

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ СТЕКОЛ С ЗАЩИТНЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ  
ПОКРЫТИЯМИ In-Sn-O/Al-Si-N К УДАРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ТВЕРДЫХ МИКРОЧАСТИЦ Fe**

Р.А. Калиева<sup>1</sup>

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. И.А. Божко<sup>1,2</sup>

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

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

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

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

E-mail: keshrim95@gmail.com

**THE STUDY OF THE RESISTANCE OF GLASSES WITH In-Sn-O/Al-Si-N PROTECTIVE  
MULTILAYER COATINGS TO IMPACT OF HIGH-SPEED SOLID Fe MICROPARTICLES**

R.A. Kaliyeva<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Ph.D., associate professor I.A. Bozhko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Russia, Tomsk, av. Academicheskii, 2/4, 634055

E-mail: keshrim95@gmail.com

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

**Введение.** 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). 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.

**Экспериментальная часть.** 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. 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.

Элементный состав покрытий определяли с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора (МРСА) INCA-Energy, встроенного в сканирующий электронный микроскоп LEOEVO-50XVP. Толщина формируемых покрытий определялась гравиметрическим методом. Исследование структурно-фазового состояния образцов было выполнено методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-7 в Co-K $\alpha$  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. Твердость покрытий определяли на микротвердомере DM8 при нагрузке на индентор 98 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  $\rho_{\text{отн}}$ :

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

где  $\rho_0$  и  $\rho$  – поверхностная плотность кратеров на образцах исходного стекла и на образцах стекла с защитным покрытием, соответственно.

**Результаты.** По данным МРСА элементный состав однослойного покрытия AlSiN представлен Al (38,70 ат.%), Si (12,37 ат.%), N (48,93 ат.%), а однослойного покрытия InSnO – In (33,29 ат.%), Sn (1,52 ат.%), O (65,19 ат.%). Результаты исследования фазового состава полученных однослойных покрытий методами РСА и ПЭМ показали, что в покрытии AlSiN наблюдается формирование фаз AlN и  $\alpha$ -Si $_3$ N $_4$ , имеющих гексагональную плотноупакованную структуру, а в покрытии InSnO обнаружено формирование фазы In $_2$ O $_3$  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 In $_2$ O $_3$ , 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  $\text{In}_2\text{O}_3$  в покрытии  $\text{InSnO-AlSiN-6}$  составляет 100 нм, а в покрытии  $\text{InSnO-AlSiN-12}$  около 10 нм.

Таблица 1

Свойства исследуемых покрытий

| Образец        | $h$ , мкм | $n$  | $H_{\mu}$ , ГПа | $\rho_{\text{отн}}$ |
|----------------|-----------|------|-----------------|---------------------|
| Стекло К-208   | -         | -    | 7,71            | -                   |
| AlSiN          | 6,0±0,25  | 2,42 | 29,5            | 1,76                |
| InSnO          |           | 3,73 | 7,67            | 3,44                |
| InSnO-AlSiN-6  |           | -    | 22,13           | 1,67                |
| InSnO-AlSiN-12 |           | -    | 16,1            | 4,12                |

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  $n$  (табл. 1). Результаты измерения микротвердости  $H_{\mu}$  исследуемых покрытий представлены в табл. 1.

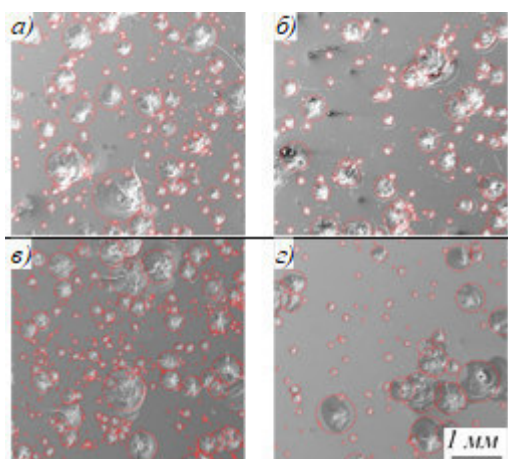


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности исследуемых образцов после бомбардировки частицами Fe: а, в – исходное стекло К-208; б – стекло К-208 с покрытием AlSiN; г – стекло К-208 с покрытием InSnO-AlSiN-12

После проведения ударных испытаний по данным СЭМ было обнаружено, 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  $\rho$  по сравнению с исходными стеклами  $\rho_0$  при одних и тех же условиях испытания. При этом наибольшее снижение относительной поверхностной плотности кратеров ( $\rho_0/\rho=4$ ) наблюдалось в случае нанесения многослойных защитных покрытий InSnO-AlSiN, состоящих из 12 слоев.

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.