольфрама после их облучения ионами гелия Не+ с энергией 4 МэВ до полного флюенса 2,5∙1016 см-2, которое проводилось при температуре 600ºС. Получены образцы с уровнем концентрации дефектов до 0,16 сна в максимуме. Облучения выполнены при температуре материала 600 С. Экспозиция в дейтериевой плазме проводилась при температуре материала около 1000 С. Коэффициенты эрозии вольфрама в D-плазме составили 8,4∙10-3 ат/ион (Plansee) и 6,2∙10-3 ат/ион (ПОЛЕМА). Увеличения скорости эрозии облученных материалов при повышенных температурах не наблюдалось.

Литература

1. Khripunov, B. I.; Koidan, V. S.; Semenov, E. V., **"Thermonuclear Fusion Reactor Plasma-Facing Materials under Conditions of Ion Irradiation and Plasma Flux", Symmetry, 2021, 13.**

1. \*) [DOI – тезисы на английском](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIX/Mu/en/CF-Khripunov_e.docx) [↑](#footnote-ref-1)