

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, С.С. ДОВГАНЮК,
Н.Н. КАСИМОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПОКРЫТИЯ БЕРИЛЛИЯ И АЛЮМИНИЯ, НАПЫЛЕННЫЕ В ПЛАЗМЕ

Первая стенка и дивертор ИТЭР изготавливаются из бериллия и вольфрама, соответственно. Осаждаясь на контактирующие с плазмой поверхности, распылённые атомы будут формировать перенапыленные бериллиевые слои. Исследование влияния пленок бериллия на захват и десорбцию изотопов водорода из вольфрама актуально с точки зрения безопасности, так как захват трития обращенными к плазме элементами стенки лимитирован. В работе изучается захват водорода при осаждении бериллиевых и алюминиевых слоев на вольфрам, их модификация и обезгаживание в процессе нагрева. Алюминий по своим химическим и физическим свойствам схож с бериллием [1]. Вместе с тем алюминий не токсичен, поэтому в работе изучается возможность использования алюминия в качестве замены бериллия в экспериментах по исследованию захвата водорода в бериллиевые слои. Также исследовалось влияние подложки на захват водорода в напыляемые алюминиевые слои. Для этого помимо вольфрама в качестве материала подложек использовались такие металлы как молибден и тантал.

На вольфрамовые, молибденовые и танталовые подложки в аргоновой плазме ($P = 1.5 \times 10^{-3}$ Торр, $P_{\text{ост}} = 5 \times 10^{-6}$ Торр, $T_{\text{образцов}} = 200\text{-}250$ °С) осаждались Al слои толщиной 200 нм. Методами растровой электронной микроскопии и энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС) исследовались изменение структуры и состава слоёв при нагреве. Десорбция газа из образцов измерялась методом термодесорбционной спектроскопии.

Обнаружено, что во время напыления на вольфрам Be и Al слои из остаточного газа захватывают водород, соответственно, до соотношения $\text{H:Be} = 0.22$ и $\text{H:Al} = 0.18$. Водород десорбируется из вольфрама при 800-850K (рис. 1а), из алюминия при 650K (рис. 1а), а из бериллия при 900-1000K (рис. 1б). Однако из Be и Al слоев на вольфраме водород десорбируется при существенно большей температуре 1250-1400K (рис. 1в). Поэтому в условиях ИТЭР удаление трития из формируемых на поверхности дивертора Be слоев методами термического нагрева невозможно. Был сделан вывод о том, что водород находится в составе сплава вольфрама с бериллием и вольфрама с алюминием в приповерхностной области вольфрама. Данное

предположение подтверждается фазовыми диаграммами систем W-Be (рис. 2а) и W-Al (рис.2б), из которых видно, что Be и Al с вольфрамом в интервале температур 1400-1600К образуют сплавы различных составов.

Во время работы ИТЭР на поверхности вольфрамового дивертора будут осаждаться также перенапыленные вольфрам-бериллиевые слои. Было решено исследовать захват водорода в двухкомпонентные W/Be слои на вольфраме. В нашем распоряжении не было таких образцов, однако, как было показано ранее, закономерности захвата водорода во время напыления пленок алюминия и бериллия на вольфрам и их обезгаживания схожи. Поэтому для проведения экспериментов были напылены W/Al слои на вольфрамовую подложку.

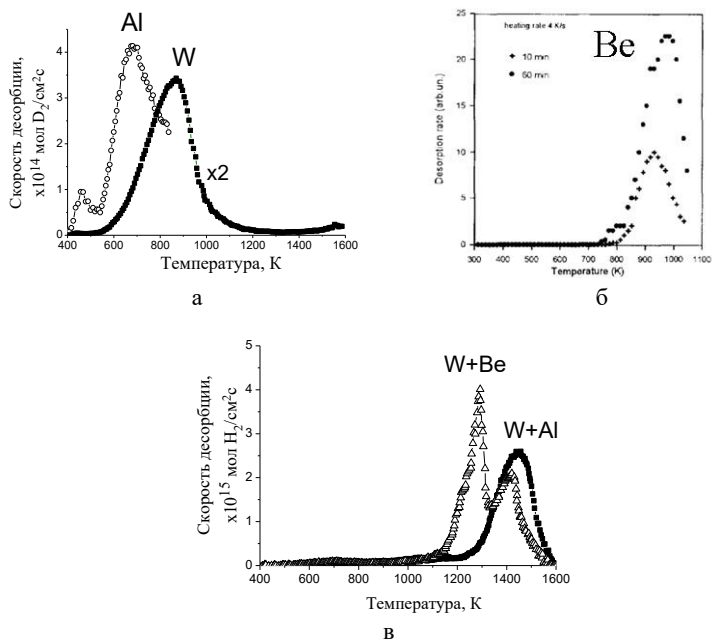


Рис. 1. ТДС спектры дейтерия из Al и W (а), Be [2] (б) и ТДС спектры водорода из вольфрама с пленками бериллия и алюминия (в).

На вольфрамовые подложки осаждали W/Al слои толщиной 200 нм следующих составов: «15 ат. % W +85 ат. % Al», «50 ат. % W +50 ат. % Al» и «85 ат. % W +15 ат. % Al». При ТДС анализе этих образцов также наблюдалась десорбция водорода при температуре 1250-1400К. Однако в

образцы пленок состава «50 ат. % W +50 ат. % Al» почти те же количества водорода вновь захватывались при охлаждении и выделялись примерно при тех же температурах при повторных циклах нагрева. Измерения методом ЭДС показали, что после нагрева до 1600К в покрытии оставался только вольфрам. Таким образом, приходится признать, что большие количества водорода, обнаруживаемые при повторных нагревах образцов, захватывались в оставшийся после удаления алюминия вольфрамовый слой при его остывании.

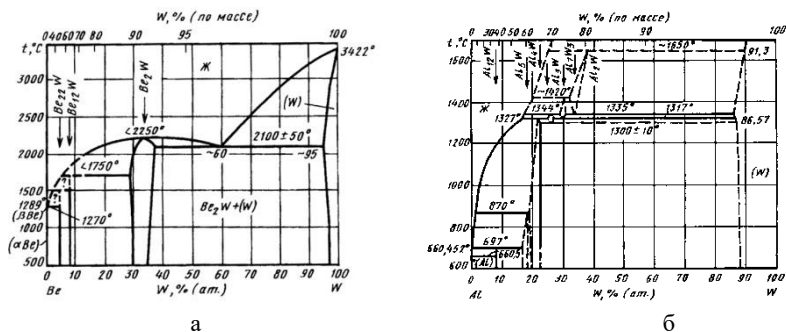


Рис. 2. Фазовые диаграммы системы W-Be (а) и W-Al (б).

Во время напыления Al слоя на молибден также происходил захват водорода из остаточного газа. Водород десорбируется из молибдена в интервале температур 400-900К (рис. 3а), а из алюминия при 650К (рис.3а). Однако из Al слоя на молибдене водород десорбируется при существенно большей температуре 1400-1450К (рис. 3).

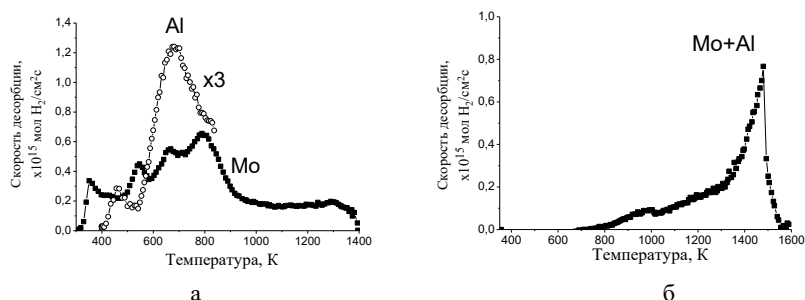


Рис. 3. ТДС спектры дейтерия из Al и водорода из W (а) и молибдена с пленкой алюминия.

Из фазовой диаграммы системы Mo-Al (рис. 4) видно, что и Mo с Al в интервале температур 1400-1600К образуют сплавы различных составов. Поэтому также был сделан вывод о том, что водород находится в составе сплава молибдена с алюминием.

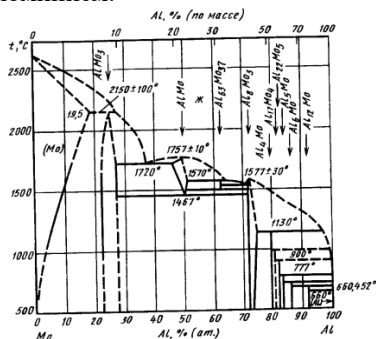


Рис. 4. Фазовая диаграмма системы Mo-Al.

Для того чтобы обобщить полученные результаты были проведены и обсуждаются результаты исследования захвата водорода при осаждении алюминиевых слоев на тантал. В работе также обсуждаются результаты исследования захвата водорода при напылении на использованные ранее подложки (W, Mo, Ta) двухкомпонентных слоев, а именно: слоев Mo/Al на молибдене, слоев Ta/Al на тантале и вольфраме образцы, слоев W/Al на тантале.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

- [1] L. Marot, C. Linsmeier, B. Eren et al. // Fus. Engineer. and Des. 2013. Vol. 88 P. 1718-1721.
- [2] V.M. Sharapov et al. // Journal of Nuclear Materials. 1996. Vol. 233-237. P. 870-873.