

УДАРНАЯ СТОЙКОСТЬ СТЕКОЛ С ЗАЩИТНЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ In-Sn-O/Al-Si-N

Р.А. КАЛИЕВА¹, И.А. БОЖКО^{1,2}

¹ Томский политехнический университет

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: keshrim95@gmail.com

В экстремальных условиях космического пространства техника подвергается разрушающему воздействию различных факторов, в том числе столкновениям с микрометеороидами. В большей степени ударному воздействию микрометеороидов подвержены оптические элементы космических аппаратов (КА) [1]. Учитывая, что защитные конструкции космических аппаратов не должны их утяжелять, эффективным путем продления долговечности оптических элементов является нанесение защитных оптически прозрачных покрытий. В качестве таких покрытий наибольший интерес представляют оптически прозрачные покрытия на основе систем Al-Si-N и In-Sn-O. При этом известно, что многослойные композиционные наноструктурированные покрытия с чередующимися слоями характеризуются более высокой адгезионной прочностью и, следовательно, лучшими защитными функциями по сравнению с однослойными покрытиями. Однако, для прогнозирования ресурса работы указанных защитных покрытий при воздействии микрометеороидных частиц, требуется проведение ударных испытаний в лабораторных условиях, что по своей сути является новым и актуальным. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния, механических и оптических свойств композиционных однослойных и многослойных покрытий на основе систем Al-Si-N и In-Sn-O, а также оценка их стойкости к ударному воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц железа.

Объектами исследований являлись образцы стекла К-208, с нанесенными покрытиями на основе систем Al-Si-N и In-Sn-O двух типов: однослойные покрытия (на основе системы Al-Si-N (образец AlSiN) и на основе системы In-Sn-O (образец InSnO)) и многослойные покрытия (шестислойное (образец InSnO-AlSiN-6) и двенадцатислойное (образец InSnO-AlSiN-12)). Многослойные покрытия представляли собой чередующиеся слои, полученные на основе систем In-Sn-O и Al-Si-N. Для всех многослойных покрытий у подложки формировали слой системы In-Sn-O, у поверхности – Al-Si-N. Магнетронное нанесение покрытий осуществлялось на установке УВН-05МД «КВАНТ». Питание магнетрона осуществлялось от импульсного биполярного источника питания частотой 50 кГц. При осаждении слоев системы Al-Si-N мощность магнетрона составляла 1,2 кВт, в случае осаждения слоев системы In-Sn-O – 0,4 кВт. В качестве материала подложки выбрано стекло марки К-208.

Результаты исследования фазового состава полученных однослойных покрытий методами РСА и ПЭМ показали, что в покрытии AlSiN наблюдается формирование фаз AlN и α -Si₃N₄, имеющих гексагональную плотноупакованную структуру, а в покрытии InSnO обнаружено формирование фазы In₂O₃ кубической сингонии. По данным ПЭМ также было установлено, что сформированные покрытия имеют высокодисперсную структуру: средний размер кристаллитов фаз, формируемых в покрытии AlSiN, составляет порядка 10 нм, поперечный размер кристаллитов In₂O₃, формируемого в покрытии InSnO, по направлению роста покрытия увеличивается от 30 до 300 нм. Анализ ПЭМ изображений поперечного сечения многослойных покрытий InSnO-AlSiN-6 и InSnO-AlSiN-12 показал, что структура отдельных слоев многослойных покрытий подобна той, что формируется в соответствующих однослойных покрытиях. Фазовый состав отдельных слоев также соответствует фазовому составу соответствующих однослойных покрытий. Средний поперечный размер столбцов In₂O₃ в покрытии InSnO-AlSiN-6 составляет 100 нм, а в покрытии InSnO-AlSiN-12 около 10 нм.

Таблица 1 – Свойства исследуемых покрытий

Образец	h, мкм	n	H _ц , ГПа	ρ _{отн}
Стекло К-208	-	-	7,7 ± 0,39	-
AlSiN	6,5 ± 0,5	2,42	29,5 ± 3,16	0,57
InSnO		3,73	7,7 ± 0,17	0,29
InSnO-AlSiN-6		-	22,1 ± 1,19	0,60
InSnO-AlSiN-12		-	16,1 ± 0,59	0,24

Анализ спектров пропускания света для исследуемых образцов показал, что исходное стекло К-208 имеет высокую степень пропускания около 90 % в видимом диапазоне длин волн. После нанесения всех полученных покрытий наблюдается снижение светопропускания. Максимальное светопропускание в видимой области спектра наблюдается для однослойного покрытия AlSiN (~ 80 %), а минимальное – для InSnO (< 70 %). Анализ осцилляций на спектрах пропускания образцов с однослойными покрытиями позволил оценить их показатель преломления *n* [2] (табл. 1). Результаты измерения микротвердости *H_ц* исследуемых покрытий представлены в табл. 1.

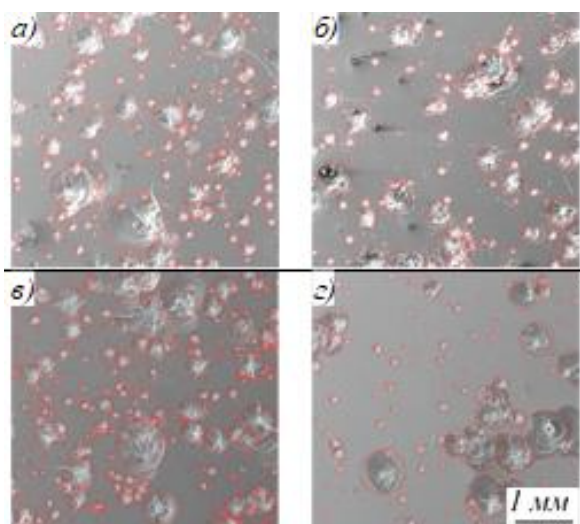


Рисунок 1 – СЭМ-изображения поверхности исследуемых образцов после бомбардировки частицами Fe: а, в – исходное стекло К-208; б – стекло К-208 с покрытием AlSiN; г – стекло К-208 с покрытием InSnO-AlSiN-12

Для имитации процессов соударения микрометеороидов с поверхностью космического аппарата использовали легкогазовую пушку МПХ23/8 [3] и микрочастицы железа сферической формы со средним диаметром 56±8,2 мкм. Скорость бомбардирующих частиц железа при проведении эксперимента находилась в диапазоне 3-8 км/с. Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что на поверхности образцов стекла К-208 до и после нанесения защитных покрытий, подвергнутых бомбардировке потоком высокоскоростных микрочастиц железа, сформировались кратеры различного диаметра и формы, характерной для хрупких материалов (рис. 1). Нанесение как однослойных, так и многослойных защитных покрытий на стекла К-208 приводит к уменьшению поверхностной

плотности кратеров *ρ* по сравнению с исходными стеклами *ρ₀* при одних и тех же условиях испытания. При этом наибольшее снижение относительной поверхностной плотности кратеров (*ρ/ρ₀* = 0,24) наблюдалось в случае нанесения многослойных защитных покрытий InSnO-AlSiN, состоящих из 12 слоев.

Список литературы

1. Jiang D., Zhang P., Zhang Y. The Study of Space Debris and Meteoroid Impact Effects on Spacecraft Solar Array // Protection of Materials and Structures from the Space Environment. Astrophysics and Space Science Proceedings. – 2017. – № 47. – С. 337–345.
2. Комраков Б.М., Шапочкин Б.А. Измерение параметров оптических покрытий. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
3. Стенд для исследования высокоскоростного соударения мелких частиц с преградой МПК F41F1/00: патент Рос. Федерация № 2610790; заявл. 23.10.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. № – 5.