

УДК:621.039.546

**IN SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ TiC ДЛЯ СТЕРЖНЕЙ УПРАВЛЕНИЯ  
НЕЙТРОНАМИ ИЗ HfH<sub>x</sub>**А.В. Пирожков

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Д.В. Сиделёв

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [alpir11260@gmail.com](mailto:alpir11260@gmail.com)**IN SITU XRD STUDY OF TiC COATING FOR HfH<sub>x</sub> NEUTRON CONTROL RODS**A. V. Pirozhkov

Scientific supervisor: Assoc. Prof., PhD. D.V. Sidelev

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

Email: [alpir11260@gmail.com](mailto:alpir11260@gmail.com)

**Abstract.** *An in situ study of the influence of the TiC coating on the process of high-temperature oxidation of HfH<sub>2</sub> samples was carried out. The samples were heated to a temperature of 900°C. Mass spectrometry data were also obtained. As a result of heating, the coating was destroyed, which led to the oxidation of the HfH<sub>2</sub> substrate.*

**Введение.** На данный момент в качестве материала стержней нейтронного контроля используется материал В<sub>4</sub>С. Несмотря на то, что материал имеет высокое сечение поглощения тепловых нейтронов, он также имеет ряд недостатков, таких как: высокая стоимость и короткий срок службы. В качестве одной из возможных альтернатив данного материала научными группами рассматривается материал гидрида гафния. Гафний и его изотопы имеют большие сечения тепловых нейтронов, а водород присутствующий в данных соединениях способен замедлять быстрые нейтроны до тепловых [1]. Кроме того, при реакциях между нейтронами и изотопами Hf не происходит образования гелия, поэтому регулирующие стержни из Hf и его соединений могут иметь длительный срок службы. Гафний уже применяется для регулирующих и/или аварийных стержнях в атомных отраслях России, США и Японии, поэтому проводятся исследования по расширению функционала гафния в данных отраслях.

Однако при 550 °С возможен распад гидрида гафния и последующая десорбция высвободившегося водорода с постепенным снижением доли гидрида в объёме поглощающего элемента. Это может привести к снижению поглощающей способности стержня. Для предотвращения данного эффекта предлагается использовать защитные покрытия. Среди большего числа покрытий перспективным может быть карбид титана (TiC).

Цель настоящей работы является изучение возможности использования TiC в качестве защитного покрытия для поглощающих элементов на основе гидрида гафния (HfH<sub>x</sub>).

**Экспериментальная часть.** В качестве исследуемого материала использовались цилиндры из гидрида гафния (диаметром 10 мм). Для осаждения TiC покрытий использовалась вакуумная ионно-плазменная установка, оснащённая ионным источником и комплектом магнетронных распылительных систем с двумя катодами из титана (99,95%) и углерода (МПП-6) [2]. Рентгенофазовые исследования in situ проводились с использованием синхротронного излучения на станции «Прецизионная дифрактометрия П»

Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия). Образцы исследовали в диапазоне  $2\theta$  30-65° и нагревались со скоростью 20 °С/мин до двух максимальных температур ( $T_{max}=700$  и 900 °С), а затем выдерживались при максимальной температуре в течении определялся исследовался методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000S с использованием  $CuK\alpha$  излучения при 40 кВ и 30 мА.

**Результаты.** На рисунке 1 представлен *in situ* исследования таблетки из гидрида гафния с покрытием испытаний (900°С) наблюдается фаза  $TiO_2$ , что соответствует окислению покрытия.

