

**ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Al-Si-N ДЛЯ СТЕКОЛ ИЛЛЮМИНАТОРОВ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**С.Ю. Жарков¹, Е.В. Рыбалко¹, А.В. Иванова²

Научный руководитель: профессор, д.т.н. В.П. Сергеев

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

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

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

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

E-mail: retc@ispms.tsc.ru

Активное исследование ближнего и дальнего космоса и потребность совершенствовать конструкции космических аппаратов, способных работать в экстремальных условиях космоса, требуют развития новых технологий производства материалов. В космическом пространстве, удары высокоскоростных микрочастиц о поверхность космических аппаратов (КА) вызывают механические и плазменные процессы, при которых на поверхности оптических элементов КА образуется множество локальных поверхностных микроуражений – кратеров разных размеров, вызывающих деградацию оптических характеристик, а также растрескивание и возможное механическое разрушение элементов в целом [1,2]. Следовательно, одной из основных задач является разработка новых конструкционных материалов, способных защитить оптические элементы КА, в частности иллюминаторы, от воздействия метеороидов и частиц космического мусора. Одним из эффективных способов защиты может стать модификация их поверхности с помощью нанесения покрытий на основе системы AlN/Si₃N₄. Выбранная система, полученная в наноструктурном состоянии, может существенно повысить стойкость к ударному воздействию высокоскоростных микрочастиц у кварцевых стекол, применяемых в иллюминаторах КА, сохраняя их прозрачными в видимой области спектра.

Целью данной работы является исследование структурно-фазового состояния и механических свойств покрытий на основе Al-Si-N, осажденных методом импульсного реактивного магнетронного распыления, а также их влияния на стойкость поверхностного слоя кварцевого стекла при ударном воздействии микрочастиц железа, движущимися со скоростями 5-8 км/сек.

С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) установлено, что сформированные покрытия имеют нанокристаллическую структуру, что подтверждается данными, полученными с помощью рентгеноструктурного анализа. Индифракционные картины и дифрактограммы покрытий на основе Al-Si-N свидетельствуют о наличии в покрытиях фазы AlN с параметрами решетки, $a = 0,3114$ нм и $c = 0,4979$ нм и средним размером $14,7 \pm 1,6$ нм. Исследование методом ПЭМ тонкой структуры покрытия системы Al-Si-N в поперечном сечении показало, что микроструктура изменяется по толщине покрытия. У подложки материал покрытия находится в аморфном состоянии, над ним располