

УДК 533.924

Удержание и транспорт водорода в напыленных слоях контактирующих с плазмой материалов ИТЭР при плазменном облучении

**С. С. Довганюк, А. С. Каплевский, Н. Н. Касимова,
Л. Б. Беграмбеков**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
dovganukss@gmail.com

В статье проведено экспериментальное исследование процессов удержания и транспорта водорода в напыленных на вольфрам W-Al слоях при их осаждении и плазменном облучении. Обнаружено, что слои W, Al, а также W-Al слои захватывают водород при напылении, который десорбируется при значительной температуре в интервале 1200–1600 К. Показано, что наблюдаемая интенсивная десорбция водорода при высокой температуре связана с образованием ловушек, локализованных в интерметаллических соединениях вольфрама с бериллием и алюминием.

1. Введение

Известно, что различные металлы в определенных условиях могут образовывать бинарные интерметаллические соединения [1, 2], особенностью которых может быть изменение каких-либо физических свойств, сильно отличных от свойств характерных для исходных металлов, участвующих в образовании соединения. С помощью методов плазменного нанесения покрытий может быть значительно повышена скорость получения интерметаллических соединений в виде слоев и функциональных покрытий.

При работе Исследовательского Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР) распыленные плазмой атомы бериллиевой (Be) первой стенки и вольфрамового (W) дивертора будут формировать вольфрам-бериллиевые (W-Be) слои на контактирующих с плазмой поверхностях. Такие слои способны захватывать большие количества изотопов водорода, в том числе, трития, содержание которого в установке лимитировано. Это обстоятельство делает актуальным исследование закономерностей захвата, удержания и транспорта

изотопов водорода в W-Be слоях, которые практически не изучены, в отличие от тех же закономерностей для металлического бериллия и вольфрама.

Бериллий – токсичный материал, поэтому работа с ним требует наличия специального лабораторного оборудования. В работе [3] был проведен сравнительный обзор химических и физических свойств алюминия и бериллия. Авторы пришли к выводу, что алюминий в некоторых случаях может являться потенциальным заменителем бериллия.

Количество образцов вольфрама с бериллиевым покрытием, которые находились в нашем распоряжении, не было достаточно для выполнения всей программы экспериментов. Поэтому в данной работе в качестве материала-заменителя бериллия использовался алюминий.

В работе проведено экспериментальное исследование процессов удержания и транспорта водорода в вольфрам-алюминиевых слоях (далее W-Al слой) на вольфраме при их напылении и плазменном облучении.

2. Методика экспериментов

Исследования захвата и удержания изотопов водорода в W-Al пленках проводилось методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) на установке «МИКМА» [4]. Установка включает в себя три последовательно соединенные вакуумные камеры (камера атомарного облучения, камера плазменного облучения и камера ТДС анализа) и позволяет облучать исследуемые образцы атомами изотопов водорода и водородной плазмой и измерять количество захваченных частиц методом ТДС. Давление остаточного газа в плазменной и ТДС камерах установки не превышало $3 \cdot 10^{-3}$ Па и $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па, соответственно.

2.1. Методика подготовки образцов

Используемые в данной работе образцы можно разделить на три группы.

Первая группа образцов – поликристаллические пластинки металлов Al и W, размерами $7 \times 7 \times 2$ мм³ и $7 \times 7 \times 1$ мм³, соответственно. Перед экспериментами образцы механически полировались гибкими абразивами на бумажной основе с размером зерна до 2-3 мкм и промывались в ультразвуковой спиртовой ванне.

Вторая группа образцов – поликристаллические вольфрамовые подложки с нанесенными слоями Be и Al. Слои бериллия толщиной 100 ± 10 нм осаждались на полированные подложки из поликристаллического вольфрама марки Plansee размером $7 \times 7 \times 0,2$ мм³ в Национальном институте лазерной, плазменной и радиационной физики (Бухарест, Румыния). Слои формировались испаренными атомами бериллиевой мишени, расплавленной методом термоионной вакуумной дуги [5].

