УДК 621.039.68

УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЁННОМ ВОЛЬФРАМЕ

В.Х. Алимов^{1, 2}, Н.П. Бобырь³, А.В. Спицын³, Д.И. Черкез³¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия²Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В настоящее время вольфрам рассматривается в качестве приоритетного материала для защиты дивертора и первой стенки будущих термоядерных установок. Вольфрам будет подвергаться воздействию интенсивных потоков ускоренных частиц дейтерия, трития, гелия, а также нейтронов энергией 14 МэВ, возникающих в процессе реакции термоядерного синтеза. Облучение нейтронами создаёт в решётке вольфрама радиационно-индуцированные повреждения, а именно смещения атомов, приводящие к формированию дефектов, способных захватывать и удерживать изотопы водорода. В настоящей статье представлены данные о накоплении изотопов водорода (на примере дейтерия) в радиационно-повреждённом вольфраме, полученные за последнее десятилетие.

Ключевые слова: вольфрам, дейтериевая плазма, накопление дейтерия, радиационные дефекты, ионное облучение, электронное облучение.

DEUTERIUM RETENTION IN RADIATION-DAMAGED TUNGSTEN

V.Kh. Alimov^{1, 2}, N.P. Bobyr³, A.V. Spitsyn³, D.I. Cherkez³¹National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia²A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russia³NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

At the moment, tungsten is considered as a priority material to protect the divertor and the first wall of future fusion facilities. Tungsten will be exposed to intense flows of accelerated deuterium, tritium, helium, and also 14 MeV neutrons produced during the fusion reaction. Irradiation with neutrons creates radiation-induced damages in the tungsten lattice, namely, atomic displacements, which lead to the formation of defects capable of capturing and retaining hydrogen isotopes. This review presents data on the accumulation of hydrogen isotopes (deuterium) in radiation-damaged tungsten obtained over the past decade.

Key words: tungsten, deuterium plasma, deuterium retention, radiation-induced defects, ion irradiation, electron irradiation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-25-39

ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение содержания трития в материалах термоядерных реакторов является в настоящее время одним из основных требований к материалам, контактирующим с термоядерной плазмой [1, 2]. Благодаря своим физическим свойствам, таким как незначительный коэффициент физического распыления и высокая температура плавления, вольфрам (W) рассматривается в качестве приоритетного материала плазмоконтрактирующих элементов будущих термоядерных реакторов. При горении термоядерной плазмы эти вольфрамовые элементы будут подвергаться воздействию интенсивных потоков ускоренных частиц дейтерия (D), трития (T), гелия (He), а также нейтронов (n) энергией 14 МэВ, возникающих в процессе реакции D—T-синтеза.

Становится очевидным, что исследование накопления изотопов водорода в вольфрамовых материалах при синергетическом воздействии энергетических частиц изотопов водорода и гелия совместно с термоядерными нейтронами представляет особенный интерес для оценки содержания радиоактивного трития в элементах реактора и расчёта дейтериево-тритиевого рециклинга. Известно, что облучение нейтронами создаёт в решётке вольфрама радиационно-индуцированные повреждения, а именно смещения атомов, приводящие к формированию дефектов, способных захватывать и удерживать изотопы водорода. Такими дефектами являются вакансии и вакансионные кластеры, а также дефекты дислокационного типа [3, 4]. Кроме того, облучение вольфрама термоядерными нейтронами приводит к трансмутационным эффектам — появлению радиоактивных изотопов вольфрама и рения. Появление рения в вольфрамовой матрице меняет механические свойства вольфрама и влияет на накопление изотопов водорода при воздействии водородной плазмы с высоким значением потока ионов (свыше 10^{21} ион/(м²·с)) [5].

Отметим, что для вольфрамовых элементов дивертора реактора ИТЭР расчётный уровень нейтронно-индуцированных повреждений, достигаемых за весь срок эксплуатации, составляет около 0,7 смещений на атом (сна) [4], при этом расчёт производился для быстрых нейтронов энергией свыше 0,1 МэВ, эффективной дозы $1,8 \cdot 10^{25} \text{ н/м}^2$, достигаемой за время $\sim 2 \cdot 10^7 \text{ с}$, и с использованием величины пороговой энергии смещения $E_d = 38 \text{ эВ}$. Для реактора ДЕМО скорость наработки повреждений в вольфрамовой облицовке первой стенки уже оценивается в 20—40 сна за один эксплуатационный год [6].

Следует отметить, что в настоящее время при расчётах уровня повреждений в вольфраме используется величина $E_d = 90 \text{ эВ}$, как наиболее корректная [7, 8]. Неопределённость в определении величины E_d влияет только на количество рассчитываемых смещений на атом, но не на распределение повреждений по глубине материала.

Наилучшим способом исследовать влияние нейтронно-индуцированных дефектов на накопление изотопов водорода в вольфрамовых материалах было бы использование источника термоядерных нейтронов для облучения исследуемого материала, однако в настоящее время такого источника не существует. Другой возможностью генерирования нейтронно-индуцированных дефектов является использование быстрых нейтронов энергией свыше 0,1 МэВ, генерируемых в ядерных реакторах деления [9, 10], однако вследствие невысокой скорости радиационного повреждения и наведения радиоактивности образцов такая возможность представляется трудно выполнимой.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Одним из способов исследования влияния радиационно-индуцированных дефектов на накопление водорода в вольфраме является генерация каскадов смещений при облучении ионами H, Si, Fe, W энергией от сотен кэВ до 20 МэВ. Было показано, что эти ионно-индуцированные дефекты значительно увеличивают содержание дейтерия, вводимого в радиационно-повреждённый вольфрам при последующем ионном или плазменном облучении, а также при выдержке в атмосфере газообразного дейтерия [11—22]. Стоит отметить, что структура радиационных дефектов, генерируемых тяжёлыми ионами энергией несколько МэВ, схожа со структурой нейтронно-индуцированных дефектов [23]. Как для облучения термоядерными нейтронами, так и для облучения ионами вольфрама энергией 20 МэВ/W энергетическое распределение первичных смещённых атомов имеет максимум при высоких энергиях, и при этом создаются плотные каскады соударений [24]. Однако необходимо отметить, что дефекты, создаваемые тяжёлыми ионами, концентрируются в узком подповерхностном слое $\sim 1 \text{ мкм}$, тогда как налетающие нейтроны генерируют дефекты практически по всей толщине материала.

Другой метод заключается в облучении образцов материала высокоэнергетичными электронами. Облучение высокоэнергетичными электронами позволяет создать дефекты, более равномерно распределённые, и глубина повреждённого слоя $\sim 1 \text{ мм}$, что существенно больше, чем при облучении тяжёлыми ионами. Стоит отметить, что недостатком данного метода является низкая скорость наработки дефектов $\sim 10^{-8}—10^{-7} \text{ сна/с}$.

ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕЙТЕРИЯ, ЗАХВАЧЕННОГО В ЗОНЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА, ОТ УРОВНЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Зависимость концентрации дейтерия $^{damage}C_D$, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения, от уровня повреждения (выраженного в смещениях на атом) изучалась в ряде работ [12, 13, 15, 20—22]. В вольфраме, предварительно облучённом (или, другими словами, повреждённом) при 300 К ионами Si энергией 12 МэВ/Si и затем облучённом при 473 и 773 К низкоэнергетической (т.е. с энергией ионов ниже энергии, требуемой для генерации радиационных дефектов¹) дейтериевой плазмой

¹ Пороговая энергия смещения вольфрама E_d зависит от кристаллографического направления, и минимальная величина $E_d = 68 \text{ эВ}$ существует для ориентации $\langle 100 \rangle$ [8]. Основываясь на минимальной пороговой энергии смещения, минимальная энергия ионов дейтерия, необходимая для генерации радиационных дефектов, составляет около 1600 эВ/D.

