УДК 621.039.531.546.78

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ТЯР В ПОТОКЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ: РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ, МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ЭРОЗИЯ

Б.И. Хрипунов, В.С. Койдан, А.И. Рязанов, В.М. Гуреев, С.Т. Латушкин, Е.В. Семенов, В.Г. Столярова

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В статье представлены результаты комплексного экспериментального исследования воздействия плазмы на материалы термоядерного реактора. На установке ЛЕНТА (НИЦ «Курчатовский институт») моделируется пристеночная плазма реактора-токамака. Стационарный характер действия установки при плотности плазмы 10^{12} — 10^{13} см⁻³ обеспечивает полный поток ионов на поверхности 10^{22} — 10^{23} см⁻², что позволяет исследовать воздействие плазмы на материалы стенки в условиях, отвечающих стационарному режиму реактора. Эффект воздействия нейтронов на материалы первой стенки — радиационное повреждение — моделируется с помощью ускоренных ионов МэВ-ного диапазона, полученных на циклотроне НИЦ «Курчатовский институт». Исследование сосредоточено, главным образом, на изучении вольфрама как кандидатного материала покрытия дивертора реактора-токамака. При облучении материалов на циклотроне (10^{21} — 10^{23} ион/см²) получены образцы с высоким уровнем радиационного повреждения, характерным для длительной работы реактора от 0,1 до 80—100 смещений на атом. Для облучения образцов использовались ионы гелия, углерода, азота и протоны, существенно отличающиеся в механизмах генерации дефектов. В статье приведены данные по эрозии вольфрама, облучённого ионами азота высокой энергии в дейтериевой плазме (скорость эрозии, коэффициент эрозии), набуханию и изменению микроструктуры повреждённого поверхностного слоя (профилометрия, СЭМ). В дейтериевой плазме исследовано поведение карбида кремния SiC, облучённого протонами, установлены изменения его микроструктуры.

Ключевые слова: термоядерный реактор, дейтериевая плазма, ионы высокой энергии, радиационные повреждения, эрозия, микроструктура, вольфрам.

IMPACT OF DEUTERIUM PLASMA FLUX ON FUSION REACTOR MATERIALS: RADIATION DAMAGE, SURFACE MODIFICATION, EROSION

B.I. Khripunov, V.S. Koidan, A.I. Ryazanov, V.M. Gureev, S.T. Latushkin, E.V. Semenov, V.G. Stolyarova

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Results of the complex experimental research of plasma impact on a fusion reactor materials are presented. The near-wall plasma of tokamak reactor is simulated on the linear plasma device LENTA (NRC «Kurchatov Institute»). Plasma fluence of 10^{22} — 10^{23} cm⁻² to material surface is provided at 10^{12} — 10^{13} cm⁻³ of plasma density in steady-state operation of the device thus simulating the continuous regime of the fusion reactor plasma-wall conditions. The neutron effect on the first wall material (radiation damage) is also simulated by surrogate irradiation with high-energy ions accelerated on cyclotron to MeV-range energies. The work is centered mainly on tungsten being a candidate for coating of the divertor region in tokamak-reactor. Samples having got irradiated to a high damage level from 0.1 to 80—100 displacements per atom characteristic of a durable operation of the reactor have been produced on the NRC «Kurchatov Institute» cyclotron at 10^{21} — 10^{23} ion/cm². Helium, carbon, nitrogen ions and protons whose defect generation mechanisms are very different were used in irradiations. Erosion data (erosion rate, erosion yield), swelling characteristics (profilometry) and microstructure changes (SEM) of the damaged surface layer are given for tungsten pre-irradiated with nitrogen fast ions. Proton-irradiated silicon carbide SiC has been also studied in deuterium plasma, and changes in microstructure were found.

Key words: fusion reactor, deuterium plasma, high-energy ions, radiation damages, erosion, microstructure, tungsten.

