УДК 621.039.531.546.78

РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЁННЫЙ ВОЛЬФРАМ: ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ В ПОТОКЕ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ

*Б.И. Хрипунов, В.С. Койдан, А.И. Рязанов, В.М. Гуреев, С.Н. Корниенко, С.Т. Латушкин, А.М. Муксунов,
Е.В. Семенов, В.Г. Столярова, В.Н. Унежев*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе представлено экспериментальное исследование воздействия дейтериевой плазмы на вольфрам с высоким уровнем радиационного повреждения, изучается вольфрам как кандидатный материал, обращённый к плазме в термоядерном реакторе. Эффект накопления повреждений в материале под действием термоядерных нейтронов моделируется с помощью облучения материала ионами высокой энергии. Первичные радиационные дефекты на уровне 1—100 сна получены в вольфраме с помощью He^{2+} - и C^{3+} -ионов, ускоренных на циклотроне НИЦ «Курчатовский институт» до энергии 3—10 МэВ с накоплением флюенса 10^{17} — 10^{19} см $^{-2}$. Облучённый материал исследован под действием дейтериевой плазмы на плазменной установке ЛЕНТА, работающей в непрерывном режиме, на которой проводятся исследования в потоках плазмы 10^{21} — 10^{22} D/см 2 . Изучены динамика эрозии, развитие микроструктуры и накопление дейтерия в вольфраме. Повышение уровня накопления дейтерия в вольфраме обнаружено на образцах, повреждённых как ионами гелия, так и ионами углерода при комнатной температуре (ERDA). Напротив, снижение эффекта накопления дейтерия показано на образцах повреждённого вольфрама, с которыми работа проводилась при температуре 500 °С.

Ключевые слова: радиационные повреждения, вольфрам, ионы, плазма, дейтерий, эрозия, накопление, термоядерный реактор, гелий, углерод, протоны.

RADIATION-DAMAGED TUNGSTEN: PRODUCTION AND STUDY UNDER STEADY-STATE PLASMA FLUX

*B.I. Khripunov, V.S. Koidan, A.I. Ryazanov, V.M. Gureev, S.N. Kornienko, S.T. Latushkin,
A.M. Muksunov, E.V. Semenov, V.G. Stolyarova, V.N. Unezhev*

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Experimental research of deuterium plasma effect on tungsten at high level of radiation damage is presented in the work. Tungsten is analyzed as a candidate material facing plasma in a fusion reactor. Radiation damage accumulation from DT fusion neutrons is simulated with surrogate irradiations by high energy ions. Primary radiation defects of 1-100 dpa are produced in tungsten with He^{2+} , C^{3+} ions and by protons accelerated to 3—10 MeV on the cyclotron at RRC Kurchatov institute at 10^{17} — 10^{19} ion/cm 2 fluence. The irradiated material was exposed to steady-state deuterium plasma in the linear plasma device LENTA providing plasma flux 10^{21} — 10^{22} D/cm 2 . Erosion dynamics, development of the surface microstructure and deuterium retention have been studied. Increase in deuterium retention has been found in the samples damaged both by helium and carbon ions (ERDA). Otherwise, decrease in D retained quantity was shown on the damaged tungsten samples operated in the experiments at 500 °C.

Key words: radiation damage, tungsten, ions, plasma, deuterium, erosion, retention, fusion reactor, helium, carbon, protons.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-40-49

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вольфрам рассматривается как перспективный материал для покрытия дивертора и, возможно, первой стенки в термоядерном реакторе-токамаке. Предусмотрено использование вольфрамового покрытия в диверторе ИТЭР. В связи с этим наряду с испытаниями материала под воздействием высоких плазменных и тепловых нагрузок необходимо экспериментально изучить его реакцию на нейтронное облучение (DT-реакция, 14 МэВ), вызывающее в нём радиационные повреждения и ядерные реакции с образованием водорода, гелия и других элементов, приводящие к деградации его физических и механических свойств [1, 2]. Радиационное повреждение материала происходит в результате смещения атомов решётки из их положения равновесия и накопления дефектов при длительном облучении в термоядерном реакторе ($\geq 10^{26}$ н/м 2). Возможность синергетического эффекта, связанного с воздействием плазмы и радиационных повреждений на материалы, обращённые к плазме ТЯР, исследована нами на различных материалах. На углеграфитовых материалах было, в частности, показано, что наличие повреждений на уровне 1—10 сна приводит к ускорению их эрозии в стационарной дейтериевой плазме [3, 4]. В настоящее время исследования влияния накопления радиационных дефектов в вольфраме на его стойкость к воздействию плазмы проводятся нами на вольфрамовых материалах [5—7].

Наиболее реальным подходом к решению задачи моделирования воздействия термоядерных нейтронов на материал и получения радиационных повреждений является метод использования нейтронов в реакторах деления и пучков ускоренных ионов высокой энергии (МэВ-ного диапазона), который широко используется исследователями в различных странах [8—13]. В данной работе приводятся некоторые результаты экспериментального исследования, проводимого в последнее время в НИЦ «Курчатовский институт», по получению вольфрама с высоким уровнем радиационного повреждения и изучению его поведения в высоких потоках плазмы. Исследование направлено на установление связи накопленных в вольфраме радиационных повреждений с результатами плазменного воздействия. Диапазон повреждений в полученных образцах материала составил от единиц до ста смещений на атом (сна), что соответствует прогнозам для термоядерного реактора-токамака или источника термоядерных нейтронов. Облучение образцов ускоренными ионами высокой энергии проводилось на ускорителе тяжёлых ионов (циклотроне), воздействие высокопоточной стационарной плазмы на материал изучалось на линейной плазменной установке ЛЕНТА, на которой проведено моделирование диверторной плазмы токамака.

РАДИАЦИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ВОЛЬФРАМА С ПОМОЩЬЮ ИОНОВ: МИКРОСТРУКТУРА, РАСПУХАНИЕ

Применённый метод получения радиационных повреждений, впервые предложенный в [14], состоит в облучении материала заряженными частицами высокой энергии. Протоны и тяжёлые ионы, ускоренные до энергии МэВ-ного диапазона, способны производить в вольфраме радиационные дефекты, накопление которых в течение экспериментально обоснованного времени приводит к достижению уровня повреждений, представляющего интерес для термоядерных исследований.

Нами исследован поликристаллический вольфрам 99,95% вес. (РФ), а также исследуются вольфрамовые материалы, которые предполагается применить в реакторе ИТЭР, — Plansee (Австрия) и ПОЛЕМА (Тула, РФ). Образцы вольфрама облучались различными ионами: ${}^4\text{He}^{2+}$ энергией 3,5—4 МэВ, ионами ${}^{12}\text{C}^{3+}$ энергией 10 МэВ и протонами средней энергией 3,7 МэВ.

При исследовании повреждённого вольфрама в плазме были приняты во внимание следующие факторы. Структура материала повреждается высокоэнергичными ионами в поверхностном слое, толщина которого соответствует пробегу ионов в данном материале. Поэтому распределение концентрации дефектов в данном слое является сильно неоднородным с максимумом на глубине, равным пробегу ионов.

Вариант облучения вольфрама ионами гелия ${}^4\text{He}^{2+}$ при энергии 3,5—4 МэВ исследован нами в связи с тем, что он соответствует α -частицам, получаемым в результате термоядерной реакции ДТ (гелиевая зола). Образцы вольфрама 99,95% вес. облучались в пучке ионов гелия на циклотроне до достижения флюенса (Φ) от 10^{17} до 10^{19} см^{-2} . В данном случае получаются дефекты, расположенные в слое глубиной около 6 мкм, что отвечает длине пробега ионов гелия ${}^4\text{He}^{2+}$ в вольфраме. На рис. 1 показан профиль концентрации первичных радиационных дефектов для $\Phi = 10^{18}$ см^{-2} при энергии ионов гелия 4,2 МэВ, рассчитанный по программе SRIM. Методом реакций ядерной отдачи протонов на циклотроне НИИЯФ МГУ были также проведены измерения концентрации имплантированного гелия в образцах методом обратного ядерного рассеяния протонов, которые показали некоторое отличие измеренных профилей от расчётных. На рис. 2 приведён результат такого измерения, полученный с помощью протонов энергией

Рис. 1. Распределение первичных дефектов и концентрации имплантированных ионов (в ат. %) в вольфраме, облучённом ионами гелия

Рис. 2. Гелий в облучённом вольфраме (${}^4\text{He}^{2+}$, 3,2 МэВ: 1 — $\Phi_1 = 3,2 \cdot 10^{18}$ см^{-2} , 2 — $\Phi_2 = 10^{19}$ см^{-2})

7,4 МэВ для вольфрама, облучённого ионами $^4\text{He}^{2+}$ энергией 3,2 МэВ. Видно, что с учётом некоторой разницы в энергии ионов на приведённом рисунке расчётные данные соответствуют экспериментальным результатам по глубине внедрения гелия. Основное отличие распределений состоит в

Рис. 3. Профиль поверхности облучённого образца вольфрама: облучённая область находится в правой части рисунка, положение ступеньки перехода с необлучённой поверхностью обозначено вертикальными линиями

Рис. 4. Распределение первичных дефектов и концентрация углерода в поверхностном слое вольфрама, облучённого ионами $^{12}\text{C}^{3+}$ (10 МэВ): — W; — C

Рис. 5. Граница облучения на поверхности образца вольфрама: правая часть облучена ионами углерода, левая часть закрыта от облучения. Профиль поверхности показывает скачок на границе

уширении области залегания внедрённых ионов до $\sim 2,5$ мкм (эксп.) по сравнению с $\sim 0,7$ мкм (расчёт), которое может быть связано с изменениями микроструктуры вольфрама при облучении большими дозами ионов. Максимальная концентрация гелия в вольфраме на глубине пробега составила 6—9%.

На облучённых образцах был зарегистрирован эффект распухания материала в результате накопления дефектов. Исследование поверхности с помощью профилометра показало, что на границе облучения поверхность имеет ступеньку, отвечающую превышению облучённой области над необлучённой поверхностью. На рис. 3 показан профиль поверхности вольфрама в области границы облучения (He^{++} , 4 МэВ, $3 \cdot 10^{18}$ $\text{He}/\text{см}^2$), на котором величина ступеньки составляет $\Delta h = 100$ —200 нм при толщине повреждённого слоя 5—6 мкм, что даёт оценку эффекта распухания на уровне 2—3%, максимально зафиксированный уровень распухания достигал 5% [6].

Распухание вольфрама обнаружено также после его облучения ионами углерода $^{12}\text{C}^{3+}$ (10 МэВ). Расчётный профиль образования первичных дефектов в вольфраме и концентрация имплантированного углерода для данного случая показаны на рис. 4.

Результат профилометрирования иллюстрируется на рис. 5, где фотография поверхности облучённого образца, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), показана вместе с профилем поверхности в области границы облучения. Облучённая часть соответствует правой части рисунка и отделяется от закрытой для облучения левой части тёмной полосой, она же имеет превышение над необлучённой частью ~ 200 нм, что в оценке распухания даёт значение 1,5—2%. Данный результат соответствует комнатной температуре материала при облучении. Подобные измерения проведены также с образцами вольфрама, облучёнными до сходных значений ионного флюенса при температуре 600 и 850 °С. Они показали существенно меньшее распухание — на порядок величины, что свидетельствует о существенно меньшем накоплении дефектов в облучённом вольфраме при повышенной температуре.

Микроструктура повреждённого слоя в результате генерации и накопления дефектов при облучении испытывает значительные изменения. Так, облучение ионами гелия при больших значениях флюенса приводит к образованию трещин на поверхности, блистерингу, образованию пор, отслаиванию. Результаты по вольфраму, облучённому ионами гелия (модификация микроструктуры, набухание и т.д.), представлены в работах [5—7], где показано образование пористости в повреждённом слое при Φ ионов гелия $3 \cdot 10^{18}—10^{19} \text{ см}^{-2}$. На рис. 6 показан участок поверхности вольфрама 99,95% вес. после облучения образца ионами гелия дозой $\Phi = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ в области трещины (СЭМ, 30°). В слое толщиной около 6 мкм видны поры, вскрытые при образовании трещины.

Рис. 6. Структура облучённого вольфрама в повреждённом слое (He^{2+} , 10^{18} см^{-2}) (излом, СЭМ, 30°)

Изменение структуры материала происходит также при его облучении ионами углерода. На рис. 7 показан повреждённый поверхностный слой вольфрама, облучённого ионами углерода C^{3+} до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, после того, как в результате бомбардировки в плазме был удалён слой $\sim 1 \text{ мкм}$. Видно, что толщина повреждённого слоя с изменённой структурой соответствует расчётной глубине проникновения ионов углерода $\sim 3,5 \text{ мкм}$.

Накопление значительных повреждений в вольфраме приводит к кластеризации дефектов с образованием пор, дислокационных петель. Структура радиационно-повреждённого вольфрама, облучённого ионами углерода (10 МэВ) при температуре $T = 600^\circ \text{C}$ на глубине порядка 3,5 мкм, показана на рис. 8, на котором показаны снимки с просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) и на котором обнаруживается система межзельных дислокационных петель и вакансионных пор.

Рис. 7. Поперечное сечение образца вольфрама (излом), облучённого ионами углерода (10 МэВ, $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), после эрозии поверхности в результате бомбардировки в плазме на глубину 1 мкм

Рис. 8. Структура радиационно-повреждённого вольфрама (ПЭМ)

РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЁННЫЙ ВОЛЬФРАМ В ПОТОКЕ СТАЦИОНАРНОЙ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ: ЭРОЗИЯ, НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ

Микроструктура, эрозия. Образцы облучённого вольфрама подвергались экспозиции в дейтериевой плазме на установке ЛЕНТА с аксиальным магнитным полем, на которой экспериментально моделируется дивертор и пристеночный слой (SOL) токамака. Экспозиция производилась при следующих параметрах: поток ионов дейтерия на поверхность $j = (0,2—1)10^{18} \text{ D}_{\text{ион}}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, плотность плазмы $N_e = (2—5)10^{12} \text{ см}^{-3}$, температура электронов 6—8 эВ. Полный поток плазмы на поверхность в результате экспозиции менялся в диапазоне $10^{21}—10^{22} \text{ D}/\text{см}^2$ и определялся временем экспозиции. Энергия ионов плазмы на поверхности образца превышала порог распыления вольфрама ионами дейтерия 190 эВ и составляла 250 эВ, что при каждой экспозиции до $\sim 10^{21} \text{ D}/\text{см}^2$ обеспечивало измеримые значения эрозии материала весовым методом. Образец охлаждался так, чтобы его температура не превышала 100 °С во время экспозиций (аналогично тому, как это делалось и при облучении на циклотроне). Поскольку структура материала повреждается высокоэнергичными ионами в поверхностном слое (см. рис. 1, 4), плазменные эксперименты проводились методом последовательной экспозиции в режиме динамической эрозии, что позволило исследовать изменения структуры материала по глубине повреждённого слоя и их связь с уровнем повреждения с учётом сильной неоднородности распределения дефектов. Эрозия материала в результате экспозиции на каждом этапе составляла от 0,5 до 1,5 мкм [7, 15].

Рис. 9. Вольфрам после облучения ионами гелия ($3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, 3,5 МэВ): *а* — поверхность после облучения 2 сна; *б* — после экспозиции в D-плазме ($2,4 \cdot 10^{21} \text{ D}/\text{см}^2$) с эрозией до 3,6 мкм — открыт слой с повреждениями на уровне ~ 5 сна

Поверхность облучённого вольфрама после экспозиции в плазме испытывает изменения в микроструктуре. На рис. 9, *а* показана поверхность облучённого вольфрама (He^{++} , $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, 3,5 МэВ) перед экспозицией в плазме и после неё (рис. 9, *б*) с эрозией на глубину 3,6 мкм. Обработка плазмой выявила ячеистую структуру повреждённого слоя, сформированную в процессе эрозии с выходом гелия из пор, образованных в материале в результате облучения.

Образцы вольфрама после облучения ионами углерода не имеют столь явно выраженных изменений структуры, вызванных плазмой. На рис. 10 в качестве примера показаны фотографии СЭМ-вольфрама, облучённого ионами углерода (10 МэВ), после обработки

Рис. 10. Поверхность вольфрама, облучённого ионами углерода (10 МэВ, $(1,5—2)10^{17} \text{ C}^{3+}/\text{см}^2$), после эрозии в дейтериевой плазме на глубину 1 мкм при разной температуре: *а* — комнатная температура; *б* — 500 °С

плазмой, на которых видно образование характерной волнистой структуры. Эти фотографии отвечают близким значениям величины первичных дефектов (2—3 сна), но разным температурам плазменной обработки — комнатной температуре и 500 °С. Причём разница для этих двух случаев хотя и незначительна, однако вполне заметна.

Приведённые данные получены на образцах вольфрама 99,5% (РФ). Были также выполнены эксперименты с вольфрамом W Plansee, которым предполагается покрыть дивертор реактора ИТЭР. Повреждение образцов материала было получено при их облучении ионами гелия (4,2 МэВ, $1,5 \cdot 10^{18} \text{ He}^{+}/\text{см}^2$) и

протонами ($E_{\text{рр}} = 3,7 \text{ МэВ}$, 10^{18} р/см^2). На рис. 11 показана фотография поверхности образца после его облучения ионами гелия и экспозиции в плазме ($0,8 \cdot 10^{22} \text{ D}_{\text{ион}}/\text{см}^2$ при $E_{\text{ион}} = 250 \text{ эВ}$). Обнаружено, что экспозиция облучённого вольфрама W Plansee в плазме приводит к значительному повреждению структуры по границам зёрен. Следует полагать, что такой характер изменений структуры является важным для проникновения изотопов водорода в материал и их накопления (возрастание диффузии по границам зёрен). Эти наблюдения также свидетельствуют о различиях в результатах воздействия плазмы на вольфрамовые материалы различных марок, свойства которых непосредственно связаны с методом их производства.

Рис. 11. Вольфрам W Plansee, облучённый ионами гелия, после экспозиции в плазме ($E_i = 250 \text{ эВ}$, $F = 2,8 \cdot 10^{21} \text{ D}_{\text{ион}}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, $\Phi = 0,8 \cdot 10^{22} \text{ D}_{\text{ион}}/\text{см}^2$)

С помощью весового метода в плазменных экспериментах определена скорость эрозии облучённого вольфрама. Во всех исследованных случаях она составляла $0,5\text{—}0,8 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$. Полученное значение среднего коэффициента эрозии вольфрама в дейтериевой плазме при энергии 250 эВ в исследованных условиях было на уровне $Y_{\text{D-W}} \cong (2\text{—}4)10^{-3} \text{ ат./ион}$. Явно выраженного влияния степени повреждения материала на скорость эрозии по потере веса в данной работе не обнаружено. Не выявлено также наличие корреляции значений коэффициента эрозии с значениями, характеризующими повреждение при различных исследованных значениях доз как при облучении ионами гелия, так и при облучении ионами углерода.

Накопление дейтерия в материале при больших потоках плазмы. Накопление изотопов водорода в данной работе было исследовано путём определения содержания дейтерия в повреждённом вольфраме на облученных образцах на различных стадиях их эрозии (экспозиции) — от начальной поверхности до исчерпания повреждённого слоя (до глубины пробега быстрых ионов). С помощью метода реакций ядер отдачи $\text{D}(\text{He}^4, \text{D})\text{He}^4$ были получены профили концентрации дейтерия в поверхностном слое (глубина измерения $\sim 150 \text{ нм}$ при энергии пучка He 1,9 МэВ).

Далее приведены результаты по накоплению дейтерия, полученные в последнее время, на образцах, облучённых ионами углерода после экспозиции в дейтериевой плазме. Эксперименты проведены при различной температуре, которая поддерживалась на одинаковых уровнях как при проведении облучения, так и при экспозиции образцов в плазме (комнатная температура и 500°C). Результаты для этих случаев показаны на рис. 12 [16]. Приведены профили концентрации двух вольфрамовых образцов, предварительно облучённых ионами углерода, после экспозиции в D-плазме. Оба распределения имеют максимумы на глубине около 20—30 нм в слое от 10 до 140 нм, но почти десятикратное снижение накопления дейтерия в образце, обработанном при высокой температуре ($8,7 \cdot 10^{16} \text{ D}/\text{см}^2$), по сравнению с образцом, обработанным при комнатной температуре ($0,8 \cdot 10^{16} \text{ D}/\text{см}^2$).

Рис. 12. Накопление дейтерия в вольфраме, предварительно облучённом ионами углерода, после экспозиции в дейтериевой плазме в экспериментах, проведённых при комнатной температуре (RT) (а) и при температуре 500°C (б). В обоих случаях поверхность отвечает уровню 2—3 сна

Возможным оказалось проведение прямого сравнения эффекта накопления дейтерия для случаев облучения гелием и углеродом. На рис. 13 представлены результаты измерения профилей распределения дейтерия (МРЯО) в четырёх образцах вольфрама: два из них прошли облучение ионами гелия, два других — ионами углерода. Уровни повреждения на поверхности на момент измерения во всех образцах были близкими (2—3 сна) в соответствии со стадией эрозии. Дейтерий сконцентрирован в области глубиной до 60 нм и имеет максимумы на глубине 20—40 нм при общем накоплении до $(1,65—1,85) \cdot 10^{16}$ D/cm² во всех четырёх случаях.

Рис. 13. Концентрация дейтерия в повреждённом вольфраме 99,95% после экспозиции в плазме при комнатной температуре: а — ионы углерода 10 МэВ, $2 \cdot 10^{17}$ C³⁺/cm², $1 \cdot 10^{21}$ D/cm² и $2 \cdot 10^{21}$ D/cm², 2 сна на поверхности, 1 — $1,75 \cdot 10^{16}$ D/cm², 2 — $1,65 \cdot 10^{16}$ D/cm²; б — ионы гелия 3—4 МэВ, $3 \cdot 10^{18}$ He⁺/cm², $1 \cdot 10^{21}$ D/cm² и $2 \cdot 10^{21}$ D/cm², 2 сна на поверхности, 3 — $(0,3—1) \cdot 10^{19}$ He/cm², $1,8 \cdot 10^{16}$ D/cm², 4 — $3 \cdot 10^{15}$ He/cm², $1,77 \cdot 10^{16}$ D/cm²; 1, 2, 3, 4 — концентрация дейтерия относится к слою, в котором проведены измерения

Рис. 14. Распределение дейтерия по глубине повреждённого слоя (He, 3—4 МэВ) по измерениям со снятием слоёв в результате эрозии в плазме: 1 — облучённый образец без экспозиции в плазме (фоновое значение); 3 — необлучённый образец, экспонированный в плазме; 2, 4—7 — облучённые образцы, экспонированные в плазме

Рис. 15. Интегральные значения накопления дейтерия при экспозиции в плазме для исследуемых образцов (ТДС): 1, 2 — облучённые образцы; 3, 4 — необлучённые образцы

Значительное повышение количества накопленного дейтерия (на порядок величины) было обнаружено на глубине максимального повреждения в образцах, повреждённых ионами гелия до 15% ат. [15]. На рис. 14 обобщены некоторые результаты измерения концентрации дейтерия на образцах, прошедших облучение ионами гелия (МРЯО), в виде зависимости от глубины эрозии.

Максимальное значение накопления дейтерия $1,7 \cdot 10^{17}$ D/cm² было зафиксировано на глубине пробега быстрых ионов гелия (He²⁺, 4 МэВ), которому соответствует максимальный уровень повреждения около 20 сна.

Накопление дейтерия при экспозиции в плазме было также исследовано методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) [17]. Так, был проведён анализ накопления дейтерия в образцах, облучённых ионами углерода, который показал, что при комнатной температуре концентрация дейтерия в них возрастает до $7 \cdot 10^{16}$ D/cm² по сравнению с $5 \cdot 10^{16}$ D/cm² в необлучённом материале. При температуре облучения 500 °C она существенно меньше и составила $7 \cdot 10^{15}$ D/cm² по сравнению с $4 \cdot 10^{16}$ D/cm² в необлучённом образце (рис. 15).

ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено воздействие плазмы на радиационно-повреждённый вольфрам в условиях динамической эрозии в процессе распыления материала в плазме. Такой метод позволил выявить связь повреждений материала, которые крайне неравномерно распределены в поверхностном слое глубиной 3—6 мкм, со структурой вольфрама и накоплением в нём дейтерия. Приведённые результаты показывают образование различных структур в материале после облучения высокоэнергичными ионами, в качестве которых были использованы ускоренные ионы гелия и углерода, а также протоны.

Исследование показывает, что характер изменений микроструктуры материала, облучённого разными ионами, зависит от сорта быстрых ионов. Так, при больших дозах облучения гелий вызывает не только появление радиационных дефектов из-за смещения атомов, но и способствует растрескиванию материала, блистерингу, образованию пор, отслаиванию. Гелий может накапливаться в порах и полосках микронного размера, наблюдаемых в повреждённом слое, которые могут развиваться при бомбардировке в плазме и оказывать влияние на изменение микроструктуры поверхности с выходом гелия с поверхности в процессе эрозии слоя. В свою очередь, присутствие углерода, внедрённого в структуру вольфрама, при больших дозах облучения (высокой концентрации в повреждённом слое) может приводить к ограничению накопления в нём изотопов водорода из плазмы [17]. Однако, как показал расчёт, концентрация атомов углерода у поверхности при полном потоке быстрых ионов углерода 10^{21} С/м² (10 МэВ) составляет менее 0,01% ат., тогда как на глубине, соответствующей длине пробега ионов углерода, в вольфраме она достигает 3,5% ат. Поэтому предположение о том, что влияние углерода на результаты термодесорбционных измерений в данном случае может быть значительным, представляется обоснованным. Одновременно измерения, проводимые вблизи поверхности (в пологих части распределений концентрации дефектов), где концентрация внедрённой примеси мала, будь то He или C, представляются более близкими к проявлению нейтронного эффекта, связанного с генерацией каскадов и субкаскадов в материале.

Проведено множество измерений скорости эрозии и коэффициента эрозии для облучения как ионами He, так и ионами C. При этом отчётливого влияния на скорость эрозии со стороны повреждений в случае вольфрама обнаружено не было. Этот результат отличается от обнаруженного нами ранее ускорения эрозии радиационно-повреждённых углеграфитовых материалов [3, 4]. Объяснение такого наблюдения может быть отнесено к различию механизмов эрозии вольфрама и углеродных материалов, т.е. между химической эрозией, активированной радиационными повреждениями, в случае углеродных материалов и физическим распылением вольфрама.

Что касается накопления изотопов водорода, то описанные в предыдущем разделе результаты по количеству и распределению дейтерия в повреждённом приповерхностном слое могут иметь не очень значительные отличия и, напротив, как показано, могут быть достаточно близкими для двух методов получения повреждений в вольфраме (He и C) с достижением максимума 6—8% ат. в слое глубиной 60—100 нм. В то же время экстраполяция кривых концентрации накопленного дейтерия в глубь материала показывает, что она не превышает ~2%, что согласуется с результатами исследований других авторов [12]. Значительное влияние температуры материала при облучении привело к снижению накопления дейтерия под воздействием плазмы при повышении температуры до 500 °С. Это может быть связано с повышением рекомбинации образующихся дефектов с температурой при облучении быстрыми ионами. Повреждение вольфрама с помощью ионов углерода при комнатной температуре может вызывать значительное накопление дейтерия из плазмы (до 20%), тогда как эксперименты, проведённые при температуре 500 °С, показали существенно меньшее накопление, которое в то же время было на том же уровне, что и накопление, зафиксированное на материале в отсутствие повреждений [12].

Принимая во внимание особенности оценки эффекта накопления с помощью МРЯО, выраженные в данной работе в малой глубине анализа (доли микрона), следует полагать, тем не менее, что полученный результат имеет значение с точки зрения важности исследований по накоплению трития в вольфрамовой первой стенке. Повышенная концентрация дейтерия, накопленного в тонком приповерхностном слое вольфрама, находит объяснение на основе механики поверхностных напряжений в процессе образования дефектов именно в тонком слое поверхности [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения радиационных повреждений высокого уровня по смещениям на атом в вольфраме были применены пучки ионов высокой энергии, и облучённый материал был изучен под воздействием плазмы. С помощью тяжёлых ионов He^{2+} , C^{3+} и протонов, ускоренных до энергии 3,5—10 МэВ, были получены образцы вольфрама, в которых уровень первичных дефектов покрывал диапазон 1—100 сна в слое толщиной 3,5—6 мкм при полном флюенсе ионов 10^{17} — 10^{19} ион/см².

Наблюдались существенные изменения в структуре повреждённого материала. С помощью анализа линейных размеров образцов отчётливо зафиксирован эффект радиационного набухания материала на уровне 1,5—5%. ПЕМ-микроскопия позволила наблюдать образование системы дислокационных петель и вакансионных пор в вольфраме, повреждённом ионами высокой энергии.

На модельной плазменной установке исследовано поведение повреждённого слоя материала в дейтериевой плазме в режиме эрозии. Проведены измерения скорости эрозии вольфрама, оценка коэффициента эрозии даёт значения $Y_{D-W} \cong (2-4)10^{-3}$ ат./ион для различных вариантов получения повреждений (ионы He и C) и при различных уровнях повреждения поверхности, обращённой к плазме, причём эти значения были близки к значениям для неповреждённого материала. Таким образом, корреляция повреждений и метода их получения с характеристиками эрозии в данных условиях не обнаружена. Напротив, повреждения привели к значительным изменениям микроструктуры при экспозиции повреждённого вольфрама в плазме, например, растрескиванию, блистерингу, образованию пор, отслаиванию (в случае облучения гелием).

Измерения накопления дейтерия, проведённые на вольфраме после экспозиции в дейтериевой плазме методом реакций ядер отдачи, показали, что результат может быть весьма близким при близких значениях повреждения материала от ионов гелия или углерода. Так, получены очень близкие распределения дейтерия в облучённом вольфраме при повреждении на уровне 2—3 сна в облучении гелием и углеродом с максимумом 6—8% в слое до 60 нм. Большое отличие в накоплении дейтерия было обнаружено для вольфрама, облучённого углеродом, в случае, когда эксперименты проводились при различной температуре. Значительное накопление дейтерия показано на образцах, облучённых углеродом при комнатной температуре (максимально 20% ат., $0,9 \cdot 10^{16}$ D/см²), в отличие от результата, полученного при температуре 500 °C, когда накопление было близко к значению, полученному для необлучённого материала.

Развитый в данной работе метод представляется эффективным для исследования материалов с высоким уровнем радиационных повреждений и оценки влияния нейтронного облучения на работоспособность обращённых к плазме материалов ТЯР и накопление в них трития.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 15-08-04409-а.

REFERENCES

1. Sand A.E. et al. — EPL, 2003, vol. 103, p. 46003.
2. Roth J., Schmid K. — Physica Scripta, 2011, vol. T145, p. 014031.
3. Khripunov B.I. et al. — JNM, 2009, vol. 390—391, pp. 921—924.
4. Ryazanov A., Koidan V., Khripunov B. et al. — Fus. Sci. & Technol., 2012, vol. 61, pp. 107—117.
5. Koidan V.S. et al. — IAEA FEC-25, S—Pb, 2014 CD Rep. MPT-P7-37.
6. Khripunov B.I., Brukhanov A.N., Gureev V.M. et al. — JNM, 2011, vol. 415, pp. S649—S652.
7. Khripunov B.I., Gureev V.M., Koidan V.S. et al. — JNM, 2013, vol. 438, pp. S1014—S1018.
8. Mayer M., Markina E., Lindig S., Schwartz-Selinger T. — Physica Scripta, 2011, vol. T159, p. 014045.
9. Miyamoto M., Nishijima D., Ueda Y., Doerner R. et al. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 065035.
10. Wampler W.R., Doerner R.P. — Nuclear Fusion, 2009, vol. 49, p. 115023.
11. Marian J. et al. Recent advances in modeling and simulation of the exposure and response of tungsten to fusion energy condition. — Nuclear Fusion, 2017, vol. 57, p. 092008.
12. Hatano Y., Shimada M., Alimov V.Kh. et al. Trapping of hydrogen isotopes in radiation defects formed in tungsten by neutron and ion irradiation. — JNM, 2013, vol. 428, pp. S114—S119.
13. Shimada M. et al. — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, p. 013008.
14. Flerov G.N. Practical applications of heavy ions beams. — UFN (APhS), 1974, vol. 11, issue 2, pp. 351—372 (in Russian).
15. Khripunov B., Gureev V., Koidan V. et al. — Physica Scripta, 2011, vol. T145, p. 014052.

16. **Khripunov B.I., Koidan V.S., Ryazanov A.I. et al.** Study of tungsten as a plasma-facing material for a fusion reactor. — *Physics Procedia*, 2015, vol. 71, pp. 63—67.
17. **Efimov V.S., Gasparyan Yu.M., Pisarev A.A., Khripunov B.I., Koidan V.S., Ryazanov A.I.** Analysis of deuterium accumulation in tungsten after its irradiation by fast ions and deuterium plasma. — In coll.: *Interaction of plasma with the surface*. NRNU MePhI, 2016, pp. 70—73 (in Russian).
18. **Hu A., Hassanein A.** — *J. Nucl. Mater.*, 2014, vol. 446, pp. 56—62.

AUTHORS

Khripunov B.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Khripunov_BI@nrcki.ru

Koidan V.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Ryazanov A.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Gureev V.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kornienko S.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Latushkin S.T. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Muksunov A.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Semenov E.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Stolyarova V.G. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Unezhev V.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 2 October 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol.40, issue 4, pp. 40—49.