с высоким значением потока ионов, увеличение концентрации $^{damage}C_D$ наблюдалось при увеличении уровня повреждений от 0,006 до 0,6 сна в пике повреждения² [12] (в этой работе уровень повреждений рассчитывался с использованием величины $E_d = 40$ эВ). В вольфраме, повреждённом при 300 К ионами W энергией в интервале от 5,5 до 20 МэВ/В и затем облучённом при 470—480 К низкоэнергетическими (≤ 200 эВ/Д) ионами дейтерия, концентрация $^{damage}C_D$ достигает насыщения при уровнях повреждения 0,4—0,5 сна, рассчитанных при $E_d = 68$ эВ [13], $E_d = 90$ эВ [15] и $E_d = 40$ эВ [20]. Используя вольфрам, повреждённый при 300 К ионами H энергией 300 кэВ/Н и облучённый при 473 К ионами дейтерия энергией 1 кэВ/Д, авторы работы [22] показали, что концентрация $^{damage}C_D$ возрастает линейно с увеличением уровня повреждения до 0,2 сна ($E_d = 40$ эВ), после чего вплоть до 1 сна концентрация дейтерия в зоне повреждения демонстрирует незначительный рост.

Необходимо отметить, что облучение вольфрама, не содержащего радиационно-индуцированные дефекты, дейтериевой плазмой с высокой плотностью потока ионов (свыше 10^{21} Д/(м²·с)) создаёт напряжённо-индуцированные дефекты на глубинах до нескольких микрон [25]. В вольфраме, облучённом дейтериевой плазмой, глубина накопления дейтерия, равная нескольким мкм, значительно больше глубины внедрения ионов (несколько нанометров). Концентрация дейтерия на глубинах несколько мкм достигает сравнительно больших значений, равных 0,01—0,1% ат., в зависимости от температуры облучения [25, 26]. Механизм пластической деформации, возникающей вследствие перенасыщения приповерхностного слоя атомами изотопа водорода [27], предложен для объяснения модификации подповерхностной структуры и формирования дефектов, захватывающих дейтерий [27, 28]. Возникающее при водородном перенасыщении сжимающее напряжение снимается пластической деформацией. Эта деформация генерирует дефекты вакансионного типа и дислокации [27]. При длительном облучении дейтериевой плазмой дефекты вакансионного типа в зависимости от температуры облучения становятся зародышами трещин и/или газонаполненных полостей. Как показано на примере рекристаллизованного вольфрама [25], при температуре облучения выше температуры перехода из хрупкого в пластичное состояние (при 370—470 К, в зависимости ориентации кристаллов [29]) мобильность дислокаций увеличивается и напряжение может сниматься за счёт перемещения дислокаций вдоль кристаллографических плоскостей во всём кристаллите. Эти процессы могут приводить к образованию полостей на границах зёрен, расположенных на глубине до нескольких десятков микрометров.

Однако при температурах, близких к комнатной, т.е. при температурах менее температуры перехода из хрупкого в пластичное состояние, напряжение приводит к формированию трещин внутри зерна [25]. Подобные явления наблюдаются в поликристаллическом механически деформированном и горячекатаном вольфрамовых материалах [30].

Возвращаясь к радиационно-повреждённому вольфраму, отметим, что определение величины уровня повреждения, при которой концентрация изотопа водорода достигает максимального значения при фиксированной температуре введения этого изотопа в радиационно-повреждённый вольфрам, и энергий связи водорода с радиационно-индуцированными дефектами необходимо для понимания влияния нейтронного облучения на уровень накопления трития в облицовке дивертора термоядерного реактора. Результаты систематического исследования зависимости концентрации дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения, от уровня повреждения (т.е. от величины смещений на атом) представлены в работах [18, 21]. Образцы вольфрама облучались при 300 К ионами W энергией 4,8 и 20 МэВ до уровня повреждения от 0,022 до 50 сна, затем в эти образцы вводился дейтерий при повышенных температурах. Важно понимать, что для исследования накопления дейтерия в радиационно-повреждённом вольфраме необходимо использовать такие методы введения дейтерия, которые не приводят к генерации дополнительных дефектов. Обычно для этого радиационно-повреждённый вольфрам облучается дейтериевой плазмой с невысокой плотностью потока ионов (около $2 \cdot 10^{18}$ Д/(м²·с), при этом потоке напряжённо-индуцированные дефекты не создаются) или выдерживается в атмосфере дейтерия при повышенных температурах. В работе [18], кроме выдержки радиационно-повреждённого вольфрама в атмосфере дейтерия при температуре 673 К и давлении 100 кПа в течение 10 ч, использовался метод облучения 50-микронной вольфрамовой горячекатаной фольги дейтериевой плазмой при температуре 550 К с высокой плотностью потока

² Далее в тексте величина уровня повреждения будет указываться в пике смещения.

ионов $\sim 10^{22}$ D/(м²·с), но при этом ионами W энергией 20 МэВ повреждалась одна сторона фольги, а дейтериевой плазмой облучалась противоположная сторона. Глубина формирования напряжённо-индуцированных дефектов в горячекатаной фольге не превышала десяти микрон [31], поэтому зона радиационно-индуцированного повреждения не претерпевала каких-либо структурных изменений во время плазменного облучения. Доза ионов дейтерия при плазменном облучении в течение 500 мин составляла $3 \cdot 10^{26}$ D/м², и диффундирующий при 550 К дейтерий достигал зоны радиационного повреждения и захватывался на дефектах.

Профили распределения дейтерия в радиационно-повреждённых вольфрамовых образцах как после выдержки в атмосфере дейтерия, так и после плазменного облучения определялись методом ядерной реакции $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$. Для измерения концентрации атомов D до глубины 7 мкм энергия анализирующих ионов ^3He варьировалась от 0,69 до 4,0 МэВ. С помощью программы SIMNRA [32] полученная зависимость выхода протонов от энергии анализирующих ионов ^3He трансформировалась в профиль распределения дейтерия по глубине образца [33].

