

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Zr-Y-O ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МАГНЕТРОННОМ ОСАЖДЕНИИ НА ПОДЛОЖКАХ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА K208

А.В.ИВАНОВА<sup>1</sup>, Т.И.ДОРОФЕЕВА<sup>2</sup>, М.П.КАЛАШНИКОВ<sup>1,2</sup>, И.А.БОЖКО<sup>1,2</sup>, Ю.Ф.ХРИСТЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета

E-mail: bonny.anne.iv@gmail.com

В околоземном пространстве внешние элементы космических аппаратов постоянно подвергаются ударам высокоскоростных микрометеороидов и частиц антропогенного загрязнения. В наибольшей степени страдают оптические элементы, такие как стекла иллюминаторов, зеркала, линзы, а также фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей. В результате таких столкновений на поверхности оптических элементов образуются механические повреждения в виде кратеров и трещин. Увеличение их плотности в процессе длительной эксплуатации приводит к значительной эрозии поверхности, снижению прозрачности и деградации механических свойств оптических элементов. Модификация поверхности путем нанесения покрытий позволит значительно повысить эрозионную стойкость поверхности оптических элементов [1]. Система Zr-Y-O, обладающая уникальным комплексом свойств [2], таких как высокая прочность, износостойкость и прозрачность, является подходящим вариантом в качестве защиты оптического стекла K208.

Целью работы является исследование структурного состояния и механических свойств покрытий на основе системы Zr-Y-O, полученных методом импульсного реактивного магнетронного распыления.

Исследуемые покрытия наносили на подложки, которые представляли из себя полированные диски размером  $\varnothing 15 \times 4$  мм из радиационно-стойкого стекла K208, методом импульсного магнетронного распыления на вакуумной установке УВН-05МД «КВАНТ» [3] в газовой смеси  $\text{Ag} + \text{O}_2$  с использованием мишени на основе ZrY. Температура подложек в процессе нанесения покрытий была 295 К. Толщина покрытий составила 5-6 мкм.

Структурно-фазовое состояние исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-7 в Co-K $\alpha$  излучении (для отсекающего  $\beta$ -излучения использовали Fe-фильтр) [4]. Микротвердость, приведенный модуль упругости и коэффициент упругого восстановления покрытий и подложек из стекла K208 измеряли с помощью нанотвердомера NanoHardnessTester при нагрузке 20 мН.

Для определения эрозионной стойкости стекла к ударному воздействию микрочастиц рассчитывали поверхностную плотность образующихся кратеров. Для этого проводили эксперимент по бомбардировке экспериментальных образцов с помощью легкогазовой пушки МПХ23/8 в НИИ ПММ ТГУ [5]. В качестве частиц для обстрела были выбраны микрочастицы порошка железа с формой близкой к сферической средним диаметром 56 мкм. Скорости движения микрочастиц составляли 5-8 км/с. После обстрела методом РЭМ были получены серии изображений поверхности образцов. На полученных изображениях всех 8-ми образцов были исследованы распределения возникающих после обстрела кратеров и рассчитана их поверхностная плотность.

РСА показал, что покрытия Zr-Y-O, сформированные при указанных условиях осаждения, имеют многофазную структуру, состоящую из фазы  $\text{ZrO}_2$  с решетками тетрагональной и моноклинной модификации, а также фазу  $\text{Y}_2\text{O}_3$  с кубической модификацией.

Механические характеристики покрытий Zr-Y-O и стекла K208 без покрытия показаны в таблице 1. Как видим, по сравнению с исходным стеклом микротвердость

покрытий увеличивается более чем в 2 раза, а коэффициент упругого восстановления – в 1,3 раза.

Таблица 1 – Средние значения механических характеристик исследуемых образцов и плотность кратеров на их поверхности

Образец	$H_m$ , ГПа	$E^*$ , ГПа	$k_y$	$\rho$ , мм <sup>-2</sup>
Стекло K208	$8,40 \pm 0,15$	$93,0 \pm 0,8$	0,53	20,19
Стекло с покрытием Zr-Y-O	$18,81 \pm 0,69$	$318,6 \pm 8,8$	0,72	3,04

На рисунке 1 показаны кратеры на поверхности образцов с покрытием Zr-Y-O и исходных стеклах, образовавшиеся после обстрела. Видно, что на образце с покрытием количество кратеров значительно меньше, чем на обычном стекле. Этот факт подтверждают результаты подсчета поверхностной плотности кратеров  $\rho$ , указанные в таблице 1.

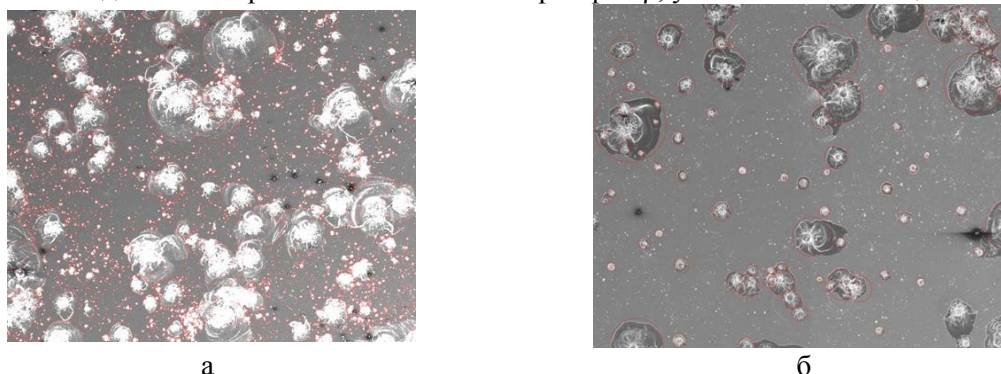


Рисунок 1 – РЭМ-изображения кратеров, сформированных на поверхности образцов в результате воздействия высокоскоростного потока микрочастиц железа: а – образец без покрытия, б – образец с покрытием Zr-Y-O (кратеры обведены красными окружностями)

**Выводы.** Покрытия Zr-Y-O, осажденные на стекле K208 методом импульсного магнетронного распыления, имеют кристаллическую многофазную структуру, включающую фазы  $ZrO_2$  и  $Y_2O_3$ . Нанесение данных покрытий позволяет значительно повысить эрозионную стойкость стекла K208, о чем свидетельствует уменьшение поверхностной плотности кратеров на поверхности образцов после воздействия потока высокоскоростных микрочастиц железа в  $\sim 7$  раз, по сравнению с исходными. Микротвердость стекла с осажденным покрытием Zr-Y-O составила 18,8 ГПа.

#### Список литературы

1. V. Sergeev, S. Psakhie, P. Chubik, A. Cherniavsky, V. Soloviev, V. Solntsev, Yu. Khristenko. Magnetron Sputtering of Si-Al-N Nanocomposite Coatings on Quartz Glasses for Protection against Impacts of High Speed Microparticles // Vacuum. – 2017. – V.143. – p.454-457.
2. Панин В.Е., Сергеев В.П., Моисеенко Д.Д., Почивалов Ю.И. Научные основы формирования теплозащитных и износостойких многослойных покрытий системы Si-Al-N и Zr-Y-O // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 6. – С. 5–14.
3. Сергеев В.П., Яновский В.П., Параев Ю.Н., Сергеев О.В., Козлов Д.В., Журавлев С.А. Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ). Физическая мезомеханика. 2004. – Т.7. Спец.выпуск. ч.2. с. 333-336.
4. Fedorischeva M.V., Kalashnikov M.P., Sergeev V.P. Phase transformations in nanostructured coatings based on Zr-Y-O and produced by a pulse magnetron sputtering method // AIP Conference Proceedings. – 2015. – V.1683. – P.020053 (1–4)
5. Gerasimov A.V., Kalashnikov M.P., Sergeev V.P., Khristenko Yu.F. Complex research on the interaction of glass with space debris // AIP Conference Proceedings. – 2015. – 1683. – P.020056-1 – 020056-4