УДК 621.039.68

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ С ПРИМЕСЬЮ ГЕЛИЯ

*В.Х. Алимов^{1, 2}, А.В. Спицын³, Н.П. Бобырь³*¹*Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия*²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*³*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Снижение содержания трития в материалах термоядерных реакторов в процессе эксплуатации является важной задачей. Вольфрам рассматривается в качестве приоритетного материала для защиты дивертора и первой стенки перспективных термоядерных установок. При горении термоядерной плазмы вольфрам будет подвергаться воздействию интенсивных потоков ускоренных частиц дейтерия (D), трития (T) и гелия (He). В настоящей статье представлены результаты недавних (2008—2014 гг.) экспериментов, посвящённых накоплению дейтерия в вольфраме при облучении высокопоточной дейтериевой плазмой с примесью гелия, выполненных в Японском агентстве по атомной энергии (Япония), Институте физики плазмы Макса Планка (Германия) и НИЦ «Курчатовский институт» (Россия). Показано, что добавление ионов гелия в дейтериевую плазму значительно уменьшает содержание дейтерия как в вольфраме, не содержащем ионно-индуцированные дефекты, так и в радиационно повреждённом вольфраме по сравнению с содержанием дейтерия после облучения чистой дейтериевой плазмой. Обнаружено, что значительная часть дейтерия, захваченного первоначально в вольфраме после облучения дейтериевой плазмой, выделяется при последующем облучении протиевой плазмой. Однако в случае облучения образцов смешанной гелиево-протиевой плазмой количество выделяющегося дейтерия уменьшается по сравнению с облучением чистой протиевой плазмой.

Ключевые слова: вольфрам, дейтериевая плазма, гелий-дейтериевая плазма, накопление дейтерия, изотопный обмен водорода.

DEUTERIUM RETENTION IN TUNGSTEN EXPOSED TO HELIUM-SEEDED DEUTERIUM PLASMA. REVIEW OF RECENT EXPERIMENTAL RESULTS

*V.Kh. Alimov^{1, 2}, A.V. Spitsyn³, N.P. Bobyr³*¹*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russia*²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*³*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

Reduction of the tritium accumulation is important requirement for fusion reactor materials. Tungsten is promising material for protect a first wall of the vacuum chamber of fusion devices. The tungsten plates will be exposed to intense fluxes of accelerated of deuterium (D), tritium (T), helium (He) particles from fusion plasma. Results of recent studies (2008—2014) on deuterium retention in tungsten exposed to high flux helium-seeded deuterium plasma carried out in Japan Atomic Energy Agency (Japan), Max-Planck Institute for Plasma Physics (Germany) and NRC «Kurchatov Institute» (Russia) are summarized in the present review. It has been shown that addition of helium ions into the D plasma at elevated temperatures significantly reduces the D retention in tungsten, both without and with ion-induced defects, compared to that for the pure plasma exposure. It has been also found that significant part of deuterium initially retained in tungsten after deuterium plasma exposure is released during sequential exposure to protium plasma. However, exposure of the D-plasma-exposed W samples to helium-protium plasma reduces the amount of released deuterium as compared to pure protium plasma irradiation.

Key words: tungsten, deuterium plasma, deuterium retention, helium-seeded deuterium plasma, hydrogen isotope exchange.

ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение содержания трития в материалах термоядерных реакторов является на сегодняшний день 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*) с 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

третия в элементах реактора и расчёта параметров рециклинга дейтерия и трития в процесс эксплуатации термоядерной установки. Имеющиеся данные [3, 4] указывают на то, что содержание изотопов водорода в вольфрамовых материалах, облучённых плазмой с высоким значением плотности потока ионов (свыше 10^{21} ион/(м²·с)), реализуемых в условиях термоядерного реактора, значительно отличается в большую сторону от содержания изотопов водорода, вводимого в материал облучением ионами при невысоких значениях потока ионов (менее 10^{19} ион/(м²·с)). Именно поэтому наибольший практический интерес представляют результаты экспериментальных исследований процессов, происходящих в вольфраме при облучении дейтериевой плазмой с высокими значениями потока ионов (до 10^{22} ион/(м²·с)). Эти результаты были получены в последние годы объединённой группой российских, японских и европейских исследователей, использовавших для облучения плазму линейного генератора в Японском агентстве по атомной энергии [5—24] и установки ЛЕНТА в НИЦ «Курчатовский институт» [25, 26], а также исследователями, работавшими с плазменными линейными генераторами PISCES-A и PISCES-B в Калифорнийском университете в Сан-Диего [27—32].

В настоящей статье мы ограничимся лишь данными о влиянии гелиевой примеси в дейтериевой плазме на содержание изотопа водорода в вольфрамовых материалах. Кроме того, будут представлены результаты исследования обмена изотопов водорода в вольфраме после последовательного облучения низкоэнергетической дейтериевой и гелий-протиевой плазмой.

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В РАДИАЦИОННО НЕПОВРЕЖДЁННОМ ВОЛЬФРАМЕ

Влияние одновременного и последовательного облучения ионами D и He на содержание дейтерия в вольфраме изучалось ранее в ряде работ. Содержание дейтерия увеличивается при предварительном облучении ионами He с энергией в несколько кэВ [33—36], однако последовательное облучение вольфрама при 300 К ионами He и D энергией 500 эВ приводит к уменьшению содержания дейтерия примерно на 70% по сравнению с облучением только ионами D [37]. После одновременного облучения при 300 К ионами He и D энергией 500 эВ количество накопленного дейтерия сравнимо с количеством, полученным после облучения только ионами D. Но при этом присутствие приповерхностного гелия увеличивает содержание дейтерия в приповерхностном слое и подавляет диффузию дейтерия в объём материала [38].

Первые опубликованные результаты по изучению влияния введения гелия в дейтериевую плазму на формирование блистеров и содержание изотопа водорода в вольфраме в широком интервале температуры облучения (320—725 К) [6, 17] и при 573 К [29] показали, что введение ионов гелия в дейтериевую плазму значительно уменьшает содержание дейтерия в радиационно-неповреждённом вольфраме при повышенной температуре. В работах [6, 17] использовались рекристаллизованный вольфрам с размером зёрен от 20 до 200 мкм и поликристаллический механически-деформированный вольфрам с поверхностью, ориентированной перпендикулярно оси деформации (так называемый вольфрам для ИТЭР, или ITER-grade W). Микроструктура вольфрама марки ITER-grade состояла из зёрен, анизотропно удлинённых вдоль оси деформации — 1—3 мкм в сечении и до 5 мкм в длину. Между зёрнами наблюдались отдельные удлинённые трещины, появившиеся вследствие механической деформации.