Как следует из результатов, полученных в работах [18, 21] (рис. 1 и 2), при увеличении уровня повреждения от 0,022 до 0,1 сна концентрация дейтерия, захваченного радиационно-индуцированными

Рис. 1. Профили распределения дейтерия, захваченного в поликристаллической вольфрамовой фольге толщиной 50 мкм, неповреждённой и повреждённой с обратной стороны облучением ионами W энергией 20 МэВ/В при 300 К до различных уровней повреждения, после последующего воздействия на лицевую сторону низкоэнергетической (76 эВ/ион) дейтериевой плазмой при 550 К до дозы облучения $3 \cdot 10^{26}$ D/м², профили D: ▽ — неповреждённый; △ — 0,022 сна в пике повреждения; ● — 0,089 сна; □ — 0,22 сна; ★ — 0,89 сна. Профили повреждения: --- — 0,022; -.-.- — 0,22 сна, рассчитанные с помощью программы SRIM 2008.03 [34] с использованием пороговой энергии смещения $E_d = 90$ эВ [7]; показаны с использованием правой ординаты (а). Зависимость концентрации дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения при 550 К, от уровня повреждения (б) (данные, показанные на рисунке, взяты из работы [18])

Рис. 2. Профили распределения дейтерия, захваченного в поликристаллическом вольфраме, повреждённом облучением ионами W энергией 4,8 и 20 МэВ/В при 300 и 573 К до различных уровней повреждения, после последующего воздействия низкоэнергетической (≤ 380 эВ/ион) дейтериевой плазмой с невысоким значением потока ионов ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) при 403 К в течение 9 ч, профили D в W, повреждённом: ○ — 20 МэВ/В, 300 К, 0,3 сна; □ — 20 МэВ/В, 300 К, 0,5 сна; △ — 4,8 МэВ/В, 300 К, 50 сна; ▽ — 4,8 МэВ/В, 573 К, 0,65 сна; ▽ — 4,8 МэВ/В, 573 К, 50 сна. Профили повреждения: --- — 4,8 МэВ/В, 0,65 сна; -.-.- — 20 МэВ/В, 0,5 сна, показаны с использованием правой ординаты (а). Зависимость концентрации дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения при 403 К, от уровня повреждения: ▽ — 20 МэВ/В, 300 К; ● — 4,8 МэВ/В, 300 К; ● — 4,8 МэВ/В, 573 К (б) (данные, показанные на рисунке, взяты из работ [18, 21])

дефектами, возрастает практически пропорционально величине уровня повреждения, тогда как при увеличении уровня повреждения от 0,1 до 50 сна концентрация захваченного дейтерия возрастает незначительно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что концентрация дефектов, индуцированных облучением ионами W энергией от нескольких до десятков МэВ и способных захватывать изотопы водорода, практически достигает максимального значения при уровне повреждения около 0,1 сна.

Следует отметить, что радиационно-индуцированные дефекты, создаваемые ионами W, являются сильными насыщаемыми ловушками, т.е. эти дефекты захватывают все атомы дейтерия, находящиеся в решётке металла на некотором критическом расстоянии от ловушки, но при этом дефекты могут захватывать лишь ограниченное количество дейтерия. Лишь после заполнения ближайших дефектов дейтерий может диффундировать к следующим ловушкам. Действительно, представленные на рис. 3 профили распределения дейтерия в радиационно-повреждённом вольфраме после облучения при температуре 403 К D-плазмой с невысоким значением потока ионов ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) в течение 3 и 12 ч указывают на перемещение фронта захваченного ловушками дейтерия от поверхности вглубь зоны повреждения. Таким образом, платообразная форма распределения дейтерия в зоне радиационно-индуцированного повреждения свидетельствует о захвате дейтерия до стационарной концентрации, максимально возможной при данной температуре.

Рис. 3. Профили распределения дейтерия в поликристаллическом вольфраме, повреждённом при 300 К ионами W энергией 20 МэВ/W до 0,5 сна (---) и затем облучённом низкоэнергетической (≤ 380 эВ/ион) дейтериевой плазмой с невысоким значением потока ионов ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) при 403 К в течение 3 (Δ) и 12 ч (□) (данные, показанные на рисунке, взяты из работы [18])

ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕЙТЕРИЯ, ЗАХВАЧЕННОГО В ЗОНЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА, ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕДРЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ

При повышенных температурах, достаточных для активации процесса высвобождения изотопов водорода из радиационно-индуцированных дефектов, устанавливается равновесие между процессами захвата водорода в радиационно-индуцированных ловушках и высвобождения из них. При этом доля ловушек θ_T , занятых водородом при температуре T , определяется следующим уравнением [35]:

$$\theta_T / (1 - \theta_T) = \theta_L \exp(E_{\text{bin}} / kT), \quad (1)$$

где θ_L — доля межузлий, занятых водородом; E_{bin} — энергия связи водорода с дефектом (разница энтальпий для атома водорода в растворённом состоянии, находящегося в ловушке); k — постоянная Больцмана. Отметим, что величина θ_T меняется с изменением концентрации водорода в растворённом состоянии C_{ss} , поскольку концентрация растворённого водорода пропорциональна величине θ_L :

$$C_{\text{ss}} = C_L \theta_L, \quad (2)$$

где C_L — концентрация межузельных позиций.

В процессе облучения мишени водородной плазмой величина C_{ss} определяется балансом между потоком внедряющихся атомов водорода $\alpha \phi_{\text{in}}$ и потоком реэмитирующего водорода ϕ_r (α — коэффициент внедрения энергетических частиц водорода в мишень, ϕ_{in} — поток энергетических частиц водорода, падающих на мишень). В первом приближении можно считать, что при достижении равновесия потоки внедряющегося и реэмитирующего водорода практически равны:

$$\alpha \phi_{\text{in}} \cong \phi_r = 2 \sigma k_r C_{\text{ss}}^2, \quad (3)$$

где C_{ss-s} — концентрация растворённого водорода непосредственно под поверхностью; σ — фактор шероховатости поверхности (отношение реальной площади поверхности к геометрической площади) [36]; k_r — коэффициент поверхностной рекомбинации водорода. Следовательно:

$$C_{ss-s} \cong (\alpha\phi_{in}/2\sigma k_r)1/2. \quad (4)$$

Отметим, что величина C_{ss-s} уменьшается по мере возрастания степени шероховатости поверхности σ .

Добавим, что в случае выдержки вольфрама в атмосфере газообразного водорода концентрация C_{ss} определяется законом Сиверта

$$C_{ss} = k_0 \exp(-E_s/kT)P^{1/2}, \quad (5)$$

где k_0 — константа растворимости; E_s — теплота растворения; P — давление газообразного водорода.

Эти уравнения показывают, что при повышенных температурах стационарная, достигшая своего максимального значения концентрация водорода, захваченного на радиационно-индуцированных дефектах, пропорциональна концентрации атомов дейтерия в растворённом состоянии.

Имеющиеся экспериментальные данные о стационарной концентрации дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения, в зависимости от температуры внедрения дейтерия представлены на рис. 4.

Рассмотрение представленных результатов даёт основание сделать следующие выводы.

Стационарная концентрация дейтерия C_D^{damage} , захваченного в зоне радиационного повреждения, не зависит от микроструктуры исходного плотного вольфрамового материала (сравнение концентрации дейтерия в повреждённых поликристаллическом и рекристаллизованном вольфрамовых материалах). Данные о накоплении изотопов водорода в радиационно-повреждённых пористых вольфрамовых покрытиях, нанесённых методом плазменного напыления, отсутствуют.

Стационарная концентрация C_D^{damage} уменьшается с увеличением температуры внедрения дейтерия.

В случае облучения дейтериевой плазмой при температуре вольфрама до 550 К стационарная концентрация C_D^{damage} увеличивается незначительно (в 2—3 раза) при возрастании потока ионов примерно на четыре порядка (с $\sim 2 \cdot 10^{18}$ до $\sim 10^{22}$ D/(м²·с)).

В случае выдержки в атмосфере дейтерия при температуре 673—873 К стационарная концентрация C_D^{damage} пропорциональна квадратному корню от давления газа, т.е. пропорциональна концентрации атомов дейтерия в растворённом состоянии.

ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕЙТЕРИЯ, ЗАХВАЧЕННОГО В ЗОНЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА, ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГЕНЕРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОСТРАДИАЦИОННОГО ОТЖИГА

Изменение стационарной концентрации дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения вольфрама, от температуры, при которой этот материал подвергался облучению ионами W

Рис. 4. Стационарная концентрация дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения вольфрама, предварительно облучённого при 300 К ионами вольфрама энергией от 5,5 до 20 МэВ/ион и затем облучённого низкоэнергетической (≤ 380 эВ/ион) дейтериевой плазмой с невысоким ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) и высоким ($\geq 10^{22}$ D/(м²·с)) значениями потока ионов и выдержанного в атмосфере D₂ при давлении 1,2 (5 — рекристалл; 6 — поликристалл W, 0,5 сна) и 100 кПа (3 — рекристалл; 4 — поликристалл W, 0,5 сна), в зависимости от температуры внедрения дейтерия (данные взяты из работ [13, 15—17, 37])

энергией 13 и 20 МэВ/В, показано в работе [38] (рис. 5). Вольфрамовый образец размером 10×10 мм и толщиной около 1 мм помещался на специальный держатель, охлаждаемый проточной водой или нагреваемый керамическим нагревателем в зависимости от требуемой температуры. Температура образца во время облучения ионами вольфрама измерялась термопарой, плотно прижатой к обратной стороне образца.

Несмотря на то, что дейтерий внедрялся в повреждённый вольфрам в процессе выдержки в атмосфере D_2 при давлении 100 кПа и температуре 673 К в течение 10 ч, а время повреждения МэВ-ными ионами W не превышало 1 ч, концентрация дейтерия, захваченного дефектами, созданными облучением ионами W при температуре ниже 673 К, демонстрирует спадающую зависимость от температуры повреждения (см. рис. 5). Таким образом, можно предположить, что концентрация дефектов, ответственных за удержание изотопов водорода, определяется, главным образом, температурой во время облучения МэВ-ными ионами W, а не температурой пострадиационного отжига при 673 К при выдержке в атмосфере D_2 .

Изменение стационарной концентрации дейтерия, захваченного дефектами, созданными облучением при 300 К ионами вольфрама энергией 20 МэВ/В, в зависимости от температуры пострадиационного отжига было исследовано в работах [21, 39].

Анализ представленных на рис. 6 результатов позволяет сделать вывод о том, что концентрация дефектов, создаваемых в вольфраме при облучении МэВ-ными тяжёлыми ионами, уменьшается незначительно (в 3—4 раза) при увеличении температуры пострадиационного отжига от 400 до 1273 К. Заметное уменьшение концентрации дефектов наблюдается при температуре отжига 1573 К.

Рис. 5. Концентрация дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения горячекатаного вольфрама, предварительно облучённого при различной температуре ионами W энергией 13 и 20 МэВ/В до 0,5 сна и затем выдержанного в атмосфере D_2 (---) при температуре 673 К и давлении 100 кПа в течение 10 ч, в зависимости от температуры повреждения ионами W (данные взяты из работы [38])

Рис. 6. Концентрация дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения вольфрама, предварительно облучённого при 300 К ионами W энергией 20 МэВ/В до 0,5 (■) и 0,9 (●) сна и отожжённого в вакууме в течение 1 и 6 ч соответственно, после чего выдержанного в атмосфере D_2 при температуре 673 К и давлении 100 кПа в течение 10 ч [21] и облучённого при 400 К низкоэнергетической (~15 эВ/ион) дейтериевой плазмой с невысоким значением потока ионов ($\sim 5 \cdot 10^{19}$ D/(м²·с)) [39], в зависимости от температуры повреждения ионами W

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ЗОНЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ С ПРИМЕСЬЮ ГЕЛИЯ

Температурная зависимость содержания дейтерия в радиационно-повреждённом вольфраме при облучении гелий-дейтериевой плазмой была детально исследована в работе [16]. Вольфрамовые образцы были облучены при комнатной температуре ионами W энергией 20 МэВ до дозы $1,4 \cdot 10^{18}$ W/м². В результате этого приповерхностный слой образцов был радиационноповреждён до 0,89 сна в пике профиля повреждения, находящемся на глубине 1,35 мкм.

Образцы повреждённого вольфрама облучались как дейтериевой плазмой, состоящей из ионов D_2^+ (около 70%) и D^+ (около 30%), так и гелиево-дейтериевой плазмой, состоящей из ионов D_2^+ (около 65%), D^+ (около 25%) и He^+ (около 10%) [16]. Потенциал смещения, прикладываемый к вольфрамовому образцу, составлял -80 В, и при потенциале плазмы около 4 В энергия ионов составляла около 76 эВ.

Рис. 7. Профили распределения дейтерия, захваченного в радиационно-повреждённом (до 0,89 сн) вольфраме после облучения 76 эВ D-плазмой, $T_{обл}$ равно 440 (●); 540 (▼); 640 (■); 540 К (★); — — — — — профиль повреждения (а), и 76 эВ He(10%)—D-плазмой, $T_{обл}$ равно 445 (●); 545 (▼); 640 К (■); — — — — — профиль повреждения (б) до дозы ионов $3 \cdot 10^{26}$ D/м² при различной температуре (рисунок взят из работы [16]). На панелях показан также профиль распределения радиационно-индуцированного повреждения, рассчитанный с помощью программы SRIM 2008.03 [34]

Рис. 8. Концентрация дейтерия (в единицах атомного отношения D/W) на глубине пика повреждения в радиационно-повреждённом вольфраме, облучённом чистой D-плазмой (●) и He(10%)—D-плазмой (★) ($\Phi = 3 \cdot 10^{26}$ D/м²), в зависимости от температуры облучения (рисунок взят из работы [16])

цу, составлял -80 В, и при потенциале плазмы около 4 В энергия ионов составляла около 76 эВ.

Было показано, что генерация радиационно-индуцированных дефектов в вольфраме и последующее облучение как D-плазмой, так и He(10%)—D-плазмой значительно увеличивают концентрацию дейтерия на глубине до 2 мкм (т.е. в зоне радиационно-индуцированного повреждения) (рис. 7).

Следует отметить, что высокая концентрация дейтерия за зоной радиационно-индуцированного повреждения при температуре 440 и 540 К в случае облучения D-плазмой и при температуре 445 К в случае облучения He(10%)—D-плазмой объясняется формированием напряжённо-индуцированных дефектов на глубинах несколько микрометров вследствие пластической деформации, вызываемой высокой концентрацией дейтерия, достигаемой в тонком приповерхностном слое во время облучения дейтериевой плазмой [27, 28]. С повышением температуры облучения устанавливаемая концентрация дейтерия уменьшается вследствие увеличения диффузионного оттока, и вероятность формирования напряжённо-индуцированных дефектов падает.

Концентрация дейтерия на глубине пика повреждения C_D^{damage} в радиационно-повреждённом механически-деформированном вольфраме, облучённом чистой D-плазмой и смешанной He—D-плазмой при различной температуре, показана на рис. 8, скомпилированном из работы [16]. После облучения чистой D-плазмой при температуре свыше 450 К величина C_D^{damage} всегда выше, чем после облучения смешанной He—D-плазмой. С увеличением температуры величина C_D уменьшается как в случае облучения чистой D-плазмой, так и в случае облучения He—D-плазмой.

