

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/293

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И
СВОЙСТВА УДАРОПРОЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

^{1,2}Божко И.А., ²Калиева Р.А., ^{1,2}Калашников М.П., ^{1,2}Федорищева М.В., ^{1,2}Сергеев В.П.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

²*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

В процессе эксплуатации космические аппараты (КА) подвергаются разрушающему воздействию различных факторов космического пространства, в том числе ударному воздействию при столкновениях с микрометеороидами. При этом ударному воздействию микрометеороидов в большей степени подвержены оптические элементы космических аппаратов, такие как окна, линзы, зеркала и т.д. [1]. В связи с этим, актуальным является создание защиты для оптических элементов космических аппаратов с целью продления их ресурса работы и увеличения срока службы КА в целом. Одним из перспективных способов увеличения долговечности оптических элементов КА является нанесение на их поверхность защитных противоударных покрытий. В настоящей работе в качестве защиты стеклянных элементов КА от механических повреждений, возникающих при ударном воздействии высокоскоростных твердых частиц, предлагается использовать покрытия на основе Al-Si-N и In-Sn-O, наносимые методом импульсного магнетронного осаждения. 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. В связи с этим целью данной работы являлось исследование микроструктуры, элементного и фазового состава, оптических и механических свойств композиционных покрытий системы Al-Si-N и In-Sn-O толщиной 6,5 мкм, полученных в условиях импульсного магнетронного осаждения, а также оценка их стойкости к ударному воздействию твердых микрочастиц, скорость которых лежит в интервале 3-8 км/с.

Осаждение покрытий систем Al-Si-N и In-Sn-O на подложку из стекла марки К-208 осуществляли методом импульсного магнетронного осаждения на вакуумной установке УВН-05МД «КВАНТ» [2], режимы нанесения представлены в таблице 1. По данным гравиметрического метода установлено, что полученные покрытия Al-Si-N и In-Sn-O имеют толщину $6,5 \pm 0,5$ мкм.

Таблица 1. Режимы магнетронного осаждения покрытий

Покрытие	Температура подложки, °С	Мощность магнетрона, кВт	Частота следования импульсов, кГц	Атмосфера	Общее давление газовой смеси <small>Робщ, Па</small>	Время осаждения покрытия <small>t, мин</small>
Al-Si-N	280	1,2	50	Ar:N ₂	0,25	134
In-Sn-O		0,4		Ar:O ₂	0,25	122

Результаты исследования фазового состава полученных образцов методами рентгеноструктурного анализа показали, что в покрытии Al-Si-N наблюдается формирование фаз AlN и α -Si₃N₄, имеющих гексагональную плотноупакованную структуру. Исходя из формы и ширины дифракционных линий, присутствующих на рентгенограмме, было установлено, что покрытие на основе Al-Si-N имеет аморфно-кристаллическую структуру. Анализ рентгенограммы для образца с покрытием на основе In-Sn-O показал, что данное покрытие имеет ярко выраженную кристаллическую структуру и его фазовый состав представлен оксидом индия In₂O₃ в кубической модификации (JCPDS № 6-0416) с параметром решетки $a=10,134$ Å.

На рисунке 1 представлены спектры пропускания исследуемых образцов с покрытиями Al-Si-N и In-Sn-O и исходного стекла К-208 в ультрафиолетовом ($\lambda = 200-380$ nm) и видимом ($\lambda = 380-800$ nm) диапазонах длин волн. Видно, что стекло К-208 обладает широкой полосой поглощения в интервале длин волн от 200 до 350 nm, а в видимой области спектра обладает

Секция 5. Деградация тонких пленок и многослойных покрытий как иерархически организованных структур