DOI:10.21517/0202-3822-2020-43-1-46-54

ВВЕДЕНИЕ

Выбор материалов, обращённых к плазме в камере термоядерной системы (реактора-токамака, термоядерного источника нейтронов), в настоящее время выходит в ряд наиболее острых проблем. Мощные тепловые и плазменные нагрузки достигают пределов устойчивости твёрдых материалов под их воздействием. Длительная работа реактора-токамака, основанного на реакции синтеза DT, приведёт к накоплению значительного флюенса нейтронов ($\geq 10^{26}$ н/м²), вызывающих в конструкционных материалах накопление радиационных повреждений и соответственно деградацию их физических и механических свойств. Ввиду отсутствия в настоящее время источника термоядерных (14 МэВ) нейтронов высокой интенсивности экспериментальное исследование нейтронного эффекта на материалах ТЯР проводится с помощью его моделирования нейтронами на реакторах деления, а также с помощью ускорителей тяжёлых ионов. Достижение высоких уровней радиационного повреждения в потоке нейтронов на реакторах деления представляется затруднительным, поскольку требует значительного времени работы реактора. Однако облучение материалов тяжёлыми ионами на ускорителях даёт возможность получать

материалы с высоким уровнем радиационных повреждений за существенно более короткое время облучения. Крайне востребовано экспериментальное и расчётное моделирование, включающее получение и исследование радиационно-повреждённых материалов, в которых накопление дефектов отвечает прогнозам для будущих термоядерных реакторов (ИТЭР, ДЕМО). При бомбардировке быстрыми ионами МэВ-ного диапазона в поверхностном слое материала на глубинах порядка длины пробега иона в результате развития каскадов и субкаскадов генерируются процессы смещения атомов материала из положения равновесия с образованием дефектов структуры. В материале появляются и накапливаются вакансии, межузельные атомы, образуются вакансионные кластеры, дислокации, петли, поры. Корреляционным параметром при анализе развития дефектной структуры выступает количество смещений на атом (сна, dpa), отражающее степень повреждённости материала.

Обширные исследования посвящены изучению вольфрама как материала покрытия стенки (дивертора), причём материал в состоянии радиационного повреждения получают в облучениях различными видами ионов на ускорителях [1—10]. В этих работах применяются различные типы ионов газов и металлов: H (протоны), He, Ar, Fe, Cu, W и др., для которых характерны различные скорости генерации первичных дефектов и накопления повреждений. Работы ориентированы, в основном, на анализ накопления изотопов водорода в облучённых материалах, поскольку особое место в проблемах ТЯР занимает накопление трития [11].

На установках НИЦ «Курчатовский институт» проводится комплексное экспериментальное исследование воздействия ускоренных ионов и высоких потоков плазмы на материалы термоядерного реактора. Облучение тяжёлыми ионами МэВ-ного диапазона проводится на циклотроне НИЦ «Курчатовский институт». В результате облучения при достижении ионного флюенса 10^{17} — 10^{19} ион/см² получают образцы с высоким уровнем радиационных повреждений в поверхностном слое, который отвечает прогнозам для термоядерных реакторов и термоядерных источников нейтронов. Так, экспериментально получены материалы, уровень первичных дефектов в которых находится в диапазоне от 0,1 до 80—100 сна. Для облучения образцов на циклотроне использовались ионы гелия, углерода, азота и протоны, которые существенно отличаются в механизмах образования и генерации радиационных точечных дефектов в материале [12—19].

Нами накоплен значительный опыт получения радиационных повреждений с помощью ускоренных ионов в различных материалах (графиты, вольфрам, карбид кремния). В настоящее время исследование сосредоточено, главным образом, на изучении вольфрама как возможного материала покрытия стенки реактора-токамака, который будет использован в диверторе международного реактора ИТЭР (производства фирмы Plansee, Австрия, и ПОЛЕМА, Россия).

Облучённые на циклотроне материалы изучаются в потоке стационарной плазмы на плазменной установке ЛЕНТА. Поток плазмы создаётся в пучково-плазменном разряде в аксиальном магнитном поле, где реализуются схема дивертора реактора-токамака и условия пристеночной плазмы. Непрерывный характер действия «симулятора дивертора» (divertor simulator) обеспечивает высокие потоки на поверхность образцов исследуемых материалов. На образцы подаётся поток дейтериевой плазмы 10^{21} — 10^{23} см⁻², что соответствует стационарному режиму реактора. Изучались возможность синергии радиационного и плазменного воздействия на материалы и её проявления через эффекты эрозии облучённого материала в плазме, накопления дейтерия в нём, изменения микроструктуры поверхностного слоя [13]. Изучалось также влияние температуры материала на реакцию поверхности облучённого материала в плазме. Проведены эксперименты при температуре поверхности материала 600—1100 °C [16—17].