Как было сказано, один из возможных механизмов, объясняющих это явление, — формирование гелиевых наноразмерных пузырьков в приповерхностном слое [40]. Формирование открытой (соединённой с поверхностью) гелиевой пористости приводит к увеличению потока реэмитирующего (выделяющегося обратно в вакуум в процессе ионной имплантации) дейтерия, тогда как поля напряжения, образующиеся вокруг несвязанных пузырьков, являются барьером для дейтерия, диф-

фундирующего в объём материала [41]. Эти процессы приводят к уменьшению концентрации дейтерия в растворённом состоянии и, вследствие этого, к уменьшению стационарной концентрации дейтерия в зоне радиационных повреждений [21]. Предполагается, что вероятность формирования открытой пористости увеличивается с возрастанием температуры одновременного облучения ионами дейтерия и гелия.

Вторым возможным механизмом является уменьшение концентрации вакансий вследствие роста гелиевых пузырьков и эмиссии межузлий и дислокационных петель [42, 43]. При этом предполагается возможность взаимодействия вакансий с межузельными атомами, что приводит к уменьшению ловушек, способных захватывать дейтерий. Для проверки эффективности данного механизма были проведены эксперименты, описанные в работе [44].

Образцы вольфрама, предварительно облучённые при 300 К ионами W энергией 20 МэВ до уровня смещений в пике 0,5 сна, облучались затем ионами гелия энергией 1 кэВ при температуре 473, 623 и 823 К до доз облучения в интервале $(3,7—5) \cdot 10^{22}$ $\text{He}/\text{м}^2$. Затем эти образцы выдерживались в атмосфере дейтерия при температуре 673 К и давлении 100 кПа в течение 10 ч. Профили распределения захваченного на радиационных дефектах дейтерия измерялись методом ядерных реакций $\text{D}^3\text{He}, p)^4\text{He}$.

Полученные результаты (рис. 9) показали, что профили распределения дейтерия в зоне дефектов, индуцированных облучением ионами W энергией 20 МэВ, практически не зависят от того, облучались ли эти радиационно-повреждённые образцы впоследствии ионами гелия, или нет. Таким образом, можно считать, что формирование гелиевой пористости (как закрытой, так и открытой) и уменьшение вследствие этого концентрации растворённого дейтерия являются доминирующим механизмом в уменьшении стационарной концентрации дейтерия, захваченного на радиационно-индуцированных дефектах, при облучении радиационно-повреждённого вольфрама дейтериевой плазмой с присадками ионов гелия.

Рис. 9. Профили распределения дейтерия, захваченного в радиационно-повреждённом вольфраме до 0,5 сна и облучённом ионами He энергией 1 кэВ, после выдержки образцов в атмосфере D_2 при температуре 673 К и давлении 100 кПа в течение 10 ч (рисунок взят из работы [44]). Показан также профиль распределения радиационно-индуцированных повреждений, рассчитанный с помощью программы SRIM 2008.03 [34]: --- — профиль повреждения; ● — без облучения ионами He; после облучения ионами He: ○ — $5 \cdot 10^{22}$ $\text{He}/\text{м}^2$, 473 К; △ — $3,7 \cdot 10^{22}$ $\text{He}/\text{м}^2$, 623 К; ☆ — $3,7 \cdot 10^{22}$ $\text{He}/\text{м}^2$, 823 К

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ И ДЕФЕКТОВ В ВОЛЬФРАМЕ, ОБЛУЧЁННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

В данной работе повреждения в образцах вольфрама создавались при облучении образцов вольфрама высокоэнергетичными электронами. Для проведения экспериментов был разработан высоковакуумный водоохлаждаемый модуль для одновременного облучения до 12 образцов.

В качестве источника электронов использовался линейный ускоритель со средней энергией электронов 10 МэВ со следующими параметрами: максимальный ток импульса 400 мА, длительность импульса 4—7 мкс, частота 10—100 Гц. Форму пучка электронов на выходе из ускорителя можно изменять в диапазоне характерного размера пучка на мишени от 10 до 100 мм, используя систему из двух квадрупольных линз. Вакуумная система, включающая в себя безмасляный ротационный насос, турбомолекулярный насос, магниторазрядный насос, датчики давления и систему вакуумпроводов и вентиляей, позволяет поддерживать вакуум в ходе эксперимента не хуже 10^{-5} Па.

Для измерения импульсного тока пучка ускоренных электронов использовался индукционный датчик тока, устанавливаемый на выходе ускорителя, сигнал с выхода которого поступал на вход осциллографа. Импульсный ток электронов на образец рассчитывался путём измерения падения напряжения на резисторе сопротивлением 50 Ом.

В ходе экспериментов по облучению образцов высокоэнергетичными электронами одной из проблем является нагрев образца в процессе облучения. Известно, что с ростом температуры образца увеличивается скорость отжига дефектов, а также происходит объединение дефектов в кластеры. Так, согласно данным работы [45], начиная с 600 К вакансии в вольфраме становятся подвижными и начинают объединяться в кластеры. Таким образом, в процессе электронного облучения необходимо контролировать температуру образца, её значение должно быть как можно ближе к комнатной. Также необходимо исключить процесс окисления образцов, поэтому в ходе эксперимента они должны находиться в высоком вакууме.

В качестве технического решения был специально сконструирован и изготовлен модуль (рис. 10), который представляет собой вакуумную камеру с остаточным давлением не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ Па, в которой образцы крепятся на водоохлаждаемый медный держатель для предотвращения отжига генерируемых дефектов. Геометрия вакуумной системы ускорителя и модуля облучения позволяет облучать одновременно до четырёх образцов размером $10 \times 10 \times 1$ мм, закреплённых на держателе образцов, при плотности потока электронов до $5 \cdot 10^{17}$ $\text{e}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Держатель образцов представляет собой полый медный цилиндр с припаянными трубками из нержавеющей стали, предназначенными для водяного охлаждения. Медь обладает хорошей теплопроводностью, и при обеспечении достаточного теплового контакта образца с держателем температура задней поверхности образца практически совпадает с температурой держателя.

Рис. 10. Модуль для облучения электронами: 1 — токовводы; 2 — керамическая вставка; 3 — держатель образцов; 4 — фланец-диафрагма; 5 — нержавеющая трубка водоохлаждения

Образцы крепятся к держателю с помощью прижимной пластины. Температура образцов в ходе облучения измерялась с помощью нескольких термпар, плотно прижатых с фронтальной стороны образца. Для измерения тока электронов, попадающих на образцы, держатель электроизолирован от остальной части модуля (для этого использовался патрубок с керамической вставкой). Дополнительно для формирования пучка формы, соответствующей зоне облучения, из пучка большей площади в качестве диафрагмы был установлен фланец толщиной 30 мм с квадратной прорезью 22×22 мм. Таким образом, поток электронов на образцы измерялся с высокой точностью. В то же время диафрагма позволяет расположить на ней и облучать одновременно с «основными» образцами до восьми образцов размером $10 \times 10 \times 1$ мм. Плотность потока электронов на эти образцы в 2—3 раза меньше, чем на образцы на основном держателе.

В работе использовались образцы вольфрама размером $10 \times 10 \times 1$ мм, изначально рекристаллизованные при температуре 1673 К в течение 60 мин для того, чтобы максимально снизить содержание естественных дефектов.

