

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ YSZ-Al₂O₃, ОБЛУЧЕННОЙ ПРОТОНАМИ

Р.Ш. Исаев^{1), 2)}, Д.Р. Беличко¹⁾, А.В. Малецкий¹⁾, Г.К. Волкова¹⁾

¹⁾Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
ул. Розы Люксембург 72, Донецк 283048, Россия, Sashamalecki097@gmail.com,
daniel.belichko@yandex.ru, isayev_rafael@mail.ru, galina.volkova@mail.ru

²⁾Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио Кюри 6, Дубна 141980, Россия

В работе методом РСА, СЭМ, пьезоэлектрического вибратора и исследованиями механических свойств изучен процесс структурообразования керамической системы YSZ-Al₂O₃ и изучена ее радиационная стойкость при облучении протонами с энергией 2 МэВ и дозой 1×10^{17} ион/см². Установлено образование композитной структуры в виде матрицы из t-ZrO₂ и включений Al₂O₃. Исследование механических свойств показало их немонотонность от концентрации оксида алюминия, рост пористости и снижение характеристик при облучении. При этом обнаружен рост скорости акустической волны в исследуемых образцах после облучения.

Ключевые слова: диоксид циркония; нанопорошки; оксид алюминия; керамика; облучение; структура; свойства.

RADIATION RESISTANCE OF THE YSZ-Al₂O₃ CERAMIC SYSTEM UNDER PROTON IRRADIATION

Rafael Isayev^{1), 2)} Aleksandr Maletskii¹⁾, Danil Belichko¹⁾, Galina Volkova¹⁾

¹⁾Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering,
72 Rozy Lyuksemburg Str., 283048 Donetsk, Russia, Sashamalecki097@gmail.com,
daniel.belichko@yandex.ru, isayev_rafael@mail.ru, galina.volkova@mail.ru

²⁾Joint Institute for Nuclear Research,
6 Jolio-Curie Str., 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

In this work, the structure formation of the YSZ-Al₂O₃ ceramic system and its radiation resistance under proton irradiation with an energy of 2 MeV and a dose of 1×10^{17} ions/cm² were studied using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), piezoelectric vibrator measurements, and mechanical property investigations. The formation of a composite structure consisting of a t-ZrO₂ matrix with Al₂O₃ inclusions was confirmed. The study of mechanical properties revealed their non-monotonic dependence on aluminum oxide concentration, as well as an increase in porosity and degradation of properties under irradiation. Additionally, an increase in the speed of acoustic waves was observed in the irradiated samples.

Keywords: zirconia; nanopowders; ceramics; alumina; irradiation; structure; properties.

Введение

Легирование, как способ модернизации структуры оксидных материалов, в частности оксидных систем на основе диоксида циркония, известно достаточно широко. Данный прием позволяет получать новые структуры и совершенствовать свойства керамик на основе ZrO₂. К примеру, дополнительное легирование оксидами гафния частично стабилизированного иттрием диоксида циркония приводит к образованию твердого раствора Zr-Hf, что в свою очередь существенно увеличивает плотность

материала, его прочность, а также его твердость [1]. Добавка SiO₂ в аналогичной системе, согласно фазовой диаграмме и экспериментальным фактам, приводит к образованию так называемой гибридной компоненты в керамической матрице – ортосиликата циркония [2]. Эти включения, ввиду их частичной когерентности с решеткой t-ZrO₂, создают поля сжимающих напряжений, приводящих к возрастанию упругих и прочностных свойств в среднем на 25%. Добавка оксида алюминия в матрицу из диоксида циркония трансформи-

ируют структуру материала в композите, для которого характерно дисперсный механизм упрочнения [3].

В этой связи, вызывает интерес исследование легирования как метода повышения радиационной устойчивости диоксида циркониевой керамики. В работе [4] исследовалась система $ZrO_2 - SiO_2$ на предмет ее устойчивости к облучению потоком протонов. Авторами установлено [5], что в результате облучения снижается общая дефектность системы, ввиду аннигиляции имеющихся дефектов и вновь образующимся. При этом возрастает пористость материала.

Целью настоящей работы является исследование системы $ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3$ на предмет ее устойчивости к облучению потоком протонов и изменению физических свойств.

Материалы и методы исследования

Порошки для исследования получали методом химического осаждения из растворов солей оксихлорида циркония ($ZrOCl_2 \times 8H_2O$) и азотокислого иттрия ($Y(NO_3)_3$) и хлорида алюминия ($AlCl_3$) при комнатной температуре. Кристаллизацию порошков осуществляли на воздухе, при температуре $1000^{\circ}C$ в течение 2 h. Порошки компактировали путем формования в стальных пресс-формах с нагрузкой 50 MPa и дальнейшей обработкой высоким гидростатическим давлением (ВГД) величиной 400 MPa. Синтез керамики осуществляли путем спекания компактов при температуре $1500^{\circ}C$ с выдержкой 1 h. на воздухе.

В данной работе исследовались керамика диоксида циркония, стабилизированная 3 мол. % оксида иттрия ($ZrO_2 + 3$ мол.% Y_2O_3 , (YSZ)), дополнительно легированная оксидом алюминия ($YSZ + n Al_2O_3$, где $n = 1, 2, 3, 5, 10, 15$ вес.%). Облучение полученных керамик проводилось на электростатическом ускорителе ЭГ-5. Мощность дозы (D_p) составляла $1 \cdot 10^{17}$ ед/ cm^2 с энергией 2 МэВ.

