

Н.П. БОБЫРЬ, А.В. СПИЦЫН, А.В. ГОЛУБЕВА, М. МАУЕР<sup>1</sup>,  
Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>2</sup>, Н.С. КЛИМОВ<sup>3</sup>, Б.И. ХРИПУНОВ, В.М. ЧЕРНОВ<sup>4</sup>

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

*<sup>1</sup>Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

*<sup>3</sup>ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва*

*<sup>4</sup>ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара», Москва*

## **НАКОПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В НИЗКОАКТИВИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Одной из актуальных задач современной термоядерной энергетики является создание мощных термоядерных источников нейтронов (ТИН) для реализации замкнутого ядерного топливного цикла, пережигания минорных актинидов в ОЯТ, а так же для научного применения [1]. В свою очередь это приводит к необходимости использования конструкционных материалов со сниженной активированностью и которые могли бы выдерживать большие нейтронные потоки [2]. В России происходит разработка двух типов низкоактивируемых материалов – ферритно-мартенситных сталей и сплавов ванадия. В данный момент полностью отработана технология изготовления таких кандидатных материалов, как сплав V-4Cr-4Ti и сталь ЭК-181 (Rusfer) [3]. Преимуществами данных материалов является низкая активация в условиях нейтронного облучения и быстрый спад наведенной радиоактивности после облучения [4, 5]. Кроме того, V-4Cr-4Ti химически стоек к воздействию жидкого лития.

Важным вопросом радиационной безопасности и управления в будущих ТИН, а также в ДЕМО видится накопление изотопов водорода в материалах ТЯР.

В работе проводились исследования поглощения молекулярного водорода и дейтерия сплавом V-4Cr-4Ti и сталью ЭК-181 (Rusfer) при температуре образцов 293 – 673 К и давлениях газа в камере 0,01 – 10<sup>4</sup> Па.

Некоторые образцы стали ЭК-181 (Rusfer) были предварительно подвержены модификации с помощью следующих методов: облучение водородной и дейтериевой плазмой на установке ЛЕНТА (НИЦ «Курчатовский институт»), повреждение мощными фотонными импульсами на установке КСПУ (ТРИНИТИ), облучение ионами вольфрама с энергией 20 МэВ на ускорителе для создания дефектов, моделирующих нейтрон-

ные повреждения материала (Институт физики плазмы им. Макса Планка).

#### *Установка*

Накопление изотопов водорода в образцах материалов изучалось на специализированном высоковакуумном стенде AtlaN в НИЦ «Курчатовский институт». Стенд представляет собой высоковакуумную камеру из нержавеющей стали с системой напуска газа с измерением расхода, возможностью нагрева образцов и вакуумным аналитическим оборудованием (масс-спектрометр, емкостные вакуумметры Pfeiffer CMR 364 и MKS Instruments 690, ионизационный датчик давления Pfeiffer PBR 260 и деформационный датчик давления ASG).

Предельное давление в основной камере после прогрева стенок при 600 К в течение 12 часов составляет  $7 \cdot 10^{-7}$  Па, без этой процедуры  $7 \cdot 10^{-5}$  Па.

Установка оборудована системой бесконтактного нагрева, позволяющей нагревать образцы излучением до 1073 К. Температура контролируется двумя хромель-алюмелевыми термопарами, находящимися в непосредственном контакте с образцом.

#### *Методика*

В ходе экспериментов применялись различные методы для определения количества поглощенного водорода:

- метод замкнутого объема. Принцип метода заключается в непрерывном измерении давления в замкнутой вакуумной камере, объем которой известен с точностью не хуже чем 0,1%. Давление измерялось с использованием емкостных датчиков не чувствительных к виду газа.

- метод ядерных реакций. В ходе исследования образец последовательно облучается высокоэнергетичными ионами  $\text{He}^3$  и происходит регистрация протонов, образованных в ходе реакции  ${}^3\text{He}(d, {}^4\text{He})p$ . Метод позволяет узнать распределение дейтерия по глубине образца вплоть до 10 мкм.

- метод термодесорбционной спектрометрии. Метод позволяет узнать не только интегральное количество поглощенного газа, но и энергию связи.

- метод  $\beta$ - и рентгеновской люминесценции. Метод основан на эффекте радиоактивности трития и его способности испускать электроны.

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

*Поглощение водорода и дейтерия сплавом V-4Ti-4Cr*

- Количество захваченных атомов водорода из газовой фазы сплавом V-4Cr-4Ti прямо пропорционально температуре образца и давлению газа в камере для концентраций до 10 ат%. Насыщение достигнуто не было.

- При одинаковых условиях захват изотопов водорода в сплав V-4Cr-Ti на 3-5 порядков выше, чем в ферритно-мартенситную сталь.

- Чистка поверхности аргоновой плазмой приводит к увеличению скорости поглощения водорода.

*Поглощение дейтерия сталью ЭК-181 (Rusfer)*

- Захват атомов дейтерия из газовой фазы сталью ЭК-181 (Rusfer) происходит преимущественно в приповерхностной области (1-2 мкм). Количество дейтерия на глубине более 2 мкм очень мало (менее 0,001 ат%).

- Максимальное накопление дейтерия во всех образцах наблюдалось для образцов, экспонированных в газе при 500 К

- Накопление дейтерия в образцах, повреждённых ионами  $W^{6+}$ , возросло примерно в 2 раза по сравнению с неповрежденными образцами.

- Для образцов, поврежденных тепловыми и плазменными потоками, накопление уменьшилось примерно в 2 раза по сравнению с неповрежденными образцами.

[1] B.V. Kuteev et al, Nucl. Fusion 51 (2011) 073013.

[2] M.I. Solonin et al, J. Nucl. Mater. 283-287 (2000) 1468.

[3] R.J. Kurtz et al, J. Nucl. Mater. 329-333 (2004) 47.

[4] В.П. Колотов. Теоретические и экспериментальные подходы к решению задач активационного анализа, гамма-спектрометрии и создания малоактивируемых материалов. Автореферат на соискание ученой степени доктора химических наук. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского. Москва, 2007.

[5] Т.Н. Компаниец, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез № 3 (2009) 16.