В ходе проведения экспериментов по облучению образцов вольфрама высокоэнергетичными электронами с плотностью потока $5 \cdot 10^{17}$ $\text{e}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ в течение примерно 40 ч были получены образцы с интегральной дозой электронов $7 \cdot 10^{22}$ $\text{e}/\text{м}^2$. Кроме того, были получены образцы с интегральной дозой электронов на порядок меньше $7 \cdot 10^{21}$ $\text{e}/\text{м}^2$.

Рис. 11. Профиль распределения радиационно-индуцированного повреждения по глубине в вольфраме, облучённом электронами энергией 10 МэВ

На рис. 11 представлен рассчитанный в программе Electron Damage [46] профиль распределения дефектов при облучении электронами энергией 10 МэВ до дозы $7 \cdot 10^{22}$ $\text{e}/\text{м}^2$. Энергия смещения для вольфрама взята равной 90 эВ.

В расчётах полагается, что материал имеет температуру 0 К, поэтому тепловые эффекты, такие как колебания атомов решётки, термическая рекомбинация вакансий с межузельным дефектом, объединение дефектов в кластеры, в коде

не учитываются. Известно, что уже при температуре ниже комнатной в вольфраме происходит первая стадия отжига дефектов [45, 47]. Таким образом, в случае облучения образцов при комнатной температуре (и выше) большая часть первично созданных дефектов термически аннигилирует. Поэтому рассчитанные с помощью данного кода уровни повреждения следует рассматривать как оценку сверху концентрации созданных в образце точечных дефектов. По полученным расчётам можно сказать, что уровень созданных повреждений составил $4 \cdot 10^{-4}$ сна. Профиль распределения дефектов по глубине образцов плоский в диапазоне толщины 0—0,6 мм. Уровень повреждений на оборотной стороне образца примерно в 2 раза меньше, чем на входной. Данный уровень относительно низок сравнительно с тем, который ожидается в реальном реакторе в случае нейтронного облучения. Для получения больших повреждений требуются более продолжительные эксперименты по облучению. Тем не менее образцы с дефектами такого типа и уровня можно использовать для изучения фундаментальных процессов накопления изотопов водорода в дефектах кандидатных материалов термоядерных установок.

Профили распределения дейтерия в вольфраме, повреждённом при 400 К электронами энергией 10 МэВ до $4 \cdot 10^{-5}$ — $4 \cdot 10^{-4}$ сна и затем облучённом низкоэнергетической (≤ 380 эВ/ион) дейтериевой плазмой ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) при температуре ~ 330 К, представлены на рис. 12. Профиль распределения дейтерия в образце, повреждённом до $4 \cdot 10^{-5}$ сна, незначительно отличается от профиля распределения дейтерия в неповреждённом образце при средней концентрации дейтерия на глубине 1—6 мкм около $2 \cdot 10^{-3}$ ат. %. Профиль распределения дейтерия в образце, повреждённом до $4 \cdot 10^{-4}$ сна, отличается от профиля распределения дейтерия в неповреждённом образце на порядок при средней концентрации дейтерия на глубине 1—6 мкм около $1,5 \cdot 10^{-2}$ ат. %. Профиль распределения ровный на всей глубине анализа, что соответствует теоретическому профилю распределения дефектов (см. рис. 11).

Показано существенное влияние дефектов, генерируемых в вольфраме при облучении электронами энергией 10 МэВ, на накопление дейтерия в образцах уже при дозе повреждения $\sim 10^{-4}$ сна. При дозе повреждения на уровне $4 \cdot 10^{-4}$ сна количество дейтерия в зоне повреждения возрастает на порядок.

Рис. 12. Профили распределения дейтерия по глубине в образцах поликристаллического вольфрама, предварительно повреждённых облучением электронами энергией 10 МэВ и затем облучённых низкоэнергетической (≤ 380 эВ/ион) дейтериевой плазмой с невысоким значением потока ионов ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) при температуре ~ 330 К до дозы $\sim 2 \cdot 10^{23}$ D/м²: $\blacktriangle$ — без облучения; облучённые: $\circ$ — 10 МэВ e^- ($7 \cdot 10^{21}$ е/м²); $\bullet$ — 10 МэВ e^- ($7 \cdot 10^{22}$ е/м²)

МИКРОСТРУКТУРА ВОЛЬФРАМА, ОБЛУЧЁННОГО БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ И ИОНАМИ ВОЛЬФРАМА

Микроструктура горячекатаного и монокристаллического вольфрама, облучённого быстрыми ($E_n \geq 0,1$ МэВ) нейтронами, изучалась в работах [48—59]. Вольфрамовые образцы облучались нейтронами в японских реакторах JMTR [48, 49, 52, 55] и JOYO [50—53, 55, 57, 59], а также в реакторе HFIR (США) [54—58]. Анализ микроструктуры нейтронно-облучённых образцов проводился методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

После облучения быстрыми нейтронами при температуре в интервале от 673 до 1073 К и уровнях повреждения от 0,1 до 1,54 сна основными наблюдаемыми дефектами в вольфраме являются полости (рис. 13) [50, 51, 54, 55, 59]. При невысоких уровнях повреждения наблюдаются полости и дислокационные петли (рис. 14).

Рис. 13. Полости в горячекатаном вольфраме, облучённом быстрыми нейтронами в реакторе JMTR при температуре 1073 К до уровня повреждения 0,22 сна [55]. Изображение полостей получено при условии недофокусировки ПЭМ

Рис. 14. Условия облучения вольфрама быстрыми нейтронами в реакторах JMTR ($\blacktriangle$), JOYO ($\blacksquare$) и HFIR ($\bullet$) [50, 51, 54, 55, 59]

Характеристики дефектов, наблюдаемых в вольфраме после облучения быстрыми нейтронами, представлены в табл. 1. Данные взяты из работы [58].

Т а б л и ц а 1. Характеристики дефектов, наблюдаемых в вольфраме после облучения быстрыми нейтронами

Реактор	Температура, К	Уровень повреждения, сна	Дислокационные петли		Полости	
			Средний диаметр, нм	Плотность, м^{-3}	Средний диаметр, нм	Плотность, м^{-3}
HFIR	1073	0,15	2,0	$4,8 \cdot 10^{22}$	3,9	$0,2 \cdot 10^{22}$
HFIR	983	0,70	2,2	$2,4 \cdot 10^{22}$	4,1	$0,3 \cdot 10^{22}$
HFIR	503	0,90	5,4	$3,1 \cdot 10^{22}$		
HFIR	1043	2,88	3,6	$3,2 \cdot 10^{22}$	6,3	$0,3 \cdot 10^{22}$
JMTR	1073	0,15	8,5	$0,1 \cdot 10^{22}$	1,9	$4,2 \cdot 10^{22}$
JOYO	1029	0,42	5,6	$0,1 \cdot 10^{22}$	2,5	$12,1 \cdot 10^{22}$
JOYO	811	0,96	4,7	$4,7 \cdot 10^{22}$	2,1	$49,0 \cdot 10^{22}$

Облучение вольфрама ионами вольфрама энергией 50 кэВ при температуре 300 К до 0,1 и 5,5 сна [61] и энергией 18 МэВ при температуре 773 и 1073 К до 5,0 сна [62] приводит при комнатной температуре к формированию в зоне ионно-индуцированного повреждения вакансионных кластеров (~600 вакансий) и полостей размером менее 1 нм [61], а при высоких температурах — к формированию дислокационных петель и полостей [62]. Сравнение характеристик дефектов, создаваемых облучением быстрыми нейтронами и ионами вольфрама энергией 18 МэВ при одной и той же температуре 1073 К, дано в табл. 2 [51, 62].