Исследования проводились с применением структурно-чувствительных методов таких как РФА, РСА, СЭМ, метод пьезоэлектрического вибратора и исследование физико-механических свойств.

Результаты исследования

На рис. 1 приведена зависимость плотности керамики от концентрации оксида алюминия до и после облучения. Из рис. 1 видно, что плотность монотонно снижается с ростом концентрации легирующей примеси. При этом, после облучения данная характеристика еще ниже, ввиду роста пористости при взаимодействии потока протонов с материалом.

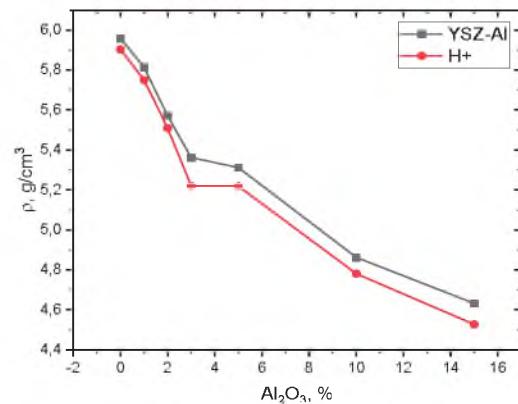


Рис. 1. Зависимость плотности керамики от концентрации оксида алюминия до (черный) и после(красный) облучения

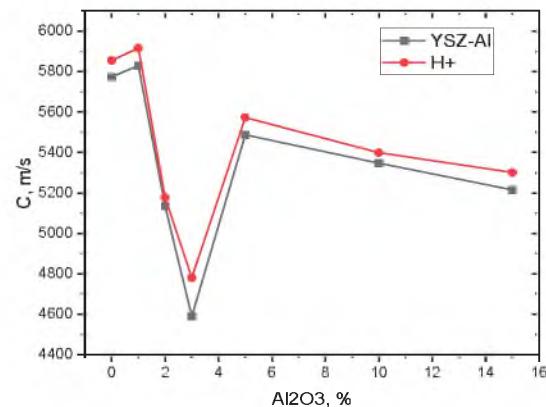


Рис. 2. Зависимость скорости звука в керамике от концентрации оксида алюминия до (черный) и после(красный) облучения

На рис. 2 приведены зависимости скорости звука в материале от концентрации легирующей примеси. Видно, что после об-

лучения в исследуемых системах возрастает примерно на 5 % скорость распространения акустической волны. Вероятно, данный эффект обусловлен снижением дефектности в материале ввиду аннигиляции имеющихся дефектов, образующимися устойчивыми парами Френкеля.

При этом следует отметить, что зависимость модуль Юнга от легирующей примеси имеет иной вид, и представлен на рис. 3. Не наблюдается существенной разницы в зависимости модуля упругости от концентрации после облучения. Поскольку модуль Юнга прямо пропорционален плотности и скорости звука, то рост пористости и возрастание скорости акустической волны компенсируют друг друга.

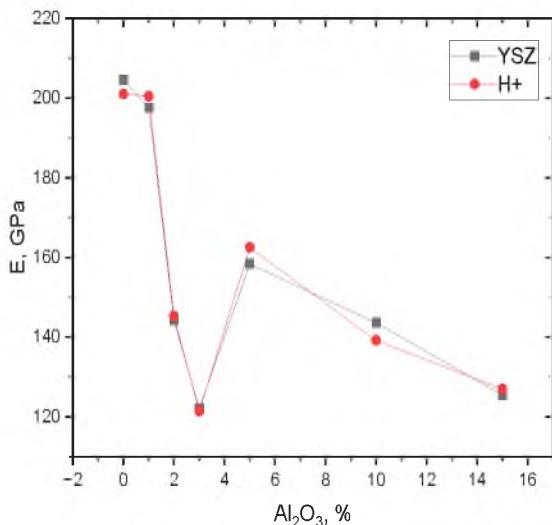


Рис. 3. Зависимость модуля Юнга керамики от концентрации оксида алюминия до (чёрный) и после (красный) облучения

Заключение

Исследован процесс структуро-образования керамической оксидной системы ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃. Установлено, что при облучении в материале возрастает и увеличивается пористость. При этом скорость звука в облученном материале выше.

Исследования выполнены при поддержке РНФ, грант № 24-72-10072, <https://rscf.ru/project/24-72-10072/>.

Библиографические ссылки

1. Belichko D.R., Konstantinova T.E., Maletskii A.V. Influence of hafnium oxide on the structure and properties of powders and ceramics of the YSZ-HfO₂ composition. *Ceramics International* 2021; 47(3).
2. Belichko D.R., Konstantinova T.E., Maletskii A.V. Effects of YSZ ceramics doping with silica and alumina on its structure and properties. *Materials Chemistry and Physics* 2022; 287(1): 794-808.
3. Khaskhoussi A., Calabrese L., Currò M., et. al. Effect of the Compositions on the Biocompatibility of New Alumina-Zirconia-Titania Dental Ceramic Composites. *Materials* 2020; (13): 122586.
4. Ohtaki K.K., Patel M.K., Crespillo M.L. et. al. Improved high temperature radiation damage tolerance in a three-phase ceramic with heterointerfaces. *Sci Rep.* 2018; 8(1): 13993.
5. Беличко Д.Р., Малецкий А.В., Волкова Г.К., Исаев Р. Влияние протонного облучения на структуру и свойства композитной керамики состава YSZ-SiO₂-Al₂O₃. *Вопросы материаловедения* 2024; (3): 119.