Слои алюминия толщиной 200 ± 10 нм осаждались на подложки из поликристаллического вольфрама марки PW99,95 (АО «Полема») размером

$7 \times 7 \times 1$ мм³ в НИЯУ МИФИ (Москва, Россия). Образцы вольфрама механически полировались гибкими абразивами на бумажной основе с размером зерна до 2-3 мкм, промывались в ультразвуковой спиртовой ванне, а затем отжигались при давлении $\leq 5 \cdot 10^{-6}$ Па при температуре 1600 К для того, чтобы удалить «технологический» водород. Давление остаточного газа во время напыления не превышало $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Слои формировались на образцах при температуре 450–500 К атомами алюминия, распыляемыми с алюминиевой мишени ионами аргоновой плазмы самостоятельного газового разряда, создаваемого между анодом и накальным вольфрамовым катодом. Ток разряда и потенциал на распыляемой мишени могли варьироваться в широком диапазоне, что позволяло подбирать режимы напыления индивидуально для каждого материала, в зависимости от необходимой толщины слоев и скорости осаждения. Параметры напыления слоев алюминия: давление остаточного газа $p_{\text{ост}} \leq 8 \cdot 10^{-4}$ Па, температура подложек $T = 400$ К, давление рабочего газа (аргон) $p = 2,0 \cdot 10^{-1}$ Па, скорость осаждения пленок $V = 200$ нм/ч.

Третья группа образцов – поликристаллические вольфрамовые подложки с нанесенными бинарными вольфрам-алюминиевыми слоями состава: X, ат. % W – (100-X), ат. % Al, где X = (85, 50, 15) ± 5 %. W-Al слои осаждались на подложки поликристаллического вольфрама марки PW99,95 (АО «Полема») размером $7 \times 7 \times 1$ мм³ в НИЯУ МИФИ (Москва, Россия), процедура подготовки которых была аналогична вольфрамовым подложкам для нанесения Al слоев. Напыление пленок производилось при схожих с напылением Al пленок параметрах. В данном случае ионы аргоновой плазмы распыляли не только алюминиевую мишень, но и вольфрамовую. Варьирование потенциала на мишенях позволяло получить требуемые концентрации напыляемых слоев.

Рельеф и состав поверхности всех образцов анализировались с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN Vega 3, снабженного модулем энергодисперсионного рентгеновского анализа INCA-xAct (Oxford Instruments).

2.2. Методика облучения образцов плазмой

Для выявления особенностей захвата и удержания изотопов водорода при ионном облучении бинарных W-Al слоев на вольфраме на установке «МИКМА» проводилось облучение ионами дейтериевой плазмы.

Дейтерий имплантировался в W-Al слои, напыленные на вольфрамовую подложку, облучением ионами дейтериевой плазмы с энергией 50 эВ/ат. Плазма состояла в основном из ионов D_2^+ (82–85 %), оставшаяся часть состояла из ионов D_1^+ и D_3^+ . Поэтому, экспериментальные результаты анализировались, предполагая, что образцы облучаются только ионами D_2^+ . Параметры имплантации были следующими: плотность потока ионов $j = 3,7 \cdot 10^{19}$ ат/м² · с, доза облучения $\Phi = 1,3 \cdot 10^{23}$ ат/м², температура образцов во время облучения

$T = 500$ К. Затем методом ТДС определялось количество изотопов водорода, содержащихся в образцах после имплантации дейтерия.

2.3. Методика проведения ТДС анализа

Скорость нагрева образцов при ТДС анализе составляла 5 К/с. Температура образцов во время облучения в плазме и при ТДС анализе измерялась с помощью W-Re термопары, приваренной к образцам. Масс-спектрометр регистрировал скорость десорбции молекул H_2 , HD, D_2 , H_2O , HDO и D_2O из образца в процессе нагрева. Десорбция других молекул, содержащих водород или дейтерий, была незначительной. Образцы нагревались до температуры, при которой прекращалась десорбция молекул, содержащих изотопы водорода. Для W , Al и W-Al слоев на вольфраме максимальная температура нагрева составляла 1600 К. При ТДС анализе пластинки Al она нагревалась до температуры 900 К, чтобы не допустить ее плавления.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Захват водорода при напылении алюминиевых и бериллиевых пленок

