

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА УДАРОПРОЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

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 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]. Одним из перспективных способов увеличения ресурса их работы 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 систем Al-Si-N и In-Sn-O, наносимые методом импульсного магнетронного осаждения. 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. 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, движущихся со скоростями 3-8 км/с.

Таблица 1 – Режимы магнетронного осаждения покрытий

Образец	Состав мишени	T_s , °C	P, кВт	ν , кГц	Атмосфера	$p_{\text{общ}}$, Па	t, мин
Al-Si-N	Al:Si	280	1,2	50	Ar:N ₂	0,25	134
In-Sn-O	InSn		0,4		Ar:O ₂	0,25	122

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», режимы нанесения представлены в таблице 1 (где T_s – температура подложки, P – мощность магнетрона, ν – частота следования импульсов, $p_{\text{общ}}$ – общее давление газовой смеси, t – время осаждения покрытия). Полученные в данных условиях покрытия Al-Si-N и In-Sn-O имеют толщину $6,5 \pm 0,5$ мкм по данным гравиметрического метода.

По данным рентгеноструктурного анализа и метода просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в покрытии Al-Si-N наблюдается формирование фаз с гексагональной плотноупакованной решеткой (ГПУ): w-AlN и α -Si₃N₄, при этом структура покрытия является аморфно-кристаллической с размером областей когерентного рассеяния 10 нм. Покрытие In-Sn-O имеет ярко выраженную кристаллическую структуру со

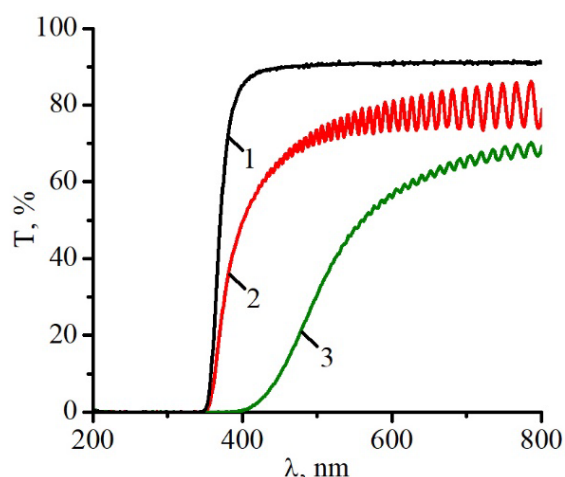


Рисунок 1 – Спектры пропускания исследуемых образцов: 1 – стекло К-208; 2 – стекло К-208 с покрытием Al-Si-N; 3 – стекло К-208 с покрытием In-Sn-O

средним размером кристаллитов 35 нм, преимущественная ориентация которых [400]. Фазовый состав покрытия In-Sn-O представлен оксидом индия в кубической модификации $c\text{-In}_2\text{O}_3$ ($a = 10,134 \text{ \AA}$).

На рисунке 1 представлены спектры пропускания исследуемых образцов с покрытиями Al-Si-N и In-Sn-O и исходного стекла К-208 в ультрафиолетовом ($\lambda = 200\text{-}380 \text{ нм}$) и видимом ($\lambda = 380\text{-}800 \text{ нм}$) диапазонах длин волн. Стекло К-208 поглощает волны длиной 200-350 нм, а в видимой и ближней инфракрасной областях спектра обладает высокой степенью светопропускания (90 %). При нанесении покрытия Al-Si-N наблюдается незначительное снижение светопропускания образца в видимом диапазоне до 75-80 %, тогда как при нанесении покрытия In-Sn-O данный показатель не превышает 70 %. Анализ распределения экстремумов в спектрах пропускания позволил оценить показатель преломления покрытий (таблица 2) по методике, описанной в [2].

Механические свойства образцов определяли методом динамического наноиндентирования при нагрузке на индентор 20 мН, результаты представлены в таблице 2 (где H – твердость, E – модуль упругости, W_e – коэффициент упругого восстановления).

Таблица 2 – Оптические и механические свойства исследуемых образцов

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

Для имитации процессов соударения микрометеороидов с поверхностью космического аппарата использовали легкогазовую пушку МПХ23/8 [3] и микрочастицы железа сферической формы со средним диаметром $56 \pm 8,2 \text{ мкм}$. Скорость бомбардирующих частиц железа при проведении эксперимента находилась в диапазоне 3-8 км/с. 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, 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.

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.