В статье впервые приводятся результаты исследования, выполненного с использованием ионов азота (N^{+3}), для облучения вольфрама. Получены данные по эрозии облучённых и необлучённых материалов в плазме (скорость, коэффициент эрозии), по исследованию набухания и изменения микроструктуры повреждённого поверхностного слоя.

В последнее время проведены также эксперименты с карбидом кремния SiC, который рассматривается как перспективный малоактивируемый конструкционный материал. Образцы карбида кремния облучены в пучке ускоренных протонов. Наблюдались изменения микроструктуры облучённого материала под воздействием дейтериевой плазмы.

ВОЛЬФРАМ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Результаты проведённых ранее экспериментальных исследований вольфрама, облучённого протонами, ионами гелия (3—4 МэВ) и углерода (10 МэВ), представлены в работах [12—19]. В данной работе предложен

метод получения радиационных повреждений с помощью ионов азота N^{+3} и проведён анализ режимов облучения и возможности получения уровней повреждения, сопоставимых с результатами, полученными ранее. В результате теоретического и расчётного анализа генерации радиационных дефектов с помощью ионов высоких энергий разработана методика облучения образцов вольфрама ускоренными ионами азота на циклотроне НИЦ «Курчатовский институт» для получения радиационных повреждений высокого уровня 1—10 сна.

Результаты расчётов генерации радиационных дефектов в вольфраме различными ионами по программе SRIM иллюстрируются на рис. 1—3, на которых показаны концентрации первичных радиационных дефектов в поверхностном слое вольфрама на глубине пробега ионов для различных случаев облучения. При моделировании радиационных повреждений в вольфраме значение пороговой энергии образования дефектов было принято равным 60 эВ [20, 21]. Рис. 1 соответствует облучению вольфрама ионами гелия энергией 4,2 МэВ при достижении флюенса ионов 10^{18} ион/см². На рис. 2 показаны соответствующие данные для облучения материала ионами углерода энергией 30 МэВ. Наконец, выбор параметров облучения для ионов азота был сделан в пользу данных, показанных на рис. 3: ионы N^{3+} , энергия $E_i = 30$ МэВ, ионный флюенс $\Phi = 10^{17}$ ион/см². Такой выбор позволяет проводить сравнение экспериментальных данных для радиационно-повреждённого вольфрама, полученных ранее на образцах, облучённых ионами гелия и углерода, с теми данными, которые предполагается получить на образцах при облучении ионами азота в условиях весьма близких значений к средним значениям концентрации первичных радиационных дефектов в повреждённом слое (см. рис. 2, 3, где эти значения составили $\langle D_C \rangle = 0,93$ сна и $\langle D_N \rangle = 1,49$ сна).

Рис. 1. Распределение первичных радиационных дефектов и концентрации имплантированных атомов гелия в поверхностном слое вольфрама при облучении ионами гелия энергией 4,2 МэВ, флюенс ионов 10^{18} ион/см², $\langle D \rangle = 1,48$ сна

Рис. 2. Распределение концентрации первичных дефектов в вольфраме при облучении ионами углерода энергией 30 МэВ, флюенс ионов 10^{17} ион/см², $\langle D \rangle = 0,93$ сна

Мишенный узел, использованный для выполнения облучений ускоренными ионами азота на циклотроне, позволяет измерять полный ток быстрых частиц в ходе облучения (рис. 4) и осуществлять прину-

Рис. 3. Распределение концентрации первичных радиационных дефектов в вольфраме D_W (—) при облучении ионами азота N^{3+} до дозы 10^{17} ион/см² и концентрация имплантированных ионов азота C_N (—), $E = 30$ МэВ, флюенс ионов 10^{17} ион/см², $\langle D \rangle = 1,49$ сна

Рис. 4. Мишенный узел для облучения образцов W на циклотроне НИЦ «Курчатовский институт»

длительное охлаждение мишени. Облучение образцов вольфрама на циклотроне было проведено в режиме, оптимизированном по току пучка быстрых ионов N^{3+} энергией 28 МэВ до достижения ионного флюенса на поверхности образцов 10^{17} ион/см².

Подготовка образцов для исследования включала их механическую полировку и отжиг при температуре 1000 °С в течение 1 ч. На рис. 5 показаны два образца вольфрама Plansee, изготовленных в виде диска $D = 1$ см, $h = 2$ мм, после облучения на ускорителе. Тёмные области соответствуют облучённой части поверхности, светлые области находились под маской.

Исследование микроструктуры поверхности образцов после облучения ионами азота показало, что видимых изменений поверхности после облучения не наблюдается. На рис. 6 показаны фотографии поверхности образца вольфрама Plansee в исходном состоянии и после облучения ионами азота.

Рис. 5. Образцы вольфрама Plansee после облучения на циклотроне ионами азота N^{3+} энергией 28 МэВ, $10^{17} N^{3+}/\text{см}^2$

Рис. 6. Поверхность вольфрама Plansee до (а) и после (б) облучения ионами азота (28 МэВ, 10^{17} ион/см²)

На облучённых образцах выполнен также экспериментальный анализ радиационного распухания облучённого вольфрама методом профилирования поверхности облучённого материала, который позволил выявить значительный эффект распухания материала в результате накопления в нём радиационных повреждений в слое толщиной до 8 мкм (как это следует из расчёта, показанного на рис. 3). Пример профилометрической кривой поверхности образца Plansee на границе области облучения показан на рис. 7. Кривая представляет собой профиль поверхности (границная область выделена на рисунке двумя вертикальными линиями) и имеет скачок, показывающий превышение облучённой части вольфрама (находится справа на рисунке) над необлучённой частью (левая часть кривой).

В результате измерений величины превышения по профилю поверхности облучённых образцов получено, что ступенька (величина радиационного распухания) на образцах Plansee составляет от 600 до 1800 Å. Поэтому с учётом глубины повреждённого слоя оценка величины радиационного распухания материала даёт значения от 1 до 2,5%. Аналогичные измерения выполнены на облучённых образцах вольфрама фирмы

Рис. 7. Профиль поверхности вольфрама Plansee: облучённая поверхность находится справа (ионы N^{3+} , 28 МэВ, $10^{17} N^{3+}/\text{см}^2$), левая часть кривой соответствует необлучённой (замаскированной) поверхности

«ПОЛЕМА» (Россия) (N^{3+} , 28 МэВ, 10^{17} ион/см²). В этом случае при переходе на облучённую область поверхности величина скачка составила 2200—2350 Å, что соответствует величине распухания данного материала 2,7—2,9%.

ОБЛУЧЁННЫЙ ВОЛЬФРАМ В ПЛАЗМЕ

Экспозиция образцов вольфрама в плазме проводилась на установке ЛЕНТА, представляющей собой генератор стационарной плазмы, образующейся в продольном магнитном поле 0,2 Тл с помощью пучка ускоренных электронов [11]. Главное внимание было уделено определению скорости эрозии и коэффициента эрозии исследуемых материалов под воздействием ионной бомбардировки в плазме дейтерия, а также изменению микроструктуры поверхности. В стационарном плазменном потоке экспонировались как материалы, облучённые ионами азота (радиационно-повреждённые), так и необлучённые образцы.

В разрядной зоне установки при давлении дейтерия $P = (2,5—4)10^{-4}$ мм рт. ст. вдоль магнитного поля на оси камеры образовывался плазменный шнур $\varnothing = 2$ см с параметрами $N_e = (2—3)10^{12}$ см⁻³, $T_e = 2—5$ эВ. Энергия электронов пучка в данной серии экспериментов составляла 4 кэВ, ток ускоренных электронов был равен 1,3 А. Образцы располагались сбоку от плазменного шнура, вводились в плазму и облучались в течение времени, необходимого для получения высоких значений ионного (плазменного) флюенса. Энергия плазменных ионов, падающих на поверхность испытуемого образца, определялась отрицательным потенциалом смещения, который в данной серии экспериментов поддерживался на уровне $U_{см} = 250$ В, обеспечивая ионам плазмы энергию около ~250 эВ, что соответствует характерной энергии ионов в пристеночном слое реактора-токамака (200—300 эВ). Плотность потока ионов на поверхность достигала $j = 2 \cdot 10^{17}$ D/см²·с. Температура образцов в ходе экспериментов регистрировалась термопарой и находилась в диапазоне $T = 50—80$ °С.

Совокупность параметров облучения образцов в дейтериевой плазме (ток на мишень, потенциал смещения, плазменный (ионный) флюенс), а также полученные по результатам измерений характеристики эрозии (убыль веса образцов, скорость и глубина эрозии, коэффициент эрозии) приведены в таблице для двух образцов вольфрама ПОЛЕМА и двух образцов вольфрама Plansee.

Характеристики облучения образцов вольфрама в дейтериевой плазме и полученные параметры эрозии материалов

Номер образца	Скорость эрозии G , мг/(см ² ·ч)	Убыль веса ΔP , мг	Глубина эрозии Δ , мкм	Ток на мишень I_{sample} , мА/см ²	$U_{см}$, В	Коэффициент эрозии Y_w , ат./ион	Ионный флюенс Φ_D , см ⁻²
ПОЛЕМА № 1	0,905	4,14	2,68	32,72	–250	$4,18 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{21}$
ПОЛЕМА № 2	0,883	4,04	2,62			$4,08 \cdot 10^{-3}$	
Plansee № 5	0,853	3,31	3,82	30,29	–250	$4,26 \cdot 10^{-3}$	$3,62 \cdot 10^{21}$
Plansee № 7	0,946	3,67	3,75			$4,72 \cdot 10^{-3}$	

Полученные значения коэффициента эрозии составили $(4,1—4,7)10^{17}$ ат./ион и не сильно отличаются для этих двух материалов. Похожие значения коэффициента эрозии получены нами также и на образцах, не проходивших предварительное облучение быстрыми ионами, что с учётом пределов точности эксперимента не позволяет выявить связь величины коэффициента эрозии с дефектной структурой поверхностного слоя материала.

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) проведён анализ поверхности испытуемых материалов на всех этапах экспериментов: после облучения быстрыми ионами (см. рис. 6, б) и после обработки образцов в плазме. Показано, что облучение быстрыми ионами азота не приводит к появлению видимых изменений в структуре поверхности. Напротив, после экспозиции повреждённых материалов в дейтериевой плазме и эрозии части повреждённого слоя (до 3 мкм, см. таблицу) обнаруживается существенное изменение микроструктуры поверхности. Этот эффект связан, главным образом, с изменениями в структуре материала, которые отражаются в его эрозионной способности. Под воздействием плазмы происходит протравливание поверхности по границам зёрен, на облучённой поверхности об-

разуются глубокие каверны, также привязанные к этим границам. На рис. 8 показана поверхность образца вольфрама Plansee, на котором эти особенности рельефа отчётливо видны.

Рис. 8. Поверхность радиационно-повреждённого вольфрама Plansee после экспозиции в дейтериевой плазме до $\Phi_{D_i} = 3,6 \cdot 10^{21} \text{ D}_i/\text{см}^2$ ($E_{D_i} = 250 \text{ эВ}$): а — $\times 3000$; б — $\times 6000$

ОБЛУЧЁННЫЙ КАРБИД КРЕМНИЯ В ПЛАЗМЕ

Для исследования воздействия быстрых ионов и плазмы на карбид кремния SiC эксперименты выполнены также на циклотроне и на установке ЛЕНТА. Радиационное повреждение образцов материала

Рис. 9. Профиль радиационных повреждений в образце карбида кремния от протонов со средней энергией 30 МэВ при облучении до дозы 10^{17} см^{-2} , $\langle D \rangle = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ сна}$

проведено с помощью ускоренных протонов по схеме, в которой после ускорения до 32 МэВ протоны проходили через алюминиевую фольгу и слой воды, в которых они теряли энергию около 2 МэВ. Толщина образцов SiC была равна 1,5 мм. На рис. 9 представлен профиль радиационных повреждений в карбиде кремния, рассчитанный для флюенса $\Phi_p = 10^{17} \text{ протон}/\text{см}^2$. Пороговые энергии образования радиационных дефектов равны 35 и 20 эВ для ионов кремния и углерода соответственно. Расчёт показывает, что в этом случае глубина пробега составляет 3,4 мм, поэтому образец SiC имеет повреждения по всей своей толщине (1,5 мм) на уровне $(1\text{—}1,4)10^{-4} \text{ сна}$.

Облучённые образцы карбида кремния SiC были подвергнуты экспозиции в дейтериевой плазме. Обработку в плазме прошли два необлучённых образца и два образца, облучённых протонами (30 МэВ, 10^{17} см^{-2}). Условия плазменного эксперимента были следующие: дейтериевая плазма, энергия ионов плазмы на поверхности образца 100 эВ, плотность потока ионов на мишень $1,2 \cdot 10^{17} \text{ ион}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, полный флюенс ионов дейтерия $0,4 \cdot 10^{21} \text{ ион}/\text{см}^2$, температура поверхности менее 100 °C, длительность экспозиции 1 ч.