На рис. 1 приведены ТДС спектры дейтерия, захваченного в пластинки алюминия (Al) и вольфрама (W) (без напыленных слоев) после облучения ионами дейтериевой плазмы. Видно (рис. 1), что основные максимумы термодесорбции дейтерия имеют температуры 650 и 870 К для алюминия и вольфрама, соответственно. То есть водород захватывается в ловушки, связанные с атомами алюминия и вольфрама (далее Al-ловушки и W-ловушки). Положение максимума десорбции дейтерия из W было найдено из литературных источников. В работе [6] авторы облучали поликристаллический W ионами дейтерия ($E = 40$ эВ/ат), при этом при ТДС анализе максимум термодесорбции дейтерия наблюдался при температуре 900 К.

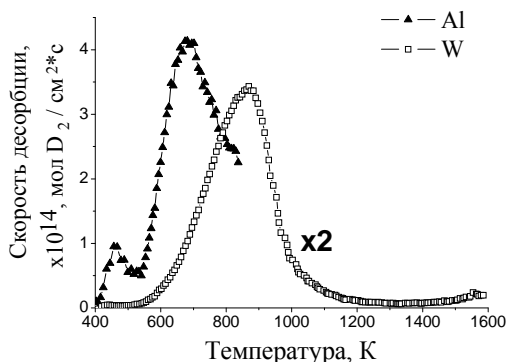


Рис. 1. ТДС спектры дейтерия из пластинок Al и W, облученных ионами дейтериевой плазмы

На рис. 2 приведены результаты ТДС анализа образцов слоев Be и Al, напыленных на вольфрам. Видно (рис. 2), что большая часть захваченного при напылении водорода десорбируется в диапазоне температур 1200–1600 К, что сильно отличается от найденных ранее положений максимумов для этих металлов.

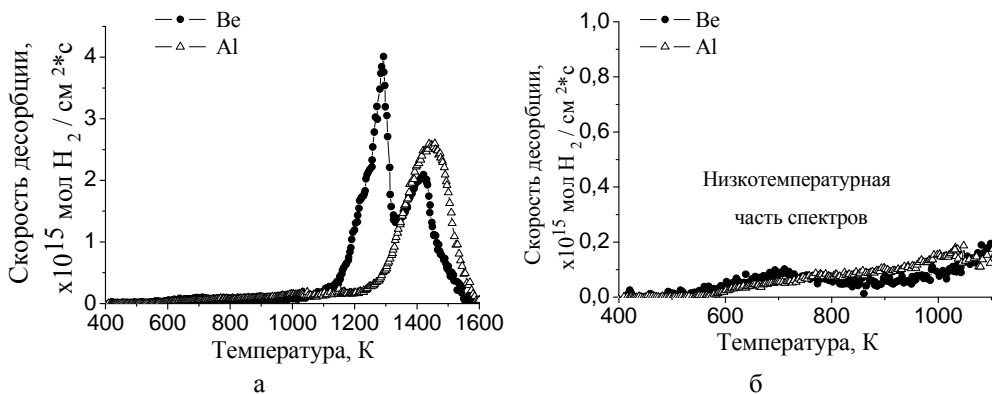


Рис. 2. ТДС спектры водорода, захваченного в процессе напыления слоев Al и Be толщиной 200 нм на вольфрам (а), а также их низкотемпературная часть (б)

Можно предположить, что наблюдаемое значительное увеличение температуры десорбции водорода из Be и Al при напылении слоев этих металлов на вольфрам связано с образованием новых соединений, которые формируются при взаимодействии напыляемых слоев с вольфрамовой подложкой.

Согласно фазовым диаграммам макросистем W-Al и W-Be [1, 2] при определенных условиях могут существовать интерметаллические соединения. Например, авторы в работе [7] выдерживали в вакууме при различных временах и температурах образцы пленок вольфрама толщиной 200 нм, напыленных на бериллий в магнетронной распылительной системе. На основе анализа методом Резерфордского обратного рассеяния авторы сделали вывод, что при повышении температуры до 1070 К происходит диффузия вольфрама в бериллий, а за время выдержки при такой температуре в течение 600 минут вольфрам диффундирует в бериллий более чем на 1,5 мкм и происходит образование интерметаллического соединения $Be_{12}W$. В работе [8] пленка Be толщиной ~ 1 нм наносилась на вольфрам испарительным методом (температура подложки при напылении – 300 К). Анализ поверхности образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии выявил, что после напыления пленки образовывалось соединение Be_2W . Дальнейший отжиг образцов до температур 770, 870 и 970 К приводил к увеличению содержания интерметаллических соединений на их поверхности. В работе [9] наблюдалось образование интерметаллических соединений в системе W-Al. W-Al пленки с различной концентрацией компонент наносились на подложку из алюминиевой керамики в магнетронной распылительной системе. Напыленная пленка имела термостабильную до 673 К аморфную структуру. При

увеличении концентрации вольфрама в пленке до соотношения $Al:W = 1:1$, структура пленки менялась и представляла из себя смесь остаточной аморфной фазы и кристаллической структуры (возможно соединений $Al_{12}W$, Al_5W и Al_4W). Однако при нанесении W-Al пленок с преобладающей алюминиевой компонентой на кремниевую подложку образование интерметаллических соединений не наблюдалось. В работе [10] авторы утверждают, что исследование кинетики кристаллизации связано с понятием энергии активации, а величина этой энергии при кристаллизации аморфного твердого вещества связана с процессами зарождения и роста кристаллов. Основываясь на теории Джонсона – Меля – Аврамы – Колмогорова, авторы рассчитали энергию активации для различных соединений W-Al и пришли к выводу, что соединение Al_4W обладает наименьшей энергией активации и, как следствие, имеет большую скорость образования. Данный расчет был подтвержден результатами рентгеноструктурного анализа после прогрева до 1000 К образцов с напыленными W-Al биметаллическими пленками с преобладающей алюминиевой компонентой.

Суммируя результаты анализа ТДС спектров водорода из вольфрама с Al и Be слоями (рис. 2) и указанный выше обзор работ по анализу структур W-Al и W-Be соединений, можно предположить, что наблюдаемая интенсивная десорбция водорода при высокой температуре 1200–1600 К из напыленных на вольфрам слоев Al и Be связана с образованием ловушек, локализованных в интерметаллических соединениях.

Далее анализ влияния состава двухкомпонентных слоев на захват в них изотопов водорода при напылении проводился с образцами W-Al слоев на вольфраме (напыление W-Be слоев на вольфрам было невозможно в силу соображений безопасности и технических ограничений). Для этого были изготовлены образцы с двухкомпонентными W-Al слоями различных составов: X, % ат. W – (100-X), % ат. Al, где X = (15, 50, 85) ± 5 %. На рис. 3 приведены спектры десорбции водорода, захваченного при напылении W-Al слоев на вольфрам. По характеру десорбции представленные спектры (рис. 3) можно разделить на две группы.

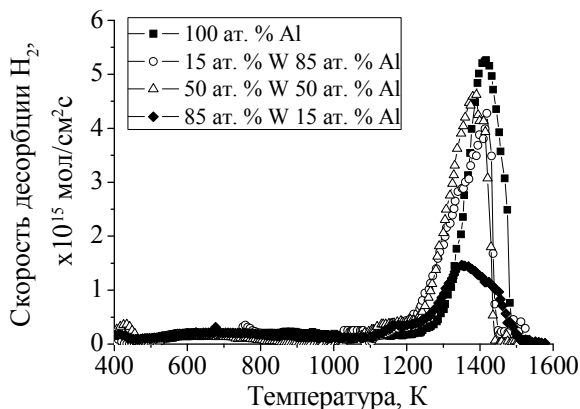


Рис. 3. ТДС спектры водорода, захваченного при напылении W-Al слоев на вольфрам

К первой группе относятся образцы с двухкомпонентными насыщенными алюминием слоями (концентрация алюминия > 80 ат. %). На рис. 3 максимум десорбции водорода из образцов этой группы соответствует температуре 1400 К. Из проведенного ранее анализа работ можно предположить, что при напылении таких слоев образование W-Al соединений происходит в две стадии.

Первая стадия формирования происходит непосредственно при напылении слоя, за счет взаимодействия прилетающих на вольфрамовую подложку расплывленных с мишени атомов алюминия. В процессе напыления образование W-Al соединений в некоторый момент сводится к минимуму, видимо за счет увеличения толщины слоя, а значит, увеличения расстояния между прилетающими атомами алюминия и вольфрамовой подложкой. Как отмечалось ранее, в подобных насыщенных алюминием слоях в дальнейшем преобладает аморфная структура.

Вторая стадия формирования может происходить в процессе нагрева при ТДС анализе. В описанных ранее работах отмечалось, что при температуре ~ 1000 К наблюдается трансформация насыщенной алюминием аморфной пленки в интерметаллические соединения, преимущественно Al_4W . В нашем случае спектр термодесорбции аргона (рис. 4) может косвенно подтверждать подобную трансформацию. Из рис. 4 видно, что основная часть аргона десорбируется в высокотемпературной части спектров 1300–1500 К. Это, вероятно, связано с разрушением слоев и удалением большей части алюминия с поверхности вольфрамовой подложки, что подтверждается результатами ЭДС анализа образцов (табл. 1).

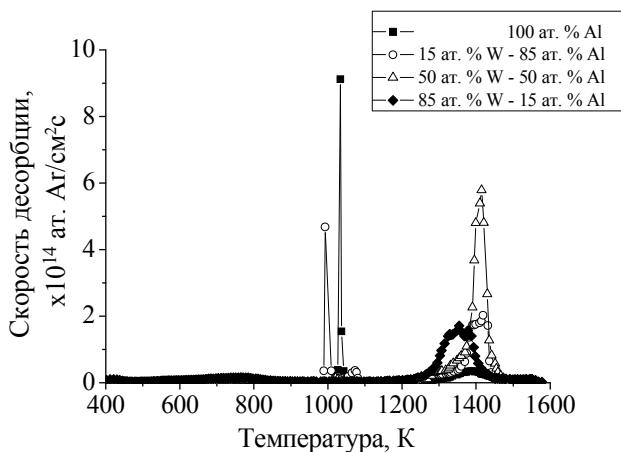


Рис. 4. ТДС спектры аргона, захваченного при напылении W-Al слоев на вольфрам

Также на ТДС спектрах Ag из образцов первой группы (W-Al слоев с концентрацией алюминия > 80 ат. % Al) заметны узкие пики при температурах 990 и 1030 К (рис. 4). Можно предположить, что при ~ 1000 К происходит перестройка структуры напыленного слоя и дальнейший рост интер-

металлических соединений, что сопровождается резким высвобождением аргона, захваченного в исходную структуру напыленного слоя. Очевидно, что вторая стадия формирования интерметаллических соединений, в виду своей скоротечности, никак не могла повлиять на захват водорода. Поэтому стоит признать, что весь десорбировавшийся водород при ТДС анализе был захвачен после напыления слоев и содержался в интерметаллических соединениях, образованных на первой стадии формирования соединений.

Таблица 1

Зависимость состава образца W-Al слоя «15 ат. % W + 85 ат. % Al» на вольфраме от температуры прогрева

Элемент	После напыления слоя, ат. %	После прогрева до 1400 К, ат. %	После прогрева до 1500 К, ат. %	После прогрева до 1600 К, ат. %
W	15±5	15±5	80±5	95±5
Al	85±5	85±5	20±5	5±5

Ко второй группе относятся образцы с двухкомпонентными W-Al слоями, концентрация алюминия в которых ≤ 50 ат. %. Из рис. 3 видно, что термодесорбционный максимум водорода из данной группы образцов имеет температуру 1350 К. Согласно указанным ранее работам, при напылении пленок с соотношением компонент Al:W = 1:1 происходит формирование кристаллической структуры (возможно соединений $Al_{12}W$, Al_5W и Al_4W), а аморфная фаза присутствует лишь в виде остаточной примеси. В процессе нагрева при ТДС анализе образцов второй группы аргон десорбировался только в области температур 1300–1500 К. Из этого можно предположить, что структура таких слоев была окончательно сформирована после напыления.

Проинтегрировав ТДС спектры (рис. 3), было рассчитано количество десорбировавшегося из образцов W-Al слоев на вольфраме атомов водорода. Полученные данные представлены в табл. 2.

Сравнив количество захваченного водорода после напыления W-Al слоев (табл. 2), можно сделать вывод, что слои состава X, % ат. W – (100-X), % ат. Al, где X = (0, 15, 50) ± 5 % (табл. 2, строки 1, 2, 3), захватывают приблизительно одинаковое количество водорода в высокотемпературных частях спектров. Для указанных выше составов слоев (табл. 2, строки 1, 2, 3), в низкотемпературных частях спектров также наблюдается приблизительно равное количество захваченного водорода.

Это может быть связано с тем, что в случае состава слоя 50 % ат. W – 50 % ат. Al интерметаллические соединения были распределены по всей его толщине 200 нм. На образцах с двухкомпонентными насыщенными алюминием слоями (концентрация алюминия > 80 ат. %) интерметаллические соединения, как было предположено ранее, располагались в области вблизи границы слой/подложка. Возможные отличия в расположении и составах соединений, по-видимому, могут влиять на механизм захвата водорода в них, что может подтверждаться наблюдаемым незначительным сдвигом (~ 50 К) положения максимума десорбции водорода.

Таблица 2

Количество атомов водорода в образцах W-Al слоев на вольфраме после их напыления

№	Состав напыленного слоя	Высокотемпературная часть спектра, 10^{17} ат/см ²	Низкотемпературная часть спектра, 10^{16} ат/см ²	Сумма, 10^{17} ат/см ²
1	100 ат. % Al	2,6 (1400 К)	3,5	2,95
2	15 ат. % W – 85 ат. % Al	2,3 (1400 К)	3	2,6
3	50 ат. % W – 50 ат. % Al	2,5 (1350 К)	1,8	2,7
4	85 ат. % W – 15 ат. % Al	1,2 (1350 К)	3,5	1,55

В случае напыления W-Al слоя состава 85 ат. % W – 15 ат. % Al количество захваченного водорода меньше в ~1,5 раза относительно других составов напыленных слоев, что, вероятно, связано с образованием меньшего количества интерметаллических W-Al соединений.

3.2. Захват и транспорт изотопов водорода при плазменном облучении

На рис. 5 приведены ТДС спектры десорбции молекул D₂, HD и H₂ из образцов W-Al слоев состава X, % ат. W – (100-X), % ат. Al, где X = (85, 50, 15) ± 5 % на вольфрамовой подложке после облучения ионами дейтериевой плазмы. Из рис. 5, а, б видно, что большая часть дейтерия захватывается преимущественно (≈ 70–90 %) в низкотемпературной части спектра в Al- и W-ловушки. Образование этих низкотемпературных ловушек, вероятно, происходит из-за разрушения W-Al интерметаллических соединений в процессе облучения ионами дейтериевой плазмы. При этом количество захватываемого дейтерия в образцах увеличивается вместе с ростом концентрации алюминия в напыляемом слое. Это может быть связано с тем, что алюминий имеет отрицательную теплоту растворения водорода, т. е. способен аккумулировать большее количество изотопов водорода, чем вольфрам, имеющий положительную теплоту растворения.

Выход дейтерия из высокотемпературных ловушек (1200–1600 К) наблюдался только в составе молекул HD (рис. 5, б). Предположенное ранее разрушение W-Al соединений в процессе облучения ионами дейтериевой плазмы, приводящее к образованию низкотемпературных ловушек, вероятно, осуществляется на глубину зоны торможения ионов. Тогда часть ионов, не захватившаяся в области низкотемпературных ловушек, может продиффундировать в область не разрушенных W-Al интерметаллических соединений и при термодесорбции образовать молекулу HD с водородом, захваченным после напыления пленки.

В табл. 3 представлены количества изотопов водорода, десорбированных из образцов после напыления и после облучения ионами дейтерия, полученные после интегрирования спектров термодесорбции на рис. 3 и 5.

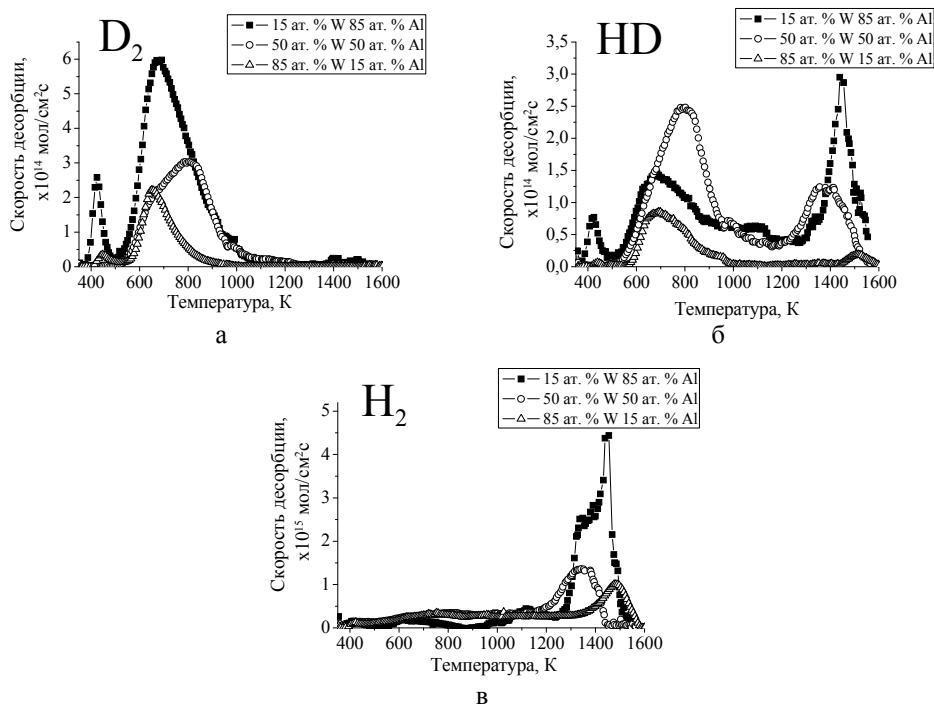


Рис. 5. Десорбция изотопов водорода из W-Al слоев на вольфраме при облучении слоя ионами дейтериевой плазмы: а – D₂, б – HD, в – H₂

Таблица 3

Количество атомов изотопов водорода в образцах W-Al слоев на вольфраме после напыления и после облучения ионами дейтериевой плазмы

Эксперимент	Состав X, % ат. W – (100-X), % ат. Al	Количество десорбировавшихся изотопов водорода, ·10 ¹⁶ ат/см ²				Сумма
		Высокотемпературная часть спектра		Низкотемпературная часть спектра		
		Водород + Дейтерий	Водород	Водород + Дейтерий	Водород	
После напыления	15	23(1400 K)		3		26
	50	25(1350 K)		1,8		27
	85	12(1350 K)		3,5		15,5
После облучения	15	25,8	24,8	11,3	3,8	37,1
	50	12,7	12	13,4	8,5	26,1
	85	8,1	8	8,6	6,7	16,7

Из табл. 3 видно, что после облучении пленок состава X, % ат. W – (100-X), % ат. Al, где X = (50, 15) ± 5%, общее количество изотопов водорода в образцах практически не меняется, при этом атомы дейтерия, захваченные при облучении, составляют меньшую долю (12 и 20%) от общего количества изотопов водорода в образцах. При сравнении данных табл. 2 и 3 становится заметно, что для указанных выше составов пленок под действием

ионного облучения происходит перераспределение удерживаемых изотопов водорода. Если после напыления пленки большая часть захваченного водорода ($\approx 70\text{--}90\%$) содержалась в высокотемпературных ловушках интерметаллических соединений W-Al, то после облучения в них содержится около 50 % всех изотопов водорода.

