

В.С. ЕФИМОВ¹, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, А.А. ПИСАРЕВ¹, Б.И. ХРИПУНОВ²,
В.С. КОЙДАН², А.И. РЯЗАНОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПОСЛЕ ЕГО ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ И ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

В работе представлены результаты исследования накопления дейтерия в вольфраме с высоким уровнем радиационного повреждения после его экспозиции в плазме.

Для моделирования воздействия нейтронов на вольфрам, который предполагается применять в термоядерном реакторе в качестве материала обращенного к плазме, и получения радиационных повреждений были использованы ионы углерода высокой энергии [1-3]. Первичные радиационные дефекты на уровне 2-40 сна получены в вольфраме с помощью ионов C^{3+} ускоренных на циклотроне Курчатовского института до энергии 10 МэВ с накоплением флюенса $(1,5-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Глубина поврежденного слоя при этом составила около 3,5 мкм.

Облученный материал экспонировался в дейтериевой плазме на установке ЛЕНТА, которая при работе в непрерывном режиме обеспечила полный поток плазменных ионов на поверхности $10^{21}-10^{22} \text{ D/см}^2$ при плотности потока $(1,3-2) \cdot 10^{17} \text{ D/см}^2\text{с}$. Экспозиция проводилась в условиях, когда энергия плазменных ионов составляла 250 эВ, что определило режим распыления (эрозии) поверхности вольфрама. Эксперименты проведены для двух значений температуры при облучении быстрыми ионами и плазмой – при комнатной температуре и при 773 К.

Накопление дейтерия после экспозиции образцов в плазме было исследовано методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС). Исследование проводилось на сверхвысоковакуумной установке ТДС-стенд в МИФИ. Установка имеет остаточное давление в камере измерений $< 5 \cdot 10^{-9}$ мбар. Образцы в камеру вводятся через шлюз с независимой откачкой, что позволяет иметь низкий фоновый сигнал при ТДС. Температура образцов измерялась вольфрам-рениевой термопарой. Нагрев образцов проводился линейно со скоростью 2 К/с до температуры 1450 К. Поток газовой выделения измерялся квадрупольным масс-спектрометром. Калибровка сигнала проводилась после каждого эксперимента.

В таблице 1 приведены данные по условиям облучения быстрыми ионами и плазмой для четырех исследованных образцов вольфрама.

Таблица №1. Данные об облучении исследуемых образцов

Номер образца	Флюенс ионов C^{3+} , $см^{-2}$	Концентрация первичных дефектов ср. в слое 3,5 мкм, сна	Температура, К	Доза облучения плазмой, $D/см^2$	Глубина эрозии, мкм
W-100	0	0	Комн. <370	$5,8 \cdot 10^{21}$	2,3
W-31	0	0	773	$1 \cdot 10^{21}$	2,2
W-6	$2 \cdot 10^{17}$	8,4	Комн. <370	$3,0 \cdot 10^{21}$	1,3
W-7P	$1,5 \cdot 10^{17}$	6,3	773	$1,2 \cdot 10^{21}$	0,8

На рисунке 1 представлены термодесорбционные спектры в составе дейтерия для всех четырех образцов. Десорбция из образцов, облученных при комнатной температуре, идет в широком диапазоне температур с 450 до 1400 К. Для облученных плазмой при 773 К десорбция начинается примерно с температуры, соответствующей температуре облучения. Спектры для различных образцов заметно отличаются.

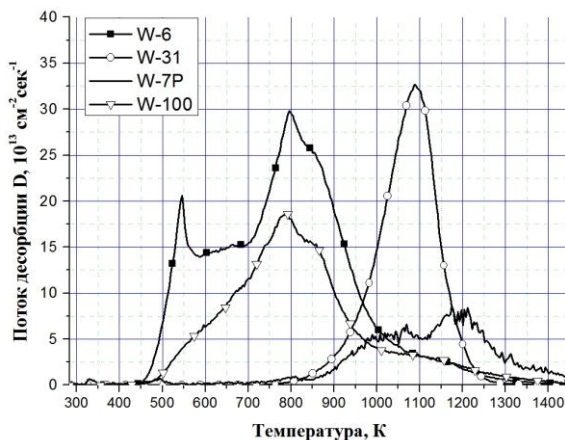


Рис.1. Термодесорбционные спектры дейтерия (D_2) из поврежденных и неповрежденных образцов вольфрама, облученных в дейтериевой плазме (см. таблицу 1)

