

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ Al-Si-N И In-Sn-O К УДАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ТВЕРДЫХ МИКРОЧАСТИЦ**Р.А. Калиева¹Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. И.А. Божко^{1,2}¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: keshrim95@gmail.com**COMPARATIVE STUDY OF THE RESISTANCE OF THE PROTECTIVE NANOCOMPOSITE
Al-Si-N AND In-Sn-O COATINGS TO THE SHOCK IMPACT OF SOLID MICROPARTICLES**R.A. Kaliyeva¹Scientific Supervisor: Ph.D., associate professor I.A. Bozhko^{1,2}¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050²Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Russia, Tomsk, av. Academicheskii, 2/4, 634055E-mail: keshrim95@gmail.com

***Abstract.** The results of investigations of the structural and phase state, mechanical, optical and protective properties of Al-Si-N and In-Sn-O systems coatings deposited by magnetron sputtering on K-208 glass are presented.*

Введение. Активное освоение космоса и необходимость разработки космических аппаратов (КА), способных работать в экстремальных условиях космического пространства, требует разработки новых функциональных материалов и технологий их получения. К числу важнейших факторов, способных вызывать эрозию поверхности и местные разрушения, относятся столкновения КА с микрометеороидами. Наиболее от ударов микрометеороидов страдают различные оптические элементы КА. Одним из способов решения данной проблемы может стать нанесение на оптические детали КА защитных оптически прозрачных покрытий, таких как Al-Si-N или In-Sn-O. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния, механических и оптических свойств покрытий Al-Si-N и In-Sn-O, а также оценка их стойкости к ударному воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц железа.

Экспериментальная часть. Магнетронное нанесение покрытий осуществлялось на установке УВН-05МД «КВАНТ». Питание магнетрона осуществлялось от импульсного биполярного источника питания частотой 50 кГц. При осаждении покрытий системы Al-Si-N мощность магнетрона составляла 1,2 кВт, в случае осаждения покрытий системы In-Sn-O – 0,4 кВт. В качестве материала подложки использовалось стекло марки К-208.

Исследование структурно-фазового состояния образцов было выполнено методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-7 в Co-K α излучении и методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100F при ускоряющем

напряжении 200 кВ. Спектры светопропускания покрытий получены с помощью спектрофотометра СФ-256 УВИ в спектральном диапазоне 200-800 нм. Механические свойства покрытий определяли методом динамического наноиндентирования с помощью прибора ТТХ-ТНТ Nano Hardness Tester при нагрузке на индентор 20 мН. Оценка стойкости к ударным нагрузкам производилась с помощью легкогазовой пушки МПХ23/8 [1]. В качестве бомбардирующих частиц использовали микрочастицы железа сферической формы, средний диаметр которых составил $56 \pm 8,2$ мкм, скорость которых лежала в интервале от 5 до 8 км/с. После проведения ударных испытаний изображения кратеров, формирующихся на поверхности исследуемых образцов, регистрировались с помощью сканирующего электронного микроскопа LEOEVO-50XVP. В качестве количественной характеристики воздействия потока микрочастиц на защитные покрытия использовали относительную поверхностную плотность кратеров $\rho_{отн}$:

$$\rho_{отн} = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ_0 и ρ – поверхностная плотность кратеров на образцах исходного стекла и на образцах стекла с защитным покрытием, соответственно.

Результаты. Результаты исследования фазового состава полученных образцов методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии показали, что в покрытии Al-Si-N наблюдается формирование фаз AlN, α - и β -модификаций Si_3N_4 , имеющих гексагональную плотноупакованную структуру, а в покрытии In-Sn-O обнаружено формирование фазы In_2O_3 кубической сингонии. Результаты ПЭМ исследований микроструктуры исследуемых покрытий показали, что кристаллиты формируемого нитрида алюминия в покрытии Al-Si-N имеют вытянутую волокнистую форму, что наблюдалось нами ранее при осаждении покрытий Al-Si-N на подложку кварцевого стекла марки КВ [2]. Покрытия системы In-Sn-O имеют явно выраженную столбчатую структуру (рис. 1). Также по данным ПЭМ было установлено, что сформированные покрытия имеют высокодисперсную структуру: средний размер кристаллитов фаз, формируемых в покрытии Al-Si-N, составляет порядка 10 нм, средний поперечный размер кристаллитов In_2O_3 , формируемого в покрытии In-Sn-O – 35 нм.