Весовым методом определена глубина эрозии материала, которая составила 0,6—2 мкм, а коэффициент эрозии составил $(1\text{—}2)10^{-2} \text{ SiC}/\text{ион}$, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными по распылению углерода и кремния ионами дейтерия.

Результаты воздействия быстрых ионов и плазмы на поверхность материала были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии. Вид поверхности образцов карбида кремния,

предварительно облучённого быстрыми протонами (а) и необлучённого (б), показан на рис. 10. Для сравнения на рис. 11 показана поверхность образца карбида кремния в исходном состоянии.

Рис. 10. Поверхность образцов карбида кремния после экспозиции в дейтериевой плазме ($F_i = 0,4 \cdot 10^{21} \text{ D}_i/\text{см}^2$, $E_i = 100 \text{ эВ}$): а — облучённый материал; б — необлучённый материал

Рис. 11. Поверхность карбида кремния в исходном состоянии

Видно, что образование дефектов при облучении материала быстрыми ионами вызывает существенные изменения структуры поверхности материала, которые при воздействии плазмы в режиме эрозии проявляются выходом на поверхность значительного числа чешуйчатых элементов, что может приводить к ускорению эрозии. Процесс эрозии идёт на фоне образования мозаичной структуры, которая отчётливо проявляется на поверхности необлучённого образца (см. рис. 10, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования влияния нейтронного фактора на конструкционные материалы термоядерного реактора в настоящее время исчерпываются теми возможностями, которые могут предоставить существующие источники нейтронов и ионов высокой энергии. Для получения материалов с высоким уровнем радиационного повреждения, характерного для длительной работы термоядерного реактора, разработан и применён экспериментальный метод, основанный на использовании ионов высоких энергий, позволяющий получать образцы с первичными повреждениями на уровне, прогнозируемом для реакторов ИТЭР, ДЕМО.

Настоящее исследование посвящено, главным образом, изучению вольфрама с высоким уровнем радиационных повреждений, созданных с помощью ионов высоких энергий. Расчёты генерации первичных радиационных дефектов, проведённые с использованием существующих теоретических методов анализа, обосновывают экспериментальные режимы облучения вольфрама различными ионами (азота, гелия, углерода), выявлены особенности накопления радиационных дефектов высокого уровня и атомов газа в материале, связанных с таким выбором. Профили радиационных повреждений в облучаемом материале характеризуют уровень повреждения поверхностного слоя вольфрама и его толщину.

Приведены результаты использования ионов углерода N^{3+} энергией 28 МэВ для получения повреждений в вольфраме в дополнение к ранее проведённым исследованиям с облучением ионами гелия He^{2+} (3,5—5 МэВ) и углерода (10 МэВ). Ионами азота облучены образцы вольфрамовых материалов производства ПОЛЕМА и Plansee, в них получены радиационные повреждения до 10 сна на глубину 8 мкм.

Обнаружено радиационное распухание вольфрама после облучения быстрыми ионами азота, свидетельствующее о значительном накоплении повреждений в материале. Получена оценка величины радиационного распухания на уровне до 2,5% (Plansee) и до 2,9% (ПОЛЕМА).

Изучено поведение вольфрамовых материалов в потоке дейтериевой плазмы. Выполнены эксперименты по экспозиции образцов в плазме с достижением полного потока плазменных ионов на поверхности $0,4 \cdot 10^{22} \text{ ион}/\text{см}^2$ при энергии ионов дейтерия 250 эВ, что соответствует условиям пристеночного слоя реактора-токамака. Экспозиция облучённого материала в дейтериевой плазме приводит к эрозии повреждённого слоя и изменению его микроструктуры. Глубина эрозии составила 3—4 мкм. Определены скорости и коэффициенты эрозии исследуемых материалов в условиях данной серии экспериментов. Оценка коэффициента эрозии вольфрама даёт значения $Y_{D-W} \cong (2-4)10^{-3} \text{ ат./ион}$. В рамках нашего метода полученный результат не имеет отличия в сравнении с другими вариантами получения повреждений

(He-, C-, N-ионы). Корреляция повреждений на уровне единиц смещений на атом, прогнозируемом для ИТЭР, и метода их получения с характеристиками эрозии в данных условиях не обнаружена.

Выявлены изменения структуры поверхности облучённого материала. Под воздействием плазмы происходит протравливание поверхности по границам зёрен, на облучённой поверхности образуются глубокие каверны, также привязанные к этим границам.

Исследована структура поверхности карбида кремния SiC, предварительно облучённого протонами энергией 30 МэВ. Показано сильное разрушение поверхности с образованием чешуйчатой структуры. Скорость эрозии материала составила $0,2\text{--}0,6\text{ мг}/(\text{см}^2\cdot\text{ч}^{-1})$, что соответствует интегральному коэффициенту эрозии $(1\text{--}2)10^{-2}\text{ ат./ион}$.

Настоящая работа частично поддержана РФФИ, проект № 19-08-00994-а.

REFERENCES

1. **Wampler W.R., Doerner R.P.** — Nuclear Fusion, 2009, vol. 49, p. 115023.
2. **Roth J., Schmid K.** — Physica Scripta, 2011, vol. 145, p. 014031.
3. **Hatano Y., Shimada M., Alimov V.Kh. et al.** — JNM, 2013, vol. 438, pp. S114—S119.
4. **Hatano Y., Toyama T., Lee H.T. et al.** Defect-hydrogen isotopes interactions in neutron-irradiated tungsten and effects of alloying elements and crystal orientation on defect formation under surrogate irradiation. — Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion, 2019, vol. 18, pp. 55—68.
5. **Deshpande S.P., Raole P.M. et al.** Simulation of radiation damage and ion-irradiation experiments with tungsten. — Ibid., pp. 3—44.
6. **Mayer M., Markina E., Lindig S., Schwartz-Selinger T.** — Physica Scripta, 2011, vol. 159, p. 014045.
7. **Shimada M. et al.** — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 013008.
8. **Gasparyan Yu.M., Ogorodnikova O.V., Pisarev A.A. et al.** Thermal desorption from self-damaged tungsten exposed to deuterium atoms. — JNM, 2015, vol. 463, pp. 1013—1016.
9. **Shimada M. et al.** Defect annealing and thermal desorption of deuterium in low dose HFIR neutron-irradiated tungsten. — Ibid., pp. 1005—1008.
10. **Li X., Xu Y., Zhang Y., Liu S.** Across-scale self-healing mechanisms for radiation damage in nano-crystal tungsten. — Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion, 2019, vol. 18, pp. 81—126.
11. **Alimov I.Kh. et al.** Deuterium retention in radiation-damaged tungsten. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 4, pp. 25—39 (in Russian).
12. **Koidan V.S. et al.** — In: IAEA 25th FEC. St Petersburg, 2014, paper MPT/P7-37.
13. **Khripunov B.I., Koidan V.S., Ryazanov A.I., Gureev V.M., Kornienko S.N., Latushkin S.T., Muksunov A.M., Semenov E.V., Stolyarova V.G., Unezhev V.N.** Radiation-damaged tungsten: production and study in a steady-state plasma flux. — Physics of Atomic Nuclei, 2018, vol. 81 (Transl. from VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 4, pp. 40—49) (in Russian).
14. **Khripunov B.I. et al.** — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. 649.
15. **Khripunov B., Gureev V., Koidan V. et al.** — Physica Scripta, 2011, vol. 145, p. 014052.
16. **Ryazanov A., Koidan V., Kripunov B. et al.** — Fus. Sci. & Techn., 2012, vol. 61, № 2, p. 107.
17. **Khripunov B., Gureev V., Koidan V. et al.** — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 1014.
18. **Khripunov B. et al.** — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 258.
19. **Khripunov B.I., Koidan V.S., Ryazanov A.I.** High-flux plasma effect on tungsten damaged by high-energy ions. — Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion, 2019, vol. 18, pp. 69—80.
20. **Maury F. et al.** Frenkel pair creation and stage (a) recovery in W crystals irradiated near threshold. — Radiation Eff., 1978, vol. 38, p. 53.
21. **Mason D.R., Yi X., Kirk M.A., Dudarev S.L.** Elastic trapping of dislocation loops in cascades in ion-irradiated tungsten foils. — J. of Physics: Condensed Matter., 2014, vol. 26, p. 376701 (18 p).
22. **Matsunami N., Yamamura Y., Itikawa Y., Itoh N. et al.** Energy dependence of the yields of ion-induced sputtering of monoatomic solids. Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan, 1983.

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

Latushkin S.T. 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

Received 30 September 2019

Revised 20 December 2019

Accepted 30 December 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 1, pp. 46—54