При облучении при комнатной температуре, максимум термодесорбции наблюдается при температуре 800 К и для предварительно повреж-

денного образца и для не поврежденного. Амплитуда пиков для поврежденного образца несколько выше, наблюдаются также дополнительные пики. В случае облучения при повышенной температуре, спектры сильно отличаются между собой. Спектр неповрежденного образца имеет один ярко выраженный пик с максимумом при 1100 К. Спектр поврежденного образца имеет два максимума при 1050 К и 1200 К.

На рисунке 2 приведены интегральные значения накопления дейтерия в образцах с учетом газовой выделения в различных массах.

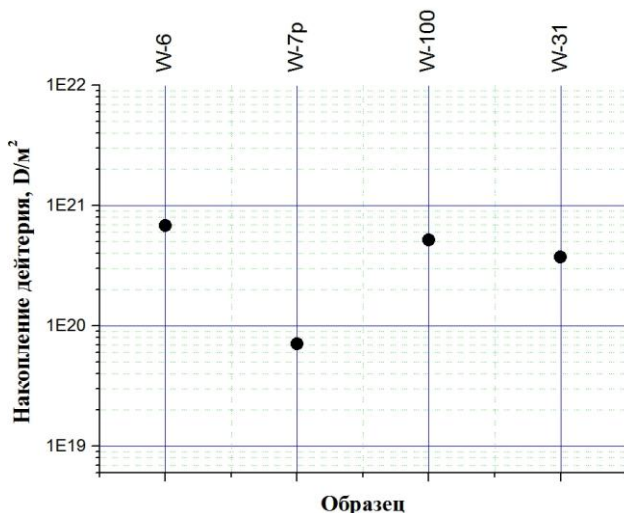


Рис.2. Интегральные значения накопления дейтерия для исследуемых образцов (см. таблицу 1)

Накопление дейтерия при низкой температуре плазменного облучения несколько больше для поврежденного образца, но эта разница не так велика. Это можно объяснить тем, что накопление при низких температурах происходит преимущественно вблизи поверхности. При высоких дозах облучения плазмой накопление вблизи поверхности было достаточно велико и без дополнительных повреждений МэВными частицами, поэтому увеличение в накоплении не так велико.

При повышении температуры часть дефектов перестает удерживать дейтерий, что приводит к уменьшению концентрации дейтерия вблизи поверхности. Однако, увеличивается поток диффузии дейтерия в объем материала. Поэтому для неповрежденного образца W-31, в котором со-

держание производственных дефектов в объеме материала, по всей видимости, велико, наблюдается лишь некоторое снижение накопления дейтерия. В случае поврежденного образца наблюдается резкое снижение накопления дейтерия, что отличается от экспериментов, в которых повреждение создавалось МЭВными ионами вольфрама [4]. Поэтому можно предположить, что в данном случае важную роль играют атомы углерода, оставшиеся вблизи поверхности и образующие диффузионный барьер.

Список литературы:

- [1] [B.I. Khripunov](#), [V.S. Koidan](#), [A.I. Ryazanov](#) et al., Study of Tungsten as a Plasma-facing Material for a Fusion Reactor, [Physics Procedia](#), [Volume 71](#), 2015, Pages 63–67.
- [2] B. Khripunov, V. Gureev, V. Koidan et al., Erosion and deuterium retention in ion-irradiated tungsten under plasma exposure, *Journal of Nuclear Materials*, 463 (2015) 258-262
- [3] V.S. Koidan et al., IAEA FEC-2, 2014, MPT-P7-37, SPb.
- [4] O. Ogorodnikova, K. Sugiyama. *Journal of Nuclear Materials*, 442 (2013) 518-527.