Т а б л и ц а 2. Сравнение характеристик дефектов, создаваемых облучением быстрыми нейтронами и ионами вольфрама при температуре 1073 К

Источник облучения	Уровень повреждения, сна	Дислокационные петли		Полости	
		Средний диаметр, нм	Плотность, м^{-3}	Средний диаметр, нм	Плотность, м^{-3}
18 МэВ W	1,0	3,3	$6,1 \cdot 10^{22}$	1,5	$7,1 \cdot 10^{22}$
18 МэВ W	5,0	3,6	$6,0 \cdot 10^{22}$	1,6	$8,9 \cdot 10^{22}$
Быстрые нейтроны	1,5	—	—	4,7	$12 \cdot 10^{22}$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что облучение вольфрама ионами тяжёлых металлов энергией несколько МэВ является приемлемым методом экспериментального моделирования радиационных дефектов, создаваемых быстрыми нейтронами.

Как показано в работе [17], пики термодесорбции дейтерия из вольфрама, предварительно повреждённого ионами W 20 МэВ до 0,5 сна и затем облучённого низкоэнергетической дейтериевой плазмой с невысокой плотностью потока ионов (при этих условиях дополнительные дефекты в решётке вольфрама не создаются) при различных температурах образца, наблюдаются при температуре 900—1000 К (рис. 15). Согласно работам [63, 64] пик термодесорбционного выделения дейтерия из вольфрама при ~900 К обусловлен высвобождением атомов дейтерия, хемосорбируемых на стенках вакансионных кластеров и микрополостей, сформированных в процессе облучения ионами вольфрама.

Очевидно, что при повышенных температурах плазменного облучения или выдержке в атмосфере дейтерия основными дефектами, ответственными за удержание изотопа водорода в вольфраме, повреждённом как ионами вольфрама энергией несколько МэВ, так и быстрыми нейтронами, являются ионно-индуцированные и нейтронно-индуцированные вакансионные кластеры и наноразмерные полости. Однако необходимо отметить, что при температурах плазменного облучения, близких к комнатной, часть дейтерия может удерживаться также на дефектах дислокационного типа и границах зёрен [65].

Рис. 15. Спектры термодесорбции дейтерия из вольфрама, предварительно повреждённого ионами вольфрама энергией 20 МэВ до уровня 0,5 сна и затем облучённого низкоэнергетической (≤ 380 эВ/ион) дейтериевой плазмой с невысокой плотностью потока ионов (около $2 \cdot 10^{18}$ D/(м²·с)) при различной температуре образца. Условия плазменного облучения: доза облучения $\sim 6 \cdot 10^{22}$ D/м²; температура образца 423 (Δ); 473 (○); 573 К (★)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся экспериментальные данные о концентрации дейтерия, захваченного в зоне радиационно-индуцированного повреждения вольфрама, дают основание сделать следующие выводы.

Стационарная концентрация дейтерия C_D^{damage} , захваченного в зоне радиационного повреждения, не зависит от микроструктуры исходного плотного вольфрамового материала (сравнение концентрации дейтерия в повреждённых поликристаллическом и рекристаллизованном вольфрамовых материалах). Данные о накоплении изотопов водорода в радиационно-повреждённых пористых вольфрамовых покрытиях, нанесённых методом плазменного напыления, отсутствуют.

Стационарная концентрация C_D^{damage} уменьшается с увеличением температуры внедрения дейтерия.

В случае облучения дейтериевой плазмой при температуре вольфрама до 550 К стационарная концентрация C_D^{damage} увеличивается незначительно (в 2—3 раза) при возрастании потока ионов примерно на четыре порядка (с $\sim 2 \cdot 10^{18}$ до $\sim 10^{22}$ D/(м²·с)).

В случае выдержки в атмосфере дейтерия при температуре 673—873 К стационарная концентрация C_D^{damage} пропорциональна квадратному корню от давления газа, т.е. пропорциональна концентрации атомов дейтерия в растворённом состоянии.

С увеличением температуры, при которой генерируются радиационно-индуцированные повреждения, концентрация дефектов, ответственных за удержание изотопов водорода, уменьшается примерно на порядок величины при увеличении температуры генерации смещений от 300 до 1100 К. Однако при увеличении температуры пострадиационного отжига от 400 до 1273 К концентрация дефектов уменьшается незначительно (в 3—4 раза). Заметное уменьшение концентрации дефектов наблюдается при температуре пострадиационного отжига свыше 1273 К.

Дефекты смещения, генерируемые в вольфраме, значительно увеличивают содержание дейтерия в зоне повреждения после облучения как D-плазмой, так и смешанной He—D-плазмой. При этом в случае облучения смешанной He—D-плазмой при температуре свыше 450 К концентрация дейтерия в зоне повреждения ниже, чем в случае облучения чистой D-плазмой. Уменьшение концентрации растворённого дейтерия в случае облучения радиационно-повреждённого вольфрама дейтериевой плазмой с добавкой ионов гелия вызывает уменьшение концентрации дейтерия, захваченного в радиационно-индуцированных дефектах.

Дефекты смещения, генерируемые в вольфраме путём облучения образцов высокоэнергетичными электронами, способны на порядок увеличивать захват дейтерия в вольфраме уже при уровне повреждения $4 \cdot 10^{-4}$ сна.

При повышенных температурах основными дефектами, ответственными за удержание изотопов водорода в вольфраме, повреждённом как ионами вольфрама энергией несколько МэВ, так и быстрыми нейтронами, являются ионно-индуцированные и нейтронно-индуцированные вакансионные кластеры и наноразмерные полости. При температурах, близких к комнатной, часть изотопов водорода может удерживаться также на дефектах дислокационного типа и границах зёрен.

Настоящая работа частично поддержана Российским научным фондом, контракт № 16-12-10332.