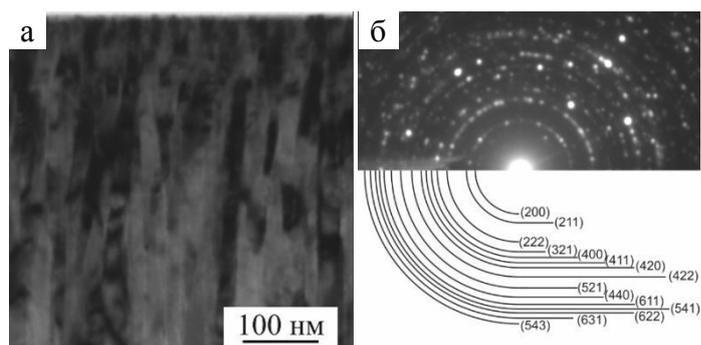


Рис. 1. ПЭМ изображения поперечного сечения покрытия In-Sn-O: а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина

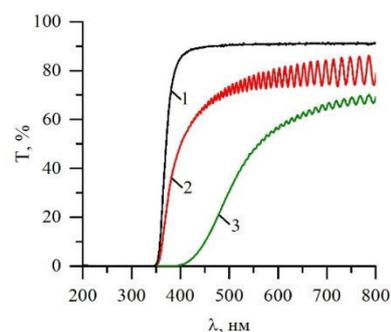


Рис. 2. Спектры пропускания образцов стекла с защитными покрытиями: 1 – стекло К-208; 2 – Al-Si-N; 3 – In-Sn-O

Анализ спектров пропускания света для исследуемых образцов (рис. 2) показал, что исходное стекло К-208 (рис. 2, кривая 1) имеет высокую степень пропускания около 90 % в видимом диапазоне длин волн, а для волн длиной 200-350 нм является непрозрачным. Нанесение защитного покрытия Al-Si-N приводит к незначительному уменьшению светопропускания образца (до 75-80 %) в видимой области

спектра (рис. 2, кривая 2), в то время как светопропускание покрытия In-Sn-O в указанном диапазоне спектра не превышает 70 % (рис. 2, кривая 3). Анализ осцилляций на спектрах пропускания, обусловленных явлением интерференции света в покрытиях, позволил оценить показатель преломления [3] исследуемых покрытий (табл. 1). Следует отметить, что образец с покрытием In-Sn-O имеет широкую полосу поглощения в области длин волн 200-400 нм (рис. 2, кривая 3). В случае образца с покрытием Al-Si-N наблюдаемая полоса поглощения в области длин волн 200-350 нм (рис. 2, кривая 2) обусловлена поглощением подложки из стекла марки К-208 в указанной области спектра (рис. 2, кривая 1). Результаты исследования механических свойств покрытий Al-Si-N и In-Sn-O, сформированных в процессе магнетронного осаждения, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оптические и механические свойства покрытий

Образец	Толщина покрытия, мкм	Показатель преломления	H (ГПа) (F=20,00мН)	E* (ГПа) (F=20,00мН)	W _e
Стекло К-208	-	-	8,4 ± 0,15	92,5 ± 0,82	0,53
Al-Si-N	6,32	2,42	31,1 ± 3,12	278,2 ± 16,73	0,69
In-Sn-O	5,31	3,73	5,72 ± 0,34	154,1 ± 13,79	0,13

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.

Работа выполнена в рамках основной научной программы исследований академии наук за 2013-2020 гг. и при поддержке программы развития НИ ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2011. – Т. 4. – № 16. – С. 70–78.
2. Bozhko I.A., Rybalko E.V., Pershukova A.G., Fedorischeva M.V., Khristenko Yu.F., Sergeev V.P. Microstructure and Properties of Nanocomposite Al-Si-N System Coatings Produced by Magnetron Sputtering // AIP Conference Proceedings – 2016. – V. 1772. – P. 030014.
3. Комраков Б.М., Шапочкин Б.А. Измерение параметров оптических покрытий. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.