Образцы вольфрама облучались как дейтериевой плазмой, состоящей из ионов D_2^+ (~70%) и D^+ (~30%), так и гелиево-дейтериевой плазмой, состоящей из ионов D_2^+ (~65%), D^+ (~25%) и He^+ (~10%) [39]. Потенциал смещения, прикладываемый к вольфрамовому образцу, составлял –80 В, и при потенциале плазмы около –4 В энергия ионов составляла ~76 эВ. Поток падающих ионов составлял $\sim 10^{22}$ D/(м²·с), доза облучения ионами дейтерия была $3 \cdot 10^{26}$ и 10^{27} D/м². Образец пассивно нагревался за счёт облучения плазмой, и температура облучения регулировалась подбором дисков с различной теплопроводностью, помещаемых между образцом и медным держателем, охлаждаемым водой. Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой, плотно прижатой к обратной стороне образца.

Профили распределения дейтерия в вольфрамовых образцах после плазменного облучения определялись методом ядерной реакции $D(^3He, p)^4He$. 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 полученная зависимость выхода протонов от энергии анализирующих ионов ^3He трансформировалась в профиль распределения дейтерия по глубине образца [40]. Общее содержание дейтерия и гелия в облучённых образцах определялось детектированием выделяющихся молекул квадрупольным масс-спектрометром высокого разрешения при линейном нагреве анализируемого образца. Изменение морфологии поверхности после облучения дейтериевой или гелиево-дейтериевой плазмой контролировалось сканирующим электронным микроскопом (СЭМ).

Облучение рекристаллизованного радиационно-неповреждённого вольфрама D-плазмой приводит к формированию блистеров¹ на поверхности образцов. Размеры блистеров и их поверхностная плотность зависят от температуры облучения (рис. 1, а, в). Следует отметить, что при температуре облучения D-плазмой свыше 700 К блистеры не формируются. Введение гелиевых ионов в дейтериевую плазму приводит к изменению характера блистерообразования. После облучения рекристаллизованного вольфрама He(10%)—D-плазмой при температуре 340—430 К плотность блистеров значительно уменьшается по сравнению с облучением D-плазмой (рис. 1, а, б). Облучение He(10%)—D-плазмой при температуре свыше 460 К не приводит к формированию блистеров (рис. 1, в) [6].

Профили распределения дейтерия по глубине в радиационно неповреждённом рекристаллизованном вольфраме после облучения D- и He(10%)—D-плазмой показаны на рис. 2. Показано, что присутствие ионов гелия в дейтериевой плазме значительно (более чем на два порядка величины) уменьшает концентрацию дейтерия на глубине от 0,5 до 7 мкм при температуре облучения 460 К и выше [6].

Значительное уменьшение содержания дейтерия при добавлении гелия в дейтериевую плазму наблюдается также и в поли-

Рис. 1. Поверхность рекристаллизованного вольфрама после облучения D-плазмой (рисунки а, в) и He(10%)—D-плазмой (рисунки б, г), снятая с помощью сканирующего электронного микроскопа. Облучение происходило с энергией ионов 76 эВ до дозы ионов $\Phi = 10^{27} \text{ D/m}^2$ при температуре 360 К (а), 345 К (б), 460 К (в) и 470 К (г). Масштабная метка (г) действительна для всех рисунков (СЭМ-изображения взяты из работы [6])

Рис. 2. Профили распределения дейтерия, захваченного в рекристаллизованном вольфраме после облучения D-плазмой ($T = 320$ (○), 460 (▲), 535 (▼), 820 (■), 725 К (☆)) (а) и He(10%)—D-плазмой ($T = 345$ (○), 470 (▲), 535 (▼), 630 (■), 725 К (☆)) (б) с энергией ионов 76 эВ до дозы ионов $\Phi = 10^{27} \text{ D/m}^2$ при различной температуре (рисунок взят из работы [6])

¹ Блистеры представляют собой пластичные куполообразные вспучивания поверхностного слоя, контуры которых имеют преимущественно круглую, но иногда и неправильную форму. Под крышкой блистера заключена полость чечевицеобразной или иной формы, в зависимости от микроструктуры материала [7, 16].

Рис. 3. Профили распределения дейтерия, захваченного в поликристаллическом механически-деформированном вольфраме после облучения D-плазмой ($T_{\text{обл}} = 460$ (●), 560 (▼), 640 (■), 720 K (★)) (a) и He(10%)—D-плазмой ($T_{\text{обл}} = 440$ (●), 540 (▼), 650 K (■)) (б) с энергией ионов 76 эВ до дозы ионов $\Phi = 3 \cdot 10^{26}$ D/m² при различных температурах (рисунок взят из работы [17])

Рис. 4. Количество захваченного дейтерия и гелия в рекристаллизованном вольфраме после облучения D-плазмой и He(10%)—D-плазмой с энергией ионов 76 эВ до дозы ионов $\Phi = 10^{27}$ D/m² при различной температуре (рисунок взят из работы [6]). Общее количество дейтерия и гелия определялось методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС), содержание дейтерия на глубине до 7 мкм измерялось методом ядерной реакции (ЯР): He (ТДС) — He—D-плазма (▲); D (ТДС/ЯР) — D-плазма (■/□), He—D-плазма (▲/△)

кристаллическом механически-деформированном вольфраме марки ITER-grade на глубине свыше 0,5 мкм (рис. 3).

Следует отметить, что после добавления гелия в дейтериевую плазму концентрация дейтерия в приповерхностных слоях (на глубине до 0,1—0,2 мкм) рекристаллизованного и поликристаллического механически-деформированного вольфрама увеличивается по сравнению с облучением чистой дейтериевой плазмой [6, 17] (см. рис. 2 и 3).

Количество захваченного дейтерия в вольфраме зависит от температуры облучения дейтериевой или гелий-дейтериевой плазмой. В рекристаллизованном вольфраме, облучённом дейтериевой плазмой, содержание дейтерия (т.е. количество захваченного в образце дейтерия) составляет около $2 \cdot 10^{21}$ D/m² при температуре облучения 330 K. С увеличением температуры облучения содержание дейтерия возрастает и достигает при 480 K максимального значения, равного около 10^{22} D/m². При дальнейшем возрастании температуры содержание дейтерия начинает падать и при температуре 800 K составляет около 10^{19} D/m² (рис. 4). Сравнение данных, полученных методами термодесорбционной спектроскопии и ядерной реакции, даёт основание полагать, что менее 50% захваченного дейтерия аккумулируется на глубине до 7 мкм [6].

Облучение дейтериевой плазмой с примесью гелия при температуре вольфрама ниже 350 K уменьшает на порядок содержание дейтерия в рекристаллизованном вольфраме по сравнению с облучением дейтериевой плазмой без примеси. Однако при температуре 400—600 K содержание дейтерия в случае облучения гелий-дейтериевой плазмой уменьшается на 2—3 порядка величины по сравнению с облучением дейтериевой плазмой без примеси гелия (см. рис. 4).

В этом случае совпадение данных о содержании дейтерия, полученных методами термодесорбционной спектроскопии и ядерной реакции (см. рис. 4), свидетельствует о том, что дейтерий накапливается, главным образом, в приповерхностных слоях, на глубине менее 7 мкм [6].

В случае облучения гелий-дейтериевой плазмой содержание гелия возрастает с увеличением температуры от $\sim 2 \cdot 10^{19}$ He/m² после облучения при 340 K до $\sim 3 \cdot 10^{20}$ He/m² при 810 K [6] (см. рис. 4).

При облучении вольфрама дейтериевой плазмой с энергией ионов ниже энергии, требуемой для генерации радиационных дефектов², происходят формирование блистеров и образование дефектов, которые могут захватывать и удерживать изотопы водорода. Как показали профили распределения дейтерия (см. рис. 2 и 3), глубина накопления дейтерия в вольфрамовых материалах, облучённых дейтериевой плазмой, достигает нескольких микрометров, что значительно больше глубины внедрения ионов (несколько нанометров). Концентрация дейтерия на глубине в несколько микрометров достигает сравнительно больших значений, равных 0,01—0,1% ат., в зависимости от температуры облучения. Для объяснения модификации подповерхностной структуры и формирования дефектов, захватывающих дейтерий, был предложен механизм пластической деформации, возникающей вследствие перенасыщения приповерхностного слоя атомами водорода [42, 43]. При перенасыщении приповерхностного слоя возникают сжимающие напряжения [42], снимаемые пластической деформацией. Эта деформация генерирует вакансии и вакансионные кластеры, а также межузлия и дислокационные петли. При длительном облучении дейтериевой плазмой вакансионные кластеры в зависимости от температуры вольфрама при облучении становятся зародышами трещин и/или газонаполненных полостей.

Как показано на примере рекристаллизованного вольфрама [7], при температуре облучения выше температуры перехода из хрупкого в пластичное состояние (при 370—470 К в зависимости от ориентации кристаллов [44]) мобильность дислокаций увеличивается и напряжение может релаксироваться 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 температуре меньше температуры перехода из хрупкого в пластичное состояние релаксация напряжения приводит к формированию трещин внутри зерна [7]. Можно предположить, что подобные явления наблюдаются и в поликристаллическом механически деформированном и горячекатаном вольфрамовых материалах.

Согласно работе [45] в приповерхностном слое вольфрама, облучённом низкоэнергетическими ионами гелия, формируются гелиевые пузырьки, создающие вокруг себя сжимающие напряжения. Основываясь на результатах, полученных при одновременном облучении вольфрама ионами гелия и водорода, в работе [46] предположили, что атомы водорода захватываются на периферии гелиевых пузырьков в зоне напряжения, что приводит к уменьшению потока мигрирующих в объём атомов дейтерия. Однако механизм формирования наноразмерных (от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров) гелиевых пузырьков при повышенной температуре облучения [47] может привести к развитию открытой пористости в приповерхностном слое [48] и создать облегчённые пути выхода на поверхность для внедряемых атомов водорода. При этом поток мигрирующих в объём атомов водорода существенно уменьшается, что приводит к уменьшению концентрации водорода в растворённом состоянии.

Увеличение концентрации дейтерия в приповерхностном слое вольфрама при облучении гелий-дейтериевой плазмой может быть объяснено захватом атомов дейтерия на периферии гелиевых пузырьков, формирующихся на глубине в несколько нанометров. Можно предположить, что одновременное уменьшение потока мигрирующих в объём атомов дейтерия приводит к значительному снижению величины сжимающих напряжений. При этом вероятность формирования дефектов вакансионного типа уменьшается и концентрация удерживаемого дейтерия значительно снижается.

Следует отметить, что одновременная имплантация гелия и дейтерия уменьшает поток диффундирующего в объём дейтерия только в том случае, когда глубина имплантации ионов He сравнима или больше глубины имплантации ионов D [49].

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДЕФЕКТЫ

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 дислокации [50, 51].

² Пороговая энергия смещения вольфрама E_d зависит от кристаллографического направления, и минимальная величина $E_d = 68 \pm 0,5$ эВ существует для ориентации $\langle 100 \rangle$. Основываясь на минимальной пороговой энергии смещения, минимальная энергия ионов дейтерия, необходимая для генерации радиационных дефектов, составляет 1600 эВ.

Одним из способов исследования влияния нейтронно-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 материал при последующем ионном или

Рис. 5. Профили распределения дейтерия, захваченного в радиационно-повреждённом вольфраме марки ITER-grade после облучения D-плазмой ($T_{\text{обл}} = 440$ (●), 540 (▼), 640 (■), 710 K (★)) (a) и He(10%)—D-плазмой ($T_{\text{обл}} = 445$ (●), 545 (▼), 640 (■),)) (б) до дозы ионов $3 \cdot 10^{26}$ D/m² при различных температурах (рисунок взят из работы [17]). На рисунках показан также профиль распределения радиационно-индуцированных повреждений (---), рассчитанный с помощью программы SRIM 2008.03 [54]

Рис. 6. Концентрация дейтерия (в единицах атомного отношения D/W) на глубине пика повреждения в радиационно повреждённом вольфраме марки ITER-grade, облучённом чистой D-плазмой и He(10%)—D-плазмой, в зависимости от температуры вольфрама при облучении (рисунок взят из работы [17]): D-плазма → ITER-grade W, $\Phi = 3 \cdot 10^{26}$ D/m² (●); D + He-плазма → ITER-grade W, $\Phi = 3 \cdot 10^{26}$ D/m² (★)

плазменном облучении, а также при выдержке в атмосфере газообразного дейтерия [8, 11, 12, 22, 23, 27, 28, 52, 53]. В дальнейшем вольфрам, облучённый ионами энергией несколько МэВ, будет именоваться как радиационно-повреждённый.

Первые экспериментальные результаты об удержании дейтерия в дефектах, предварительно создаваемых в вольфраме облучением ионами Si энергией 12 МэВ и затем облучённых He(5%)—D-плазмой энергией 90 эВ при температуре 473 и 773 K, были доложены в работе [27]. Было показано, что добавление гелия в дейтериевую плазму уменьшает содержание изотопа водорода в зоне ионно-индуцированных дефектов.

Зависимость содержания дейтерия в радиационно повреждённом вольфраме от температуры образца при облучении гелий-дейтериевой плазмой была детально исследована в работе [17]. Вольфрамовые образцы были облучены при комнатной температуре ионами W энергией 20 МэВ до дозы $1,4 \cdot 10^{18}$ W/m². В результате этого приповерхностный слой образцов был радиационно повреждён до 0,89 смещений на атом (сна) в пике профиля повреждений, находящегося на глубине 1,35 мкм. Профиль повреждений в вольфраме был рассчитан с помощью программы SRIM 2008.03 [54] с использованием пороговой энергии смещения $E_d = 90$ эВ [55].

Было показано, что генерация радиационно-индуцированных дефектов в вольфраме и последующее облучение как D-плазмой, так и He(10%)—D-плазмой значительно увеличивает концентрацию дейтерия на глубине до 2 мкм (т.е. в зоне радиационного индуцированного повреждения) (рис. 5).

Концентрация дейтерия на глубине пика повреждений $C_D^{\text{поврежд}}$ в радиационно повреждённом механически-деформированном вольфраме марки ITER-grade, облучённом чистой D-плазмой и смешанной He—D-плазмой при различных температурах, показана на рис. 6, который построен на основании данных из работы [17]. После облучения чистой D-плазмой при температуре выше 450 K величина $C_D^{\text{поврежд}}$ всегда выше, чем после облучения смешанной He—D-плазмой. С увеличением температуры величина $C_D^{\text{поврежд}}$ уменьшается как в случае облучения чистой D-плазмой, так и в случае облучения He—D-плазмой.

Как было сказано, одним из возможных механизмов, объясняющих это явление, является формирование гелиевых наноразмерных пузырьков в приповерхностном слое [45]. Формирование открытой гелиевой пористости приводит к увеличению потока дейтерия, выходящего из образца в процессе ионной имплантации. При этом напряжения, образующиеся вокруг несвязанных пузырьков, являются барьером для дейтерия, диффундирующего в объём материала [46]. 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 при одновременном облучении ионами дейтерия и гелия вероятность формирования открытой пористости увеличивается с возрастанием температуры вольфрама.

Вторым возможным механизмом является уменьшение концентрации вакансий вследствие роста гелиевых пузырьков и образования межузлий и дислокационных петель [56, 57]. При этом предполагается возможность взаимодействия вакансий с межузельными атомами, что приводит к уменьшению количества ловушек, способных захватывать дейтерий. Для проверки эффективности данного механизма были проведены следующие эксперименты [58].

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 $(3,7—5) \cdot 10^{22}$ He/м². 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 $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$.

Полученные результаты (рис. 7) показали, что профили распределения дейтерия в зоне дефектов, индуцированных облучением ионами W энергией 20 МэВ, практически не зависят от того, облучались впоследствии радиационно повреждённые образцы ионами гелия или нет. Таким образом, можно считать, что формирование пористости (как закрытой, так и открытой) и вследствие этого уменьшение 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.

Зависимость стационарной концентрации дейтерия, захваченного на радиационно-индуцированных дефектах, от концентрации атомов дейтерия в растворённом состоянии рассмотрена в работе [21]. При повышенной температуре, достаточной 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, занятых водородом, θ_i при температуре T определяется следующим уравнением [59]:

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

где θ_L — доля межузлий, занятых водородом; E_{bin} — энергия связи водорода с дефектом (разница энтальпий для атома водорода в растворённом состоянии и находящегося в ловушке); k — постоянная Больцмана. Отметим, что величина θ_i 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.

Рис. 7. Профили распределения дейтерия, захваченного в радиационно повреждённом вольфраме и облучённого ионами He энергией 1 кэВ, после выдержки образцов в атмосфере D₂ при температуре 673 К и давлении 100 кПа в течение 10 ч [58]: после облучения: $5 \cdot 10^{22}$ He/м² при 473 К (о); $3,7 \cdot 10^{22}$ He/м² при 623 К (Δ); $3,7 \cdot 10^{22}$ He/м² при 823 К (☆); показан также профиль распределения радиационно-индуцированных повреждений, рассчитанный с помощью программы SRIM 2008.03 [54]: — — — — — профиль повреждения; ● — без облучения ионами He

В процессе облучения мишени водородной плазмой величина C_{ss} определяется балансом между потоком внедряющихся атомов водорода $\alpha\phi_{in}$ и потоком водорода, выходящего из образца 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 выходящего водорода практически равны:

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

где C_{ss-s} — концентрация растворённого водорода непосредственно под поверхностью; σ — фактор шероховатости поверхности [60]; k_r — коэффициент поверхностной рекомбинации водорода. Следовательно

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

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 Сивертса

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

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

Эти уравнения показывают, что при повышенной температуре стационарная концентрация водорода, захваченного в радиационно-индуцированных дефектах, пропорциональна концентрации атомов дейтерия в растворённом состоянии.

ОБМЕН ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ И ГЕЛИЙ-ПРОТИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

В случае эксплуатации термоядерного реактора количество трития во всей вакуумной камере ИТЭР может достигать предельно допустимого безопасного значения 700 г [61, 62], вследствие этого необходим поиск путей удаления трития из компонентов, контактирующих с плазмой, при технологических остановках работы реактора. Одним из возможных путей удаления трития может быть изотопный обмен, т.е. замещение радиоактивного трития безопасным дейтерием или протием.

В недавно опубликованных работах по изотопному обмену водорода в вольфраме [15, 63] было показано, что при последовательном облучении D- и H-плазмой при температуре, близкой к комнатной, дейтерий выделяется из слоёв, расположенных на глубине до 1—2 мкм. При температуре выше 430 К выделение дейтерия происходит из поверхностного слоя глубиной до 6 мкм, и даже из более глубоких слоёв. При этом протий накапливается в дефектах, сформированных в вольфрамовой матрице в процессе первоначального облучения низкоэнергетичной (40—200 эВ) дейтериевой плазмой, и скорость накопления протия в уже существующих дефектах гораздо выше скорости накопления дейтерия при первоначальном облучении [63]. Этот факт ставит под сомнение возможность удаления трития до приемлемого уровня за счёт изотопного обмена, так как после первого цикла замещения трития (Т) другим изотопом водорода и при последующем облучении D—Т-плазмой вольфрамовая мишень вновь быстро накопит тритий.

Как было сказано, одним из существенных факторов, влияющих на накопление изотопов водорода в вольфраме при плазменном облучении, является присутствие ионов He в плазме. Было высказано предположение, что введение гелия в дейтериевую плазму приводит к формированию пористости в приповерхностном слое и эта пористость увеличивает долю реэмиссионного дейтерия, снижая таким образом поток атомов дейтерия, мигрирующих в объём материала. Вследствие этого концентрация изотопа водорода в растворённом состоянии уменьшается. Предполагая, что скорость изотопного обмена изотопов водорода существенно зависит от концентрации замещающего изотопа, можно ожидать, что присутствие ионов гелия в термоядерной дейтерий-тритиевой плазме существенно снизит скорость накопления трития в объёме вольфрама, ранее повреждённого как плазмой с высоким значением потока ионов, так и нейтронами. При этом также предполагается, что частичное удаление трития из повреждённого вольфрама будет периодически производиться вследствие изотопного обмена при воздействии дейтериевой плазмы, после чего вольфрам будет содержать преимущественно радиационно безопасный дейтерий.

Для проверки утверждения о том, что присутствие ионов гелия в термоядерной плазме существенно снижает скорость накопления трития в объёме вольфрама, предварительно повреждённого плазменным облучением, были проведены эксперименты по обмену изотопов водорода в радиационно неповреждённом рекристаллизованном вольфраме при последовательном облучении D- и He—H-плазмой [25, 26]. Вольфрам повреждался облучением дейтериевой плазмой. После последующего облучения H- или He—H-плазмой исследовалось изменение содержания дейтерия на глубине в несколько микрометров. Значительное уменьшение дейтерия в образцах предполагало увеличенное содержание замещающего изотопа (в случае описываемых лабораторных экспериментов — протия, а в случае термоядерной плазмы с содержанием гелия — дейтерия). Таким образом, незначительное содержание дейтерия в эксперименте свидетельствовало бы о возможности уменьшения содержания трития в повреждённом вольфраме в условиях термоядерного реактора.

Рекристаллизованный вольфрам (см. описание материала в разделе «Накопление дейтерия в радиационно неповреждённом вольфраме») облучался только D-плазмой, последовательно D- и H-плазмой и последовательно D- и He(10%)—H-плазмой на установке ЛЕНТА в НИЦ «Курчатовский институт». Образец нагревался за счёт облучения плазмой, и температура облучения регулировалась плотностью потока ионов, падающих на поверхность, а также расходом воды, охлаждающей медный держатель. Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой, плотно прижатой к обратной стороне образца. В процессе облучения температура образцов составляла 403 и 533 К. Энергия ионов, бомбардирующих поверхность, находилась в диапазоне 55—95 эВ. Поток падающих ионов дейтерия и протия для температуры 403 К составлял $1,8 \cdot 10^{20}$ D(H)/(м²·с), при этом доза облучения ионами дейтерия и протия фиксировалась на величине $3,3 \cdot 10^{24}$ D(H)/м². Поток падающих ионов для температуры 533 К составлял $4,8 \cdot 10^{20}$ D(H)/(м²·с), доза облучения ионами дейтерия (протия) $4,1 \cdot 10^{24}$ D(H)/м².

Проводилось последовательное облучение образцов: сначала пара образцов облучалась в D-плазме, затем один образец из пары облучался в H-плазме, а второй — в He(10%)—H-плазме. Для каждой температуры поток падающих ионов и интегральная доза облучения ионами изотопов водорода сохранялись в процессе каждого облучения.

Профили распределения дейтерия в вольфрамовых образцах после плазменного облучения определялись методом ядерной реакции $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ в Институте физики плазмы Макса Планка (Гархинг, Германия). Общее содержание дейтерия и гелия в облучённых образцах определялось детектированием выделяющихся молекул квадрупольным масс-спектрометром высокого разрешения при линейном нагреве анализируемого образца (ТДС-анализ) в МИФИ [64]. Изменение морфологии поверхности после облучения дейтериевой и протиевой плазмой контролировалось СЭМ.

Облучение рекристаллизованного вольфрама D-плазмой приводит к формированию блистеров на поверхности образцов. Размер блистеров и их поверхностная плотность зависят от температуры вольфрама при облучении (рис. 8, а, б). Последовательное облучение H-плазмой приводит к незначительному увеличению плотности блистеров на поверхности образцов при обеих температурах (рис. 8, в, г).

Из сравнения СЭМ-изображений рекристаллизованного вольфрама, полученных после облучения D-плазмой при потоке ионов около 10^{22} D/(м²·с) (см. рис. 1, а, в) и после облучения D-плазмой в установке ЛЕНТА при потоке ионов около $5 \cdot 10^{20}$ D/(м²·с) (см. рис. 8, а, б), можно сделать вывод о том, что с повышением потока ионов плотность блистеров возрастает и формирование конусообразных блистеров происходит при потоке около 10^{22} D/(м²·с).

Рис. 8. Поверхность рекристаллизованного вольфрама после облучения D-плазмой (а, б) и последующего дополнительного облучения H-плазмой (в, г). Облучение происходило с энергией ионов 55—95 эВ до дозы ионов $\Phi = (3,3\text{—}4,1) \cdot 10^{24}$ D(H)/м² в каждом случае при температуре образцов 403 К (а, в) и 533 К (б, г). Масштабная метка (б) действительна для всех рисунков (СЭМ-изображения взяты из работы [25])

Профили распределения дейтерия по глубине в радиационно-неповреждённом рекристаллизованном вольфраме после облучения только D-плазмой, после последовательного облучения D- и H-плазмой и после последовательного облучения D- и He(10%)—H-плазмой показаны на рис. 9. Сравнение профилей распределения дейтерия, измеренных после облучения только D-плазмой и после последовательного облучения D- и H-плазмой при температуре образцов 403 К (см. рис. 9, а), показывает, что при этой температуре глубина слоя, из которого выделяется дейтерий, достигает ~3 мкм. Однако при температуре облучения 533 К зона выделения дейтерия превышает глубину анализа методом ядерных реакций, т.е. достигает глубины более 8 мкм (см. рис. 9, б). При этом концентрация дейтерия уменьшается примерно на порядок величины (рис. 10, а), а количество удалённого дейтерия достигает 75%. Однако введение ионов He в H-плазму при температуре образцов 403 и 533 К значительно уменьшает количество удалённого дейтерия. При этом удаление дейтерия происходит, главным образом, на глубине до 1 мкм.

Данные о полном количестве дейтерия в образцах вольфрама после последовательного облучения как D- и H-плазмой, так и D- и (H—10%He)-плазмой, полученные методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) [64], хорошо согласуются с данными о содержании дейтерия в слое толщиной 8 мкм, полученными методом ядерных реакций (ЯР). После последовательного облучения D- и H-плазмой общее количество накопленного во всём образце дейтерия (ТДС-данные) превышает количество дейтерия, накопленного в слое 8 мкм, не более чем в 2 раза при температуре образца 403 К и в 4 раза при температуре образца 533 К. Этот факт указывает на существенное увеличение содержания дейтерия в приповерхностном слое (до 8 мкм) образцов, облучённых при температуре 403 и 533 К.

Рис. 9. Профили распределения дейтерия по глубине в рекристаллизованном вольфраме после облучения только D-плазмой (○), после последовательного облучения D- и H-плазмой (▲) и после последовательного облучения D- и He(10%)—H-плазмой (■) при температуре 403 (а) и 533 К (б) [26]

Как показано в работах [45, 47], в приповерхностном слое вольфрама, облучённого низкоэнергетическими ионами гелия, формируются гелиевые пузырьки. Создаваемые вокруг гелиевых пузырьков напряжения, захватывающие атомы изотопов водорода, а также открытая пористость, увеличивающая поток выходящего из образца изотопа водорода, приводят, в конечном итоге, к уменьшению потока мигрирующих в объём атомов изотопов водорода. Так как кинетика изотопного обмена зависит от температуры и концентрации замещающего изотопа водорода [21], можно предположить, что при температуре вольфрама при плазменном облучении 533 К формирование гелиевых пузырьков и развитие приповерхностной открытой пористости приводят к уменьшению концентрации протия в растворённом состоянии и скорость изотопного обмена существенно уменьшается. При температуре 403 К вероятность формирования пористости, по-видимому, невысока, и при этом концентрация протия в растворённом состоянии при облучении смешанной протий-гелиевой плазмой сравнима с подобной концентрацией протия при облучении чистой протиевой плазмой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При облучении вольфрама дейтериевой плазмой с энергией ионов ниже энергии, требуемой для генерации радиационных дефектов, происходят формирование блистеров и образование дефектов, которые могут захватывать и удерживать дейтерий. Для объяснения этих процессов авторами работ [42, 43] предложен механизм пластической деформации, возникающей вследствие перенасыщения приповерхностного слоя атомами дейтерия. В случае облучения вольфрама дейтериевой плазмой с примесью гелия в приповерхностном слое происходят формирование наноразмерных гелиевых пузырьков и развитие открытой пористости. При этом вероятность того, что внедрённые атомы дейтерия могут достигнуть открытой поверхности, сформировать молекулы и десорбироваться в вакуум в процессе ионной имплантации, значительно повышается. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение потока дейтерия, диффундирующего в объём вольфрама, и уменьшение концентрации дейтерия в растворённом состоянии. Кроме того, гелиевые пузырьки в приповерхностном слое могут способствовать диссипации напряжений, создаваемых перенасыщением приповерхностного слоя атомами дейтерия. Все эти процессы приводят к уменьшению вероятности пластической деформации (т.е. уменьшению вероятности формирования деформационно-индуцированных дефектов), что приводит, в свою очередь, к значительному уменьшению концентрации дейтерия в вольфраме на глубинах в несколько микрометров.

Дефекты смещения, генерируемые в вольфраме ионами H, Si, Fe, W энергией от сотен кэВ до 20 МэВ, значительно увеличивают содержание дейтерия в зоне повреждения после облучения как D-плазмой, так и смешанной He—D-плазмой. При этом в случае облучения вольфрама при температуре выше 450 К смешанной He—D-плазмой концентрация дейтерия в зоне повреждения ниже, чем в случае облучения чистой D-плазмой. Уменьшение концентрации растворённого дейтерия в случае облучения радиационно повреждённого вольфрама D-плазмой с добавкой ионов гелия вызывает уменьшение концентрации дейтерия, захваченного в радиационно-индуцированных дефектах.

При последовательном облучении дейтериевой и затем протиевой плазмой, а также при последовательном облучении дейтериевой и затем гелиево-протиевой плазмой при повышенной температуре вольфрама (403—533 К) происходит выделение дейтерия, предварительно накопленного в вольфраме. Однако в случае облучения гелий-протиевой плазмой количество выделяющегося дейтерия значительно меньше, чем при облучении чистой протиевой плазмой. Уменьшение потока мигрирующих в объём образца атомов протия при одновременном облучении ионами гелия и протия приводит к уменьшению концентрации этого изотопа в растворённом состоянии. При этом скорость изотопного обмена значительно снижается, что приводит к уменьшению количества выделяющегося дейтерия.

Рис. 10. Количество захваченного дейтерия в приповерхностном слое рекристаллизованного вольфрама толщиной 8 мкм после последовательного облучения только D-плазмой (○), D-плазмой и H-плазмой (▲) и D- и He(10%)—H-плазмой (★) при температуре 403 и 533 К [26]: а — данные получены методом ЯР; б — сравнение содержания дейтерия в приповерхностном слое вольфрама (данные получены методом ЯР) и во всём образце (данные получены методом ТДС) после последовательного облучения D- и H-плазмой и D- и He(10%)—H-плазмой при температуре 403 и 533 К, для каждого облучения доза ионов составляла $\Phi = 3,3 \cdot 10^{24} D/m^2$ при 403 К и $\Phi = 4,1 \cdot 10^{24} D/m^2$ при 533 К: D-плазма + H-плазма (ТДС) (△), D-плазма + He(10%)—H-плазма (ТДС) (★), D-плазма + H-плазма (ЯР) (▲), D-плазма + He(10%)—H-плазма (ЯР) (★)

REFERENCES

1. Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N., Coad J.P., Grisolia C., Haasz A.A., Hassanein A., Philipps V., Pitcher C.S., Roth J., Wampler W.R., Whyte D.G. — Nucl. Fusion, 2001, vol. 41, p. 1967.
2. Tobita K., Nishio S., Enoda M., Sato M., Isono T., Sakurai S., Nakamura H., Sato S., Suzuki S., Ando M., Ezato K., Hayashi T., Hayashi T., Hirose T., Inoue T., Kawamura Y., Koizumi N., Kudo Y., Kurihara R., Kuroda T., Matsukawa M., Mouri K., Nakamura Y., Nishi M., Nomoto Y., Ohmori J., Oyama N., Sakamoto K., Suzuki T., Takechi M., Tanigawa H., Tsuchiya K., Tsuru D. — Fusion Eng. Des., 2006, vol. 81, p. 1151.
3. Alimov V.Kh., Roth J. — Phys. Scripta, 2007, vol. T128, p. 6.
4. Skinner C.H., Haasz A.A., Alimov V.Kh., Bekris N., Causey R.A., Clark R.E.H., Coad J.P., Davis J.W., Doerner R.P., Mayer M., Pisarev A., Roth J., Tanabe T. — Fusion Sci. Technol., 2008, vol. 54, p. 891.
5. Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J., Komarov D.A., Lindig S., Isobe K., Nakamura H., Yamanishi T. — Adv. Mater. Res., 2009, vol. 59, p. 42.
6. Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J., Sugiyama K., Lindig S., Balden M., Isobe K., Yamanishi T. — Phys. Scripta, 2009, vol. T138, p. 014048.
7. Lindig S., Balden M., Alimov V.Kh., Yamanishi T., Shu W.M., Roth J. — Ibid., p. 014040.
8. Tyburska B., Alimov V.Kh., Ogorodnikova O.V., Schmid K., Ertl K. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 395, p. 150.
9. Alimov V.Kh., Nakamura H., Tyburska-Püschel B., Ogorodnikova O.V., Roth J., Isobe K., Yamanishi T. — Ibid., 2011, vol. 414, p. 479.
10. Alimov V.Kh., Tyburska B., Ogorodnikova O.V., Roth J., Isobe K., Yamanishi T. — Ibid., vol. 415, p. S628.
11. Ogorodnikova O.V., Tyburska B., Alimov V.Kh., Ertl K. — Ibid., p. S661.
12. Tyburska B., Alimov V.Kh., Ogorodnikova O.V., Ertl K., Schmid K., Roth J. — Ibid., p. S680.
13. Ogorodnikova O.V., Schwarz-Selinger T., Sugiyama K., Alimov V.Kh. — J. Appl. Phys., 2011, vol. 109, p. 013309.
14. Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J., Lindig S., Balden M., Isobe K., Yamanishi T. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 417, p. 572.
15. Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., 't Hoen M.H.J., Roth J., Hatano Y., Isobe K., Matsuyama M., Yamanishi T. — Phys. Scripta, 2011, vol. T145, p. 014037.
16. Lindig S., Balden M., Alimov V.Kh., Manhard A., Höschen C., Höschen T., Tyburska-Püschel B., Roth J. — Ibid., p. 014039.
17. Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., Hatano Y., Roth J., Isobe K., Matsuyama M., Yamanishi T. — J. Nucl. Mater., 2012, vol. 420, p. 370.
18. Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., Lindig S., Hatano Y., Balden M., Roth J., Isobe K., Matsuyama M., Yamanishi T. — Ibid., p. 519.
19. Tyburska-Püschel B., Alimov V.Kh. — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 123021.
20. Hatano Y., Shimada M., Otsuka T., Oya Y., Alimov V.Kh., Hara M., Shi J., Kobayashi M., Oda T., Cao G., Okuno K., Tanaka T., Sugiyama K., Roth J., Tyburska-Püschel B., Dorner J., Yoshida N., Futagami N., Watanabe H., Hatakeyama M., Kurishita H., Sokolov M., Katoh Y. — Ibid., p. 073006.
21. Hatano Y., Shimada M., Alimov V.Kh., Shi J., Hara M., Oya Y., Kobayashi M., Okuno K., Oda T., Cao G., Yoshida N., Futagami N., Sugiyama K., Roth J., Tyburska-Püschel B., Dorner J., Takagi I., Hatakeyama M., Kurishita H., Sokolov M. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S114.
22. Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K., Roth J., Tyburska-Püschel B., Dorner J., Shi J., Matsuyama M., Isobe K., Yamanishi T. — Ibid., p. S959.
23. Alimov V.Kh., Hatano Y., Tyburska-Püschel B., Sugiyama K., Takagi I., Furuta Y., Dorner Y., Fußeder M., Isobe K., Yamanishi T., Matsuyama M. — Ibid., vol. 441, p. 280.
24. Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K., Balden M., Oyaidzu M., Akamaru S., Tada K., Kurishita H., Hayashi T., Matsuyama M. — Ibid., 2014, vol. 454, p. 136.
25. Alimov V.Kh., Khripunov B.I., Spitsyn A.V., Khatano Yu., Golubeva A.V., Gureev V.M., Petrov V.B. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 3, p. 61 (in Russian).
26. Bobyr N.P., Alimov V.Kh., Khripunov B.I., Spitsyn A.V., Mayer M., Hatano Y., Golubeva A.V., Petrov V.B. — J. Nucl. Mater., 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.022>.
27. Wampler W.R., Doerner R.P. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 115023.
28. Wampler W.R., Doerner R.P. — Phys. Scripta, 2009, vol. T138, p. 14037.
29. Miyamoto M., Nishijima D., Ueda Y., Doerner R.P., Kurishita H., Baldwin M.J., Morito S., Ono K., Hanna J. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 065035.
30. Baldwin M.J., Doerner R.P., Nishijima D., Tokunaga K., Ueda Y. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 886.
31. Baldwin M.J., Doerner R.P., Wampler W.R., Nishijima D., Lynch T., Miyamoto M. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 59, p. 103021.
32. Nishijima D., Kikuchi Y., Nakatsuka M., Baldwin M.J., Doerner R.P., Nagata M., Ueda Y. — Phys. Scripta, 2011, vol. T145, p. 014053.
33. Iwakiri H., Morishita K., Yoshida N. — J. Nucl. Mater., 2002, vol. 307—311, p. 135.
34. Hino T., Koyama K., Yamauchi Y., Hirohata Y. — Fusion Eng. Des., 1998, vol. 39—40, p. 227.
35. Nagata S., Takahiro K. — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 135.
36. Nagata S., Tsuchiya B., Sugawara T., Shikama T. — Ibid., 2002, vol. 307—311, p. 1513.
37. Lee H.T., Haasz A.A., Davis J.W., Macaulay-Newcombe R.G. — Ibid., 2007, vol. 360, p. 196.
38. Lee H.T., Haasz A.A., Davis J.W., Macaulay-Newcombe R.G., Whyte D.G., Wright G.M. — Ibid., vol. 363—365, p. 898.

39. Luo G.-N., Shu W.M., Nakamura H., O'Hira S., Nishi M. — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, p. 4374.
40. Alimov V.Kh., Mayer M., Roth J. — Nucl. Instr. Meth., 2005, vol. B 234, p. 169.
41. Xu Q., Yoshiie T., Huang H.C. — Ibid., 2003, vol. B 206, p. 123.
42. Condon J.B., Schober T. — J. Nucl. Mater., 1993, vol. 207, p. 1.
43. Haasz A.A., Poon M., Davis J. — Ibid., 1999, vol. 266—269, p. 520.
44. Gumbsch P. — Ibid., 2003, vol. 323, p. 304.
45. Iwakiri H., Yasunaga K., Morishita K., Yoshida N. — Ibid., 2000, vol. 283—287, p. 1134.
46. Ueda Y., Fukumoto M., Yoshida J., Ohtsuka Y., Akiyoshi R., Iwakiri H., Yoshida N. — Ibid., 2009, vol. 386—388, p. 725.
47. Yoshida N., Iwakiri H., Tokunaga K., Baba T. — Ibid., 2005, vol. 337—339, p. 946.
48. Zalavutdinov R.Kh., Alimov V.Kh., Gorodetsky A.E., Zakharov A.P. — Phys. Scripta, 2009, vol. T138, p. 014046.
49. Ueda Y., Kashiwagi H., Fukumoto M., Ohtsuka Y., Yoshida N. — Fusion Sci. Technol., 2009, vol. 56, p. 85.
50. Barabash V., Federici G., Rödiger M., Snead L.L., Wu C.H. — J. Nucl. Mater., 2000, vol. 283—287, p. 138.
51. Iida H., Khripunov V., Petrizzi L., Federici G. ITER Nuclear Analysis Report G 73 DDD 2 W 0.2, 2004.
52. Fukumoto M., Kashiwagi H., Ohtsuka Y., Ueda Y., Taniguchi M., Inoue T., Sakamoto K., Yagyu J., Arai T., Takagi I., Kawamura T. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 572.
53. Wampler W.R., Rudakov D.L., Watkins J.G., Lasnier C.J. — Ibid., 2011, vol. 415, p. S653.
54. <http://srims.org>.
55. Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charge-Particle Irradiation, E521-96. — In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1996, vol. 12.02, p. 1.
56. Greenwood G.W., Foreman A.J.E., Rimmer D.E. — J. Nucl. Mater., 1959, vol. 1, p. 305.
57. Watanabe Y., Iwakiri H., Yoshida N., Morishita K., Kohyama A. — Nucl. Instr. Meth., 2007, vol. B 255, p. 32.
58. Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K., Tyburska-Püschel B., Oya M., Ueda Y., Isoke K., Hasegawa A. — J. Plasma Fusion Res. Series, 2015, vol. 11, p. 1.
59. Gibala R., Kumnick A.J. Hydrogen trapping in iron and steels. — In: Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. Eds. R. Gibala, R.F. Hehemann. — Metal Park, Ohio, American Society for Metals, 1984, pp. 61—77.
60. Ali-Khan I., Dietz K.J., Waelbroeck F.G., Wienhold P. — J. Nucl. Mater., 1978, vol. 76—77, p. 337.
61. Roth J., Tsitroni E., Loarte A., Loarer Th., Counsell G., Neu R., Philipps V., Brezinsek S., Lehnen M., Coad P., Grisolia Ch., Schmid K., Krieger K., Kallenbach A., Lipschultz B., Doerner R., Causey R., Alimov V., Shu W., Ogorodnikova O., Kirschner A., Federici G., Kukushkin A., EFDA PWI Task Force, ITER PWI Team, Fusion for Energy, ITPA SOL/DIV. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 1.
62. Roth J., Schmid K. — Phys. Scripta, 2011, vol. T145, p. 14031.
63. Roth J., Schwarz-Selinger T., Alimov V.Kh., Markina E.A. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 432, p. 341.
64. Bobyr N.P., Alimov V.Kh., Khripunov B.I., Efimov V.S., Spitsyn A.V., Mayer M., Gasparyan Yu.M., Golubeva A.V. — Phys. Proc., 2015 (submitted).

AUTHORS

Alimov V.Kh. A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Leninsky prospect 31, 119071 Moscow, Russia

Spitsyn A.V. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; spitsyn_av@nrcki.ru

Bobyr N.P. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 17 March 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 3, pp. 83—95.