REFERENCES

1. Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N. et al. — Nucl. Fusion, 2001, vol. 42, p. 1967.
2. Tobita K., Nishio S., Enoda M. et al. — Fusion Eng. Des., 2006, vol. 81, p. 1151.
3. Barabash V., Federici G., Rödiger M. et al. — J. Nucl. Mater., 2000, vol. 283—287, p. 138.
4. Iida H., Khripunov V., Petrizzi L., Federici G. — ITER Nuclear Analysis Report G 73 DDD 2 W 0.2, 2004.
5. Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K. et al. — J. Nucl. Mater., 2014, vol. 454, p. 136.
6. Raffray A.R., Nygren R., Whyte D.G. et al. — Fusion Eng. Des., 2010, vol. 85, p. 93.
7. Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charge-Particle Irradiation, E521–96. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 12.02. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1996, p. 1.
8. Xu Q., Yoshiie T., Huang H.C. — Nucl. Instrum. Meth., 2003, vol. B 206, p. 123.
9. Shimada M., Hatano Y., Calderoni P. et al. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S667.
10. Hatano Y., Shimada M., Oya Y. et al. — Mater. Trans., 2013, vol. 54, p. 437.
11. Fukumoto M., Kashiwagi H., Ohtsuka Y. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 572.
12. Wampler W.R., Doerner R.P. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 115023.
13. Tyburska B., Alimov V.Kh., Ogorodnikova O.V. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 395, p. 150.
14. Tyburska B., Alimov V.Kh., Ogorodnikova O.V. et al. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S680.
15. Ogorodnikova O.V., Tyburska B., Alimov V.Kh. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S661.
16. Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., Hatano Y. et al. — J. Nucl. Mater., 2012, vol. 420, p. 370.
17. Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K. et al. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S959.
18. Alimov V.Kh., Hatano Y., Tyburska-Püschel B. et al. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 441, p. 280.
19. Ogorodnikova O.V., Sugiyama K. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 442, p. 518.
20. Wright G.M., Mayer M., Ertl K. et al. — Nucl. Fusion, 2010, vol. 50, p. 075006.
21. Hatano Y., Shimada M., Alimov V.Kh. et al. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S114.
22. Ueda Y., Tanaka H., Tanimoto K. et al. Effect of radiation damage on deuterium retention in tungsten. — In: Oral Presentation at 14th Intern. Conf. on Fusion Reactor Materials. Sapporo, Japan, Sept. 2009 (the data are replicated in: J. Roth and K. Schmid. Phys. Scripta, 2011, vol. T145, p. 014031, Fig. 7).
23. Was G.S. Fundamentals of Radiation Material Science: Metals and Alloys. — Berlin: Springer, 2007.
24. Vladimirov P., Bouffard S. — Compt. Rend. Phys., 2008, vol. 9, p. 303.
25. Lindig S., Balden M., Alimov V.Kh. et al. — Phys. Scr., 2009, vol. T138, p. 014040.
26. Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J. et al. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 417, p. 572.
27. Condon J.B., Schober T. — J. Nucl. Mater., 1993, vol. 207, p. 1.
28. Haasz A.A., Poon M., Davis J. — J. Nucl. Mater., 1999, vol. 266—269, p. 520.
29. Gumbsch P. J. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 323, p. 304.
30. Lindig S., Balden M., Alimov V.Kh. et al. — Phys. Scr., 2011, vol. T145, p. 014039.
31. Balden M., Lindig S., Manhard A., You J.-H. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 414, p. 69.
32. Mayer M. SIMNRA User's Guide, Rep. IPP 9/113, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 1997.
33. Alimov V.Kh., Mayer M., Roth J. — Nucl. Instr. Meth., 2005, vol. B 234, p. 169.
34. Ziegler J.F. SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter, ver. SRIM-2008.3; <http://srim.org>.

35. **Gibala R., Kunnick A.J.** Hydrogen trapping in iron and steels. — In: R. Gibala, R.F. Hehemann (Eds.). Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking, Metal Park. Ohio, American Society for Metals, 1984, pp. 61—77; Ali-Khan I., Dietz K.J., Waelbroeck F.G., Wienhold P. — J. Nucl. Mater., 1978, vol. 76—77, p. 337.
36. **Hoен M.H.J., Tyburska-Püschel B., Ertl K. et al.** — Nucl. Fusion, 2012, vol. 52, p. 023008.
37. **Tyburska-Püschel B., Alimov V.Kh., Hoен M.H.J., Zgardzinska B.** Effect of high temperature tungsten irradiation on deuterium retention. — In: Poster Presentation at 14th Intern. Conf. on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications. Jülich, Germany, May 2013.
38. **Markina E., Mayer M., Manhard A., Schwarz-Selinger T.** — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 329.
39. **Iwakiri H., Yasunaga K., Morishita K., Yoshida N.** — J. Nucl. Mater., 2000, vol. 283—287, p. 1134.
40. **Ueda Y., Fukumoto M., Yoshida J. et al.** — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 725.
41. **Greenwood G.W., Foreman A.J.E., Rimmer D.E.** — J. Nucl. Mater., 1959, vol. 1, p. 305.
42. **Watanabe Y., Iwakiri H., Yoshida N. et al.** — Nucl. Instr. Meth., 2007, vol. B 255, p. 32.
43. **Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K. et al.** — J. Plasma Fusion Res., 2015, vol. 11, p. 1.
44. **He J.C., Tang G.Y., Hasegawa A., Abe K.** — Nucl. Fusion, 2006, vol. 46, p. 877.
45. **Maury F., Biget M., Vajda P., Lucasson A., Lucasson P.** — Radiat. Eff., 1978, vol. 38, p. 53.
46. **Messina L.** Monte Carlo simulation for the prediction of gamma-induced damage in metals. — Master Thesis. Politecnico di Torino, Kungliga Tekniska Högskolan, 2010.
47. **Neely H.H., Keefer D.W., Sosin A.** — Phys. Status Solidi (b), 1968, vol. 28, p. 675.
48. **He J.C., Hasegawa A., Abe K.** — J. Nucl. Mater., 2008, vol. 377, p. 348.
49. **Tanno T., Hasegawa A., He J.C. et al.** — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 218.
50. **Tanno T., Fukuda M., Nogami S., Hasegawa A.** — Mater. Trans., 2011, vol. 52, p. 1447.
51. **Fukuda M., Hasegawa A., Tanno T. et al.** — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 442, p. S273.
52. **Fukuda M., Hasegawa A., Nogami S., Yabuuchi K.** — J. Nucl. Mater., 2014, vol. 449, p. 213.
53. **Fukuda M., Yabuuchi K., Nogami S. et al.** — J. Nucl. Mater., 2014, vol. 455, p. 460.
54. **Hasegawa A., Fukuda M., Nogami S., Yabuuchi K.** — Fusion Eng. Des., 2014, vol. 89, p. 1568.
55. **Hu X., Koyanagi T., Fukuda M. et al.** — J. Nucl. Mater., 2016, vol. 470, p. 278.
56. **Hasegawa A., Fukuda M., Yabuuchi K., Nogami S.** — J. Nucl. Mater., 2016, vol. 471, p. 175.
57. **Fukuda M., Kiran Kumar N.A.P., Koyanagi T. et al.** — J. Nucl. Mater., 2016, vol. 479, p. 249.
58. **Fukuda M., Tanno T., Nogami S., Hasegawa A.** — J. Mater. Trans., 2012, vol. 53, p. 2145.
59. **Klimenkov M., Jäntschi U., Rieth M. et al.** — J. Nucl. Mater. Energy, 2016, vol. 9, p. 480.
60. **Bobkov A.F., Zabolotnyi V.T., Ivanov L.I. et al.** — Atomic Energy, 1980, vol. 48(5), p. 331.
61. **Hwang T., Fukuda M., Nogami S. et al.** — J. Nucl. Mater. Energy, 2016, vol. 9, p. 430.
62. **Van Veen A., Filius H.A., de Vries J. et al.** — J. Nucl. Mater., 1988, vol. 155—157, p. 1113.
63. **Poon M., Haasz A.A., Davis J.W.** — J. Nucl. Mater., 2008, vol. 374, p. 390.
64. **Bakaeva A., Terentyev D., De Temmerman G. et al.** — J. Nucl. Mater., 2016, vol. 479, p. 307.
65. **Eleveld H., van Veen A.** — J. Nucl. Mater., 1994, vol. B 212—215, p. 1421.

AUTHORS

Alimov V.Kh. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Leninsky prospect 31, 119071 Moscow, Russia; vkahome@mail.ru

Bobyry N.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Bobyr_NP@nrcki.ru

Spitsyn A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; spitsyn_av@nrcki.ru

Cherkez D.I. 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. 25—39