УДК 621.039.63

ВЛИЯНИЕ ГЕЛИЕВОЙ ПРИМЕСИ НА ОБМЕН ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ И ПРОТИЙ-ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

В.Х. Алимов¹, Б.И. Хрипунов², А.В. Спицын², Ю. Хатано³, А.В. Голубева², В.М. Гуреев², В.Б. Петров²

¹Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Центр водородных исследований, Университет Тоямы, Тояма, Япония

В работе исследован обмен изотопов водорода в вольфраме в процессе последовательного облучения низкоэнергетической дейтериевой (D) и смешанной протий-гелиевой H—He-плазмой при температуре образцов 400 и 530 К. Концентрация дейтерия в образцах измерялась до глубины 7 мкм методом ядерных реакций с использованием реакции $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ при энергии анализирующих ионов $^3\text{He}^+$ от 0,69 до 4,5 МэВ. 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 H—He-плазмой количество выделяющегося дейтерия уменьшается по сравнению с облучением чистой протиевой плазмой.

Ключевые слова: вольфрам, детритизация, дейтериевая плазма, гелий-протиевая плазма.

INFLUENCE OF HELIUM ON HYDROGEN ISOTOPE EXCHANGE IN TUNGSTEN AT SEQUENTIAL EXPOSURES TO DEUTERIUM AND HELIUM-PROTIUM PLASMAS

V.Kh. Alimov¹, B.I. Khripunov², A.V. Spitsyn², Y. Hatano³, A.V. Golubeva², V.M. Gureev², V.B. Petrov²

¹A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute, Moscow, Russia

³Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, Toyama, Japan

Hydrogen isotopes exchange in tungsten was investigated after sequential irradiations by low energy deuterium (D) and mixed helium-protium H—He-plasmas at sample temperatures of 400 and 530 K. Deuterium depth profiles were measured by the $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ nuclear reaction with $^3\text{He}^+$ energies between 0.69 and 4.5 MeV allowing determination of the D concentration up to a depth of 7 μm . It was found that significant part of deuterium initially retained in tungsten after deuterium plasma exposure was 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, detritiation, deuterium plasma, helium-protium plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение накопления трития в материалах термоядерных реакторов является на сегодняшний день одним из основных требований к материалам, контактирующим с термоядерной плазмой [1, 2]. Благодаря таким качествам, как высокая температура плавления и высокая пороговая энергия физического распыления, вольфрам (W) является наиболее перспективным материалом для использования в качестве контактирующих с плазмой элементов дивертора. В процессе горения термоядерной плазмы вольфрам будет облучаться интенсивными потоками дейтерия и трития, а также ионами гелия энергией 3,5 МэВ и нейтронами энергией 14,1 МэВ, возникающими в результате D—T-термоядерной реакции. Имеющиеся данные [3, 4] указывают на то, что накопление изотопов водорода в вольфрамовых материалах, облучённых водородной плазмой с высоким значением потока ионов, может достигать значения около 10^{22} ат./м² при температуре облучения около 500 К, что значительно отличается от накопления водорода после облучения ионами водорода при невысоких значениях потока ионов. В случае эксплуатации термоядерного реактора накопление трития до значения $\sim 10^{22}$ ат./м² близко к предельному допустимому безопасному значению 700 г во всей вакуумной камере ИТЭР, и вследствие этого необходим поиск путей удаления трития из вольфрамовых 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.

Первые эксперименты по изотопному обмену водорода в процессе последовательного облучения ионами дейтерия и протия были проведены в жаростойких материалах с невысоким атомным номером (C, Si, B₄C, TiC, VB₂, TiB₂ и B) при комнатной температуре [5—9] и повышенной температуре [10], а также в стали AISI 316 при 153 К [11]. Наблюдаемый в этих экспериментах изотопный обмен хорошо описывается моделью локального смешивания [5], учитывающей глубину внедрения изотопов водорода и концентрацию насыщения изотопами водорода. В опубликованных недавно работах по изотопному обмену водорода в вольфраме [12, 13] показано, что при последовательном облучении дейтериевой и протиевой плазмой при температуре, близкой к комнатной, дейтерий выделяется из слоев, расположенных на глубине до 1—2 мкм. При температуре выше 430 К выделение дейтерия происходит из глубины до 6 мкм и даже из более глубоких слоев. При этом протий накапливается в дефектах, сформированных в вольфрамовой матрице в процессе первоначального облучения дейтериевой плазмой, и скорость накопления протия в уже существующих дефектах гораздо выше скорости накопления дейтерия при первоначальном облучении. Этот факт ставит под сомнение возможность эффективного удаления трития до приемлемого уровня за счёт изотопного обмена, так как после первого цикла замещения трития другим изотопом водорода и при последующем облучении D—T-плазмой вольфрамовая мишень вновь быстро накопит тритий.

Одним из существенных факторов, влияющих на накопление изотопов водорода в вольфраме при плазменном облучении, является присутствие ионов гелия в плазме. Было показано, что добавление гелия в дейтериевую плазму существенно уменьшает накопление дейтерия в вольфраме при повышенной температуре облучения (440—650 К) по сравнению с облучением чистой дейтериевой плазмой [14, 15]. Облучение содержащего радиационно-индуцированные дефекты вольфрама смешанной дейтерий-гелиевой плазмой при повышенной температуре приводит к меньшему накоплению дейтерия в зоне радиационных повреждений по сравнению с облучением чистой дейтериевой плазмой [16]. Высказано предположение, что введение гелия в дейтериевую плазму приводит к формированию открытой пористости в приповерхностном слое, и эта пористость увеличивает долю реэмиссионного дейтерия, снижая, таким образом, поток атомов дейтерия, мигрирующих в объём материала [14, 16]. Вследствие этого концентрация изотопа водорода в растворённом состоянии уменьшается. Предполагая, что скорость изотопного обмена изотопов водорода существенно зависит от концентрации замещающего изотопа [17], можно ожидать, что введение ионов гелия в тритиевую плазму (а такое и будет наблюдаться в реальных термоядерных условиях) существенно уменьшит скорость замещения радиоактивным тритием стабильного изотопа водорода, используемого в предыдущем цикле детритизации. Другими словами, можно ожидать, что присутствие ионов гелия в тритиевой плазме существенно снизит скорость накопления трития в вольфраме, ранее повреждённом как плазмой с высоким значением потока ионов [18], так и при нейтронном облучении [17].

Целью настоящей работы являлось изучение процессов изотопного обмена в вольфраме в случае последовательного облучения дейтериевой и смешанной протий-гелиевой плазмой.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе использовались образцы поликристаллического вольфрама чистотой 99,99% вес. и размером 10×10×2 мм, изготовленные компанией A.L.M.T. Corp. (Япония). Образцы после резки на пластины и полировки были рекристаллизованы при температуре около 2073 К в течение 1 часа. Размеры зёрен этого материала варьировались от 20 до 200 мкм.

Облучение образцов в дейтериевой, протиевой и смешанной протий-гелиевой плазме проводилось на установке ЛЕНТА, представляющей собой генератор стационарной плазмы, которая образуется в результате пучково-плазменного взаимодействия электронного пучка в аксиальном магнитном поле (0,2 Тл). Образцы вольфрама устанавливались сбоку от плазменного цилиндра ($D \sim 2$ см) таким образом, что поток плазмы поступал на поверхность вольфрама поперёк магнитного поля. На образцы подавался отрицательный потенциал смещения $U_{\text{см}}$, который в настоящей серии экспериментов поддерживался в диапазоне $U_{\text{см}} = -(60—135)$ В, определяя, таким образом, энергию ионов, бомбардирующих поверхность. Проводилось измерение тока плазменных ионов на мишень (образцы),

по которому определялось полное количество ионов, поступающих на мишень за время экспозиции образца. Плотность тока ионов составляла 2,5—21,5 мА/см². Температура образцов при облучении определялась величиной потока ионов и их энергией, выделяемой на мишени, поэтому указанные величины энергии и потока ионов устанавливались в соответствии с задачей получения на образцах заданных значений температуры. Температура измерялась термопарой, укрепленной в держателе и контактирующей с обратной стороной образцов. Держатель для крепления образцов сделан таким образом, что в него помещались одновременно два образца, располагающиеся вдоль оси плазменного столба во время облучения.

Проводилось последовательное попарное облучение образцов сначала в дейтериевой плазме, затем в противеой или смешанной протий-гелиевой плазме (H + 10% He). На образцах устанавливались заданные значения температуры 403 и 533 К, при которых и проведены все облучения данной серии экспериментов.

Профили распределения дейтерия в облученных вольфрамовых образцах определялись методом ядерных реакций $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$, при этом анализировались энергетические спектры α -частиц и протонов. Для определения концентрации атомов D на глубине более 0,5 мкм энергия анализирующих ионов ^3He варьировалась от 0,69 до 4,5 МэВ. Полученная зависимость выхода протонов от энергии анализирующих ионов трансформировалась с использованием программы SIMNRA в профиль распределения дейтерия до глубины 7 мкм [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Профили распределения дейтерия дают детальную информацию о глубинах, из которых высвобождается дейтерий в процессе последующего облучения противеой и протий-гелиевой плазмой. Из сравнения профилей распределения дейтерия, измеренных в вольфраме после облучения только дейтериевой плазмой и после последовательного облучения дейтериевой плазмой и противеой плазмой при одной и той же температуре 403 К (рис. 1), становится ясно, что при этой температуре облучения зона, из которой выделяется дейтерий, достигает глубины около 4 мкм. Однако при температуре облучения 533 К зона выделения дейтерия превышает глубину анализа методом ядерных реакций, т.е. достигает глубины более 7 мкм. При этом концентрация дейтерия уменьшается примерно на порядок величины (рис. 2).

Рис. 1. Профили распределения дейтерия по глубине в рекристаллизованном вольфраме после облучения при 403 К только дейтериевой плазмой, после последовательного облучения дейтериевой и противеой плазмой и после последовательного облучения дейтериевой и смешанной протий-гелиевой плазмой до одинаковой дозы облучения ионами изотопов $\Phi = 10^{24} \text{ D(H)}/\text{м}^2$: $\circ$ — D-плазма; $\blacktriangle$ — D-плазма + H-плазма; $\blacksquare$ — D-плазма + H—He-плазма

Рис. 2. Профили распределения дейтерия по глубине в рекристаллизованном вольфраме после облучения при 533 К только дейтериевой плазмой, после последовательного облучения дейтериевой и противеой плазмой и после последовательного облучения дейтериевой и смешанной протий-гелиевой плазмой до одинаковой дозы облучения ионами изотопов $\Phi = 10^{24} \text{ D(H)}/\text{м}^2$: $\circ$ — D-плазма; $\blacktriangle$ — D-плазма + H-плазма; $\blacksquare$ — D-плазма + H—He-плазма

Введение ионов гелия в противеую плазму при последовательном облучении дейтериевой и противеой плазмой при 403 К приводит к незначительному уменьшению выделяющего дейтерия по сравнению

с выделением при последовательном облучении чистой протиевой плазмой (см. рис. 1). Однако при 533 К последовательное облучение вольфрама дейтериевой и протий-гелиевой плазмой не вызывает существенного выделения дейтерия (см. рис. 2).

Количество дейтерия, накопленного в приповерхностном слое толщиной 7 мкм в рекристаллизованном вольфраме после облучения только дейтериевой плазмой, после последовательного облучения дейтериевой и протиевой плазмой и после последовательного облучения дейтериевой и смешанной протий-гелиевой плазмой в зависимости от температуры облучения, показано на рис. 3. Доля дейтерия, выделяющегося из вольфрама, предварительно облученного дейтериевой плазмой, при последующем облучении протиевой плазмой составляет ~50% при температуре облучения $T_{\text{обл}} = 403$ К и ~90% при $T_{\text{обл}} = 533$ К. Введение гелия в протиевую плазму уменьшает долю выделившегося дейтерия примерно до 45% при $T_{\text{обл}} = 403$ К и примерно до 15% при $T_{\text{обл}} = 533$ К. Таким образом, введение ионов гелия в протиевую плазму незначительно уменьшает вероятность изотопного обмена при $T_{\text{обл}} = 403$ К, однако при $T_{\text{обл}} = 533$ К вероятность изотопного замещения существенно уменьшается.