Облучение ионами дейтериевой плазмы образца с пленкой 15, % ат. W – 85, % ат. Al приводит к значительному ($\approx 42\%$) увеличению общего количества изотопов водорода в нем. Из табл. 3 видно, что количество атомов водорода в интерметаллических соединениях W-Al увеличивается незначительно ($\approx 12\%$), при этом этот слой захватывает наибольшее количество дейтерия при плазменном облучении (рис. 5,а). Таким образом, общий рост изотопов водорода в этом слое после плазменного облучения обусловлен захватом дейтерия в низкотемпературные Al- и W-ловушки.

4. Заключение и выводы

Проведено экспериментальное исследование процессов удержания и транспорта водорода в W-Al слоях на вольфраме при их осаждении и плазменном облучении.

Показано, что в процессе напыления Be, Al и W-Al слои аккумулируют большое количество водорода как в низкотемпературные ловушки, связанные с атомами алюминия, вольфрама и бериллия (с температурой десорбции 700, 800 и 900 К соответственно), так и в высокотемпературные ловушки с температурой десорбции 1200–1600 К. Было показано, что наблюдаемая интенсивная десорбция водорода при высокой температуре связана с образованием ловушек, локализованных в интерметаллических соединениях вольфрама с бериллием и алюминием. Интерметаллические соединения способны удерживать водород до температур 1200–1600 К, намного превосходящих температуры десорбции водорода из алюминия, бериллия и вольфрама.

При облучении W-Al слоев ионами дейтериевой плазмы происходит частичное разрушение W-Al интерметаллических соединений, образование низкотемпературных Al- и W-ловушек и захват в них дейтерия.

На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что вольфрам-бериллиевые слои смогут аккумулировать большие количества изотопов водорода. Чрезвычайно актуальным становится разработка низкотемпературного метода обезгаживания таких слоев в условиях термоядерного реактора.

Список литературы

1. ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams H. Baker, H. Okamoto, S. D. Henry et al.

2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. 992 с.
3. Marot L., Linsmeier C., Eren B. et al. Fus. Enginer. and Des. 88 (2013) 1718–1721.
4. Airapetov A., Begrambekov L., Bremond S. et al. J. of Nucl. Mater. 415 (2011), p. 1042–1045.
5. Anghel A., Porosnicu C., Badulescu M. et al. Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B 267 (2009) 426–429.
6. Sharapov V., Gavrilov L., Kulikauskas V. et al. J. of Nucl. Mater. 233–237 (1996) 870–873.
7. Linsmeier C., Ertl K., Roth J. et al. J. of Nucl. Mater. 363–365 (2007) 1129–1137.
8. Wiltner A., Linsmeier C. J. of Nucl. Mater. 337–339 (2005) 951–955.
9. Wiltner A., Linsmeier C. New J. of Phys. 8 (2006) 181.
10. Car T., Radic N., Ivkov J. et al. App. Phys. A. 68 (1999) 69–73.

Retention and transport of hydrogen in deposited layers of plasm-facing materials under plasma irradiation

S. S. Dovganyuk, A. S. Kaplevsky, N. N. Kasimova,
L. B. Begrambekov

National Research Nuclear University MEPhI,
Moscow, Russian Federation

This work investigates trapping of hydrogen isotopes in tungsten with beryllium and aluminum layers and transport of hydrogen isotopes through the tungsten-deposited layer phase boundary under plasma irradiation. It has been shown that tungsten-aluminum alloys are formed in the tungsten-aluminum layers during the deposition process, which accumulate hydrogen, and hydrogen desorption from these alloys occurs at a high temperature of 1400–1550 K, significantly higher than the temperature of hydrogen desorption from metal tungsten and aluminum. It was found that upon irradiation with plasma ions both deuterium plasma ions and residual gas atoms are trapped in the samples.