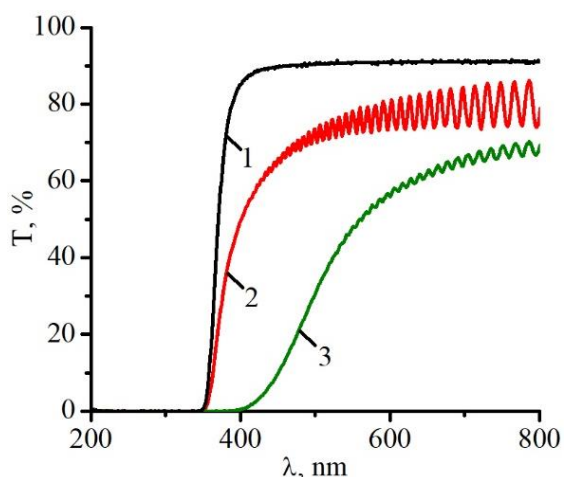


Рисунок 1 – Спектры пропускания исследуемых образцов: 1 – стекло К-208; 2 – К-208 с покрытием Al-Si-N; 3 – К-208 с покрытием In-Sn-O

высокой степенью светопропускания (90%). Нанесение покрытия на основе Al-Si-N приводит к незначительному снижению светопропускания образца в видимом диапазоне до 75-80%, тогда как для образца стекла К-208 с покрытием In-Sn-O уровень светопропускания видимой области спектра не превышает 70%.

Результаты исследования механических свойств исследуемых образцов (табл. 2) показали, что нанотвердость формируемых защитных покрытий системы Al-Si-N, осаждаемых на поверхность стекла К-208, при нагрузке 20 мН составляет 31 ГПа. Важно отметить, что полученные значения нанотвердости для защитных покрытий системы Al-Si-N превышают нанотвердость исходных

образцов стекла в 3,7 раза. Помимо увеличения нанотвердости для покровных стекол ФЭП марки К-208 после нанесения защитных покрытиями системы Al-Si-N удалось достигнуть повышения коэффициента упругого восстановления на 30 %. В то же время покрытие In-Sn-O характеризуется более низкими значениями нанотвердости и коэффициента упругого восстановления по сравнению с исходным стеклом К-208.

Таблица 2. Оптические и механические свойства исследуемых образцов

Образец	Показатель преломления	H, ГПа	E, ГПа	W _e
Стекло К-208	-	8,4 ± 0,15	92,5 ± 0,82	0,53 ± 0,01
Al-Si-N	2,42	31,1 ± 3,12	278,2 ± 16,73	0,69 ± 0,04
In-Sn-O	3,73	5,72 ± 0,34	154,1 ± 13,79	0,13 ± 0,01

Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что на поверхности экспериментальных образцов стекла К-208 до и после нанесения защитных покрытий, подвергнутых бомбардировке потоком высокоскоростных микрочастиц железа [3], наблюдается формирование кратеров различного диаметра. Анализ СЭМ изображений показал, что на поверхности исходного стекла К-208 большинство сформированных кратеров имеют размер от 10 до 50 мкм. После нанесения защитных покрытий системы Al-Si-N толщиной 6 мкм на образцы стекол К-208 приводит к уменьшению поверхностной плотности кратеров в 2,8 раза по сравнению с исходными стеклами. Это происходит за счет того, что защитные покрытия системы Al-Si-N предотвращают образование на поверхности исследуемых образцов кратеров с размерами менее 30 мкм, а доля кратеров с размером от 30 до 50 мкм составляет менее 1 %. В случае нанесения на образцы стекол К-208 защитных покрытий In-Sn-O толщиной 6 мкм поверхностная плотность кратеров также снижается, но уже в 3,4 раза. Причем в наибольшей степени уменьшается количество кратеров размером от 50 до 100 мкм.

Литература

- 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.
- Сергеев В.П., Яновский В.П., Параев Ю.Н. и др. Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ) // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № Спец2. С. 333-336.
- Стенд для исследования высокоскоростного соударения мелких частиц с преградой МПК F41F1/00: патент Рос. Федерация № 2610790; заявл. 23.10.2015; опубли. 15.02.2017, Бюл. № - 5.