Рис. 3. Количество дейтерия, накопленного до глубины 7 мкм в рекристаллизованном вольфраме после облучения только дейтериевой плазмой, после последовательного облучения дейтериевой и протиевой плазмой и после последовательного облучения дейтериевой и смешанной протий-гелиевой плазмой до одинаковой дозы облучения ионами изотопов $\Phi = 10^{24}$ D(H)/м² в зависимости от температуры облучения: $\circ$ — D-плазма; $\star$ — D-плазма + H-плазма; $\blacksquare$ — D-плазма + H—He-плазма

сжимающие напряжения [21], снимаемые пластической деформацией. Эта деформация генерирует дефекты вакансионного типа и дислокации [21]. 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 [20], при температуре облучения выше температуры перехода из хрупкого в пластичное состояние (при 370—470 К, в зависимости от ориентации кристаллов [23]) подвижность дислокаций увеличивается и напряжение может релаксировать 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 мкм. Однако при температуре, близкой к комнатной, т.е. при температуре меньше температуры перехода из хрупкого в пластичное состояние, релаксация напряжения приводит к формированию трещин внутри зерна [20]. Можно предположить, что подобные явления наблюдаются и в поликристаллическом механически деформированном и горячекатаном вольфрамовых материалах.

Исследование облучённых образцов вольфрама методом электронной микроскопии подтвердило высказанные предположения. На поверхности всех образцов, облучённых при температуре 400 К, наблюдаются единичные блистеры размером до 0,5 мкм (рис. 4), и их количество после повторного облучения протий-гелиевой плазмой незначительно возрастает (рис. 5, б). На поверхности всех образцов, облучённых при температуре 530 К, наблюдается высокая концентрация блистеров размером 0,5—1,5 мкм

В вольфрамовых материалах, облучённых дейтериевой плазмой, глубина накопления дейтерия, равная нескольким мкм, значительно больше глубины внедрения ионов (несколько нм). Концентрация дейтерия на глубинах в несколько мкм достигает сравнительно больших значений, равных 0,01—0,1% ат., в зависимости от температуры облучения [4, 20]. Механизм пластической деформации, возникающей вследствие перенасыщения приповерхностного слоя атомами водорода [21], предложен для объяснения модификации подповерхностной структуры и формирования дефектов, захватывающих дейтерий [22, 23]. При перенасыщении приповерхностного слоя возникают

(рис. 6), при этом дополнительное облучение протиевой или протий-гелиевой плазмой не приводит к заметному изменению концентрации блистеров на поверхности.

Результаты, представленные в настоящей работе, показывают, что при последовательном облучении протиевой плазмой вольфрама, предварительно облучённого дейтериевой плазмой, значительная доля предварительно накопленного дейтерия выделяется и заменяется протием. Введение ионов гелия в протиевую плазму при температуре облучения 403 К незначительно уменьшает количество выделяющегося дейтерия, тогда как при 533 К это уменьшение уже существенно.

а

Рис. 4. Поверхность образца вольфрама, облучённого дейтериевой плазмой при температуре 400 К (доза $2,7 \cdot 10^{20}$ ат.Д/см²). Блистеры выделены красными прямоугольниками

б

Рис. 5. Поверхность образцов вольфрама, облучённого при температуре 400 К последовательно: а — дейтериевой и протиевой плазмой (доза $1,3 \cdot 10^{20}$ и $1,7 \cdot 10^{20}$ ат.Д/см² соответственно); б — дейтериевой и гелий-протиевой плазмой (доза $1,2 \cdot 10^{20}$ и $1,4 \cdot 10^{20}$ ат.Д/см² соответственно)

Согласно работе [24] в приповерхностном слое вольфрама, облучённом низкоэнергетическими ионами гелия, формируются гелиевые пузырьки. Основываясь на результатах, полученных при одновременном облучении вольфрама ионами гелия и водорода, авторы работы [25] предположили, что атомы водорода захватываются на периферии гелиевых пузырьков, что приводит к уменьшению потока мигрирующих в объём атомов дейтерия. Динамический механизм формирования наноразмерных гелиевых пузырьков при повышенной температуре облучения может привести к развитию открытой пористости в приповерхностном слое и создать облегчённые пути выхода на поверхность для внедряемых атомов изотопа водорода. При этом поток мигрирующих в объём атомов водорода существенно уменьшается, что приводит к уменьшению концентрации водорода в растворённом состоянии.

