

УДК 621.039.5

**Структурно-фазовое состояние, морфология и распределение водорода  
в модуляторе реактивности на основе гидрида титана  
для высокопоточного импульсного реактора НЕПТУН**

Е.С. Карпенко, М.В. Булавин

Научный руководитель: доцент, к.т.н. В.Н. Кудияров  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [esk37@tpu.ru](mailto:esk37@tpu.ru)

**Structural-phase state, morphology and distribution of hydrogen  
in a reactivity modulator based on titanium hydride for a high-flux pulsed reactor NEPTUNE**

E.S. Karpenko, M.V. Bulavin

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Ph.D., V.N. Kudiyarov  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: [esk37@tpu.ru](mailto:esk37@tpu.ru)

***Abstract.** The general principles of interaction of hydrogen with titanium hydride obtained by hot isostatic pressing (HIP) have been studied. Titanium hydride is the most promising material for biological protection of reactors due to its high protective characteristics with respect to neutron radiation. Titanium hydride has higher operating temperatures and permissible neutron fluence. In this work, titanium hydride was obtained by the HIP method with the following parameters: pressure 104 MPa, temperature 499 °C, holding time 2 hours. Thus, the structural-phase state, morphology and distribution of hydrogen were studied for the obtained titanium hydride.*

***Key words:** NEPTUNE reactor, titanium hydride, structural-phase state, morphology, hydrogen distribution.*

### **Введение**

В Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ) в настоящее время разрабатывается проект нового высокопоточного импульсного реактора НЕПТУН с топливом на основе нитрида нептуния [1]. Корпус реактора и его активная зона разделены на две части, в пространстве между половинами корпуса расположен модулятор реактивности. Модулятор выполнен в виде вращающегося диска диаметром около 3,4 м, вдоль периферии которого находится гидрид титана, с плотностью  $3,7 \pm 0,1$  г/см<sup>3</sup>, в форме радиальных секторов.

Гидрид титана будет функционировать в условиях постоянного воздействия ускорения, вибраций, радиационных и тепловых нагрузок. Максимальные температуры гидрида титана в соответствии с различными вариантами расчетов могут достигать 400–800 °С. Средняя температура – порядка 180 °С. При том, что эксплуатационным пределом для изделий из гидрида титана считается температура 350 °С [2, 3], хотя отдельные авторы утверждают, что процесс дегидрирования протекает незначительно вплоть до температуры в 500 °С. Срок эксплуатации реакторной установки порядка 10 лет. Однако должна быть предусмотрена замена как модулятора реактивности целиком, так и отдельных блоков гидрида титана.

Отсюда следует необходимость проведения работ по отработке технологии изготовления пластин гидрида титана с требуемыми свойствами и исследованию их поведения в условиях, соответствующих реактору НЕПТУН.

### **Экспериментальная часть**

В качестве образца для испытаний использовали плоский образец гидрида титана (TiH<sub>2</sub>) круглого сечения с диаметром 40 мм. Предварительно образец подвергался

металлографической подготовке путем шлифовки и полировки для удаления оксидной пленки с поверхности [4]. Насыщение водородом осуществляли методом горячего изостатического прессования при следующих параметрах: давление 104 МПа, температура 499 °С, время выдержки 2 ч.

### Результаты

Микроструктура образца  $TiH_2$  при различных увеличениях в 500 и 1000 раз представлена на рисунке 1. Порошок имеет неправильную форму: некоторые нано- или ультрамелкие частицы прикреплены к поверхности более крупных частиц. Морфология представлена угловатыми многоугольными формами, имеющими множество граней, небольшие сколы и кратеры [5].

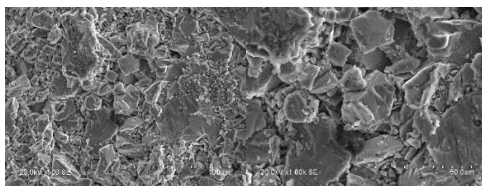


Рис. 1. СЭМ-изображения  $TiH_2$

Детальный элементный анализ проводился с использованием цветного картирования распределения элементов на поверхности образцов. На рисунке 2 показаны репрезентативные сканирующие электронные микрофотографии  $TiH_2$  с соответствующей цветовой картой.

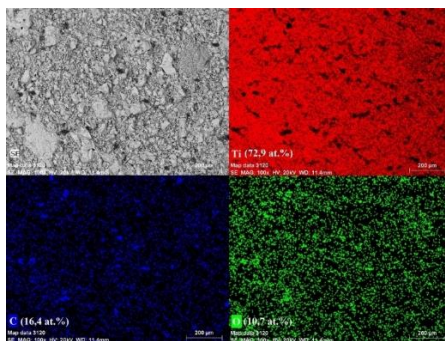


Рис. 2. СЭМ-изображения и картирование элементов поверхности  $TiH_2$

Из цветной карты  $TiH_2$  видно, что Ti равномерно распределен по поверхности. O и C присутствуют в небольших количествах и концентрируются в неровностях образца.

На рисунке 3 показан химический анализ  $TiH_2$  с помощью энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и рентгеновской дифракции соответственно. Образец  $TiH_2$  является однофазным, с гранецентрированной кубической кристаллической структурой ( $a = 0,4457$  нм), размер кристаллитов 59,94 нм, микронапряжения равны 0,0163 %. Значение параметра решетки близко к зарегистрированному:  $a = 0,4431$  нм [6].

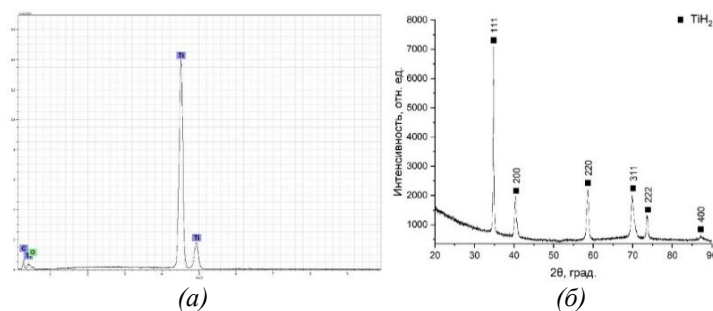


Рис. 3. (а) ЭДС-спектр и (б) рентгенограмма  $TiH_2$

Результаты количественной оценки содержания водорода в образцах показаны на рисунке 4. В образце  $TiH_2$  содержание водорода в диапазоне 3,6–3,8 масс. %. Из рисунка 4 видно, что у  $TiH_2$  распределение водорода по объему образца равномерное. Среднее содержание водорода в  $TiH_2$  равно 3,68 масс. %.

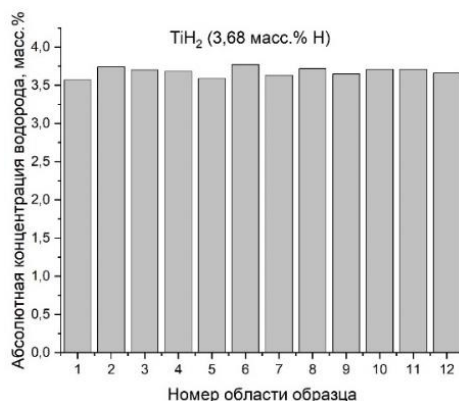


Рис. 4. Гистограмма распределения водорода в  $TiH_2$

### Заключение

По предварительным расчетам при работе реактора НЕПТУН на мощности 15 МВт условия для  $TiH_2$  близки к предельным по температуре. Максимальная температура в  $TiH_2$ , рассчитанная в программном комплексе ANSYS, составила 414 °С. Температура, при которой начинается термическая диссоциация  $TiH_2$ , составляет 350–400 °С [7]. В связи с этим возникает необходимость экспериментального уточнения физико-химических свойств  $TiH_2$ . В дальнейшем будет выполнено воздействие высоких температур на образцы и облучение образцов нейтронным потоком в реакторной установке с имитацией режима останова, запуска и работы на мощности реактора НЕПТУН, а также исследование стойкости образцов на вибростенде, определение предельных напряжений. После каждого этапа экспериментов предполагается определение массовой доли водорода в образцах, а также исследование структурных характеристик посредством рентгеновской дифракции.

### Список литературы

1. Шабалин Е.П., Аксенов В.Л., Комышев Г.Г., Рогов А.Д. Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния. Атомная Энергия. – 2018. – Т. 124, № 6. – С. 309.
2. Изделия гидрида титана компактные. ТУ 95.1149-83.
3. Кудияров В.Н. и др. Особенности накопления и распределения водорода при насыщении титанового сплава VT1-0 электролитическим методом и из газовой среды //Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 9. – С. 117–121.
4. Kudiiarov V.N. et al. Hydrogen sorption by Ni-coated titanium alloy VT1-0 //International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, № 15. – P. 10604–10610.
5. Kudiiarov V.N. et al. The hydrogen sorption and desorption behavior in spherical powder of pure titanium used for additive manufacturing //International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, № 22. – P. 15283–15289.
6. Pearson W.B., Villars P., Calvert L.D. Pearson's handbook of crystallographic data for intermetallic phases. – 1985. – Vol. 1–3. – 3528 p.
7. Yang Donghui, He Deping, Yang Shangrun, Thermal decomposition kinetics of titanium hydrate and Al alloy melt foaming process, Science in China, Series B Chemistry. – 2004. – Vol. 47, № 6. – P. 512–520.