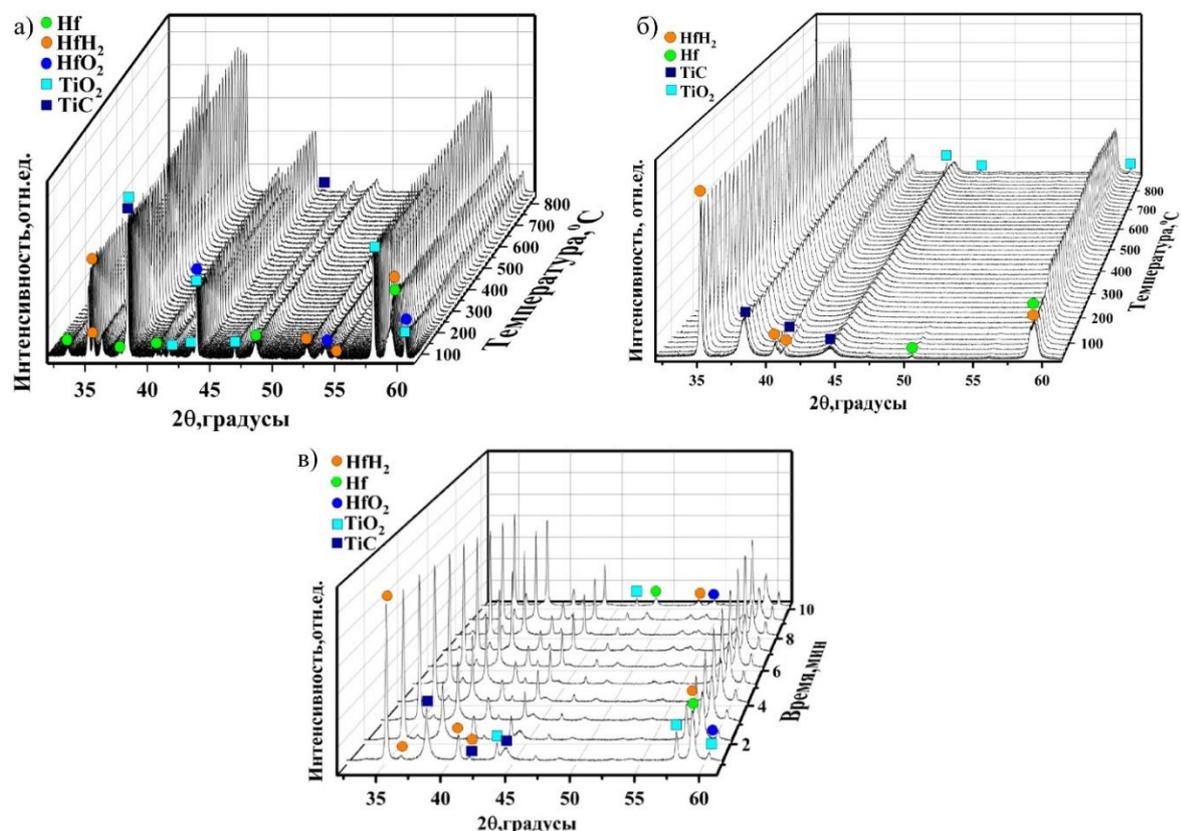


Рис. 1. *In situ* исследования образца  $HfH_2$  с покрытием  $TiC$ . (а) – нагрев, (б) – охлаждение, (в) - выдержка

Дифрактограммы образца, полученные при изотермической выдержке (900°С) (рис. 1(в)) и показывают, что через 5 мин от начала высокотемпературного окисления происходит образование фазы

Полученные данные масс-спектрометрии, представленные на рис. 2, показывают, что резкий скачок водорода может свидетельствовать о процессе разрушения покрытия  $TiC$ , нанесенного на образец. Наиболее вероятно, что выход водорода из образца с покрытием произошёл при его растрескивании, когда целостность защитного покрытия была нарушена. Это привело к увеличению интенсивности процесса окисления гафния, что привело к образованию фазы  $HfO_2$ . После разрушения покрытия существенных изменений в составе образца не наблюдалось.

После эксперимента было обнаружено, что структурная целостность образца с TiC покрытием была нарушена, наблюдались обширные трещины по всей поверхности образца.

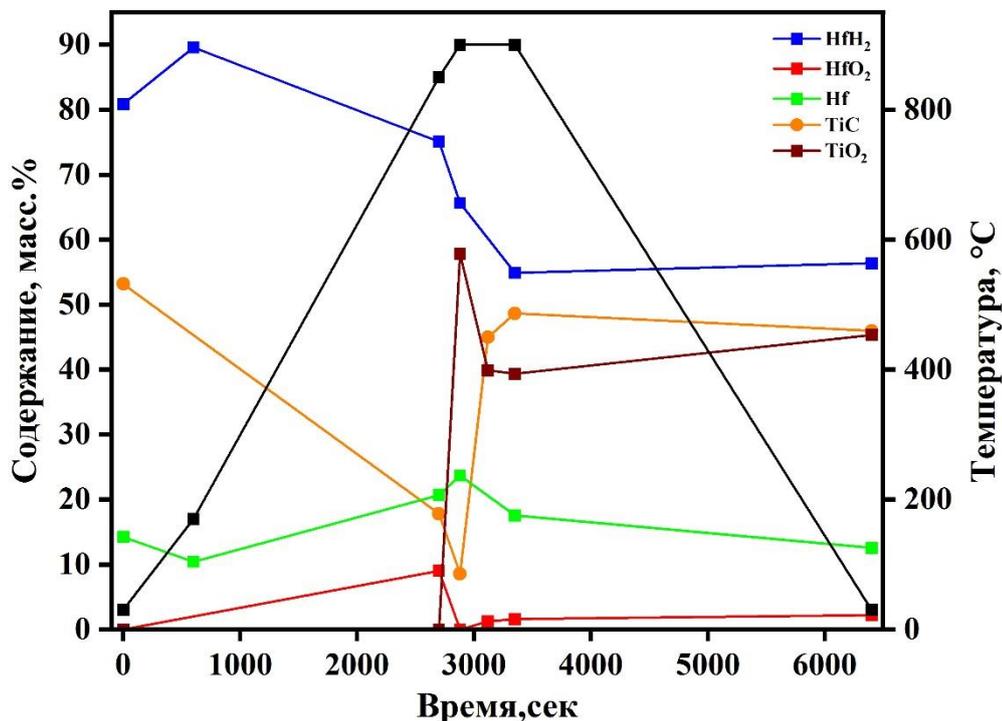


Рис. 2. График изменения фазового состава образцов

**Заключение.** В результате выполненного исследования установлено, что покрытия TiC не выдерживают длительного высокотемпературного окисления и разрушаются. Разрушение происходит как при 700°C, так и при 900°C. Это приводит к резкому окислению HfH<sub>2</sub>, снижению его механических свойств и разрушению образца. Одной из возможных причин разрушения покрытия может быть различие коэффициентов термического расширения для разных фаз HfH<sub>2</sub>.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания в рамках научного проекта № FSWW-2021-0017.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Konashi K., Iwasaki T., Terai T., Yamawaki M., Kurosaki K., Itoh K. Study on Application of Hafnium Hydride Control Rods to Fast Reactors // Proc. 2006 Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Embedded Top. – 2006. – P. 2213-2217.
2. Sidelev D.V., Kashkarov E.B., Syrtanov M.S., Krivobokov V.P. Nickel-chromium (Ni–Cr) coatings deposited by magnetron sputtering for accident tolerant nuclear fuel claddings // Surface and Coatings Technology. – 2019. – V. 369. – P. 69-78.