Как было сказано, кинетика изотопного обмена зависит от температуры и концентрации замещающего изотопа водорода [17]. При температуре облучения 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 открытой пористости, по-видимому, невысока, и при этом концентрация

Рис. 6. Поверхность образца вольфрама, облучённого дейтериевой плазмой при температуре 530 К (доза $1,2 \cdot 10^{20}$ ат.Д/см²)

протия в растворённом состоянии при облучении смешанной протий-гелиевой плазмой сравнима с подобной концентрацией протия при облучении чистой протиевой плазмой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс обмена изотопов водорода исследован в рекристаллизованном вольфраме при последовательном облучении дейтериевой и протиевой плазмой и при последовательном облучении дейтериевой и протий-гелиевой плазмой при различной температуре облучения. Значительная доля дейтерия, предварительно накопленного в вольфраме, выделяется при последовательном облучении низкоэнергетическими ионами протия. Введение ионов гелия в протиевую плазму уменьшает количество выделяющегося дейтерия.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (контракт № 11.519.11.1002), а также в рамках гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ № НШ-5044.2012.2. Авторы благодарят коллектив отдела Е2М Института физики плазмы общества Макса Планка (г. Гархинг, Германия) за предоставленную возможность проведения ядерно-физических экспериментов.

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., Enoeda 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. 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.
4. Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J., Lindig S., Balden M., Isobe K., Yamanishi T. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 417, p. 572.
5. Doyle B.L., Wampler W.R., Brice D.K., Picraux S.T. — J. Nucl. Mater., 1980, vol. 93 & 94, p. 551.
6. Underwood M.C., Erents S.K., Hotston E.S. — J. Nucl. Mater., 1980, vol. 93 & 94, p. 575.
7. Roth J., Scherzer B.M.U., Blewer R.S., Brice D.K., Picraux S.T., Wampler W.R. — J. Nucl. Mater., 1980, vol. 93 & 94, p. 601.
8. Wampler W.R., Magee C.W.J. — Nucl. Mater., 1981, vol. 103 & 104, p. 509.
9. Boutard D., Möller W., Scherzer B.M.U. — Radiat. Effects, 1990, vol. 114, p. 281.
10. Doyle B.L., Wampler W.R., Brice D.K. — J. Nucl. Mater., 1981, vol. 103 & 104, p. 513.
11. Blewer R.S., Behrisch R., Scherzer B.M.U., Schulz R. — J. Nucl. Mater., 1978, vol. 76 & 77, p. 305.
12. Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., 't Hoen M.H.J., Roth J., Hatano Y., Isobe K., Matsuyama M., Yamanishi T. — Phys. Scr., 2011, vol. 145, p. 014037.
13. Roth J., Schwarz-Selinger T., Alimov V.Kh., Markina E.A. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 432, p. 341.
14. Alimov V.Kh., Shu W.M., Roth J., Sugiyama K., Lindig S., Balden M., Isobe K., Yamanishi T. — Physica Scripta, 2009, vol. 138, p. 014048.
15. Baldwin M.J., Doerner R.P., Wampler W.R., Nishijima D., Lynch T., Miyamoto M. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 103021.
16. Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., Hatano Y., Roth J., Isobe K., Matsuyama M., Yamanishi T. — J. Nucl. Mater., 2012, vol. 420, p. 370.

17. **Hatano Y., Shimada M., Alimov V.Kh., Shi J., Hara M., Nozaki T., 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.A.** — J. Nucl. Mater., vol. 438, p. S114.
18. **Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B., Lindig S., Hatano Y., Balden M., Roth J., Isobe K., Matsuyama M., Yamanishi T.** — J. Nucl. Mater., 2012, vol. 420, p. 519.
19. **Alimov V.Kh., Mayer M., Roth J.** — Nucl. Instr. and Meth. B, 2005, vol. 234, p. 169.
20. **Lindig S., Balden M., Alimov V.Kh., Yamanishi T., Shu W.M., Roth J.** — Phys. Scr., 2009, vol. 138, p. 014040.
21. **Condon J.B., Schober T.** — J. Nucl. Mater., 1993, vol. 207, p. 1.
22. **Haasz A.A., Poon M., Davis J.** — J. Nucl. Mater., 1999, vol. 266—269, p. 520.
23. **Gumbsch P.** — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 323, p. 304.
24. **Iwakiri H., Yasunaga K., Morishita K., Yoshida N.** — J. Nucl. Mater., 2000, vol. 283—287, p. 1134.
25. **Ueda Y., Fukumoto M., Yoshida J., Ohtsuka Y., Akiyoshi R., Iwakiri H., Yoshida N.** — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 725.

AUTHORS

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

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

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

Hatano Y. Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, 930-8555, Toyama, Japan

Golubeva A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

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

Petrov V.B. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 3 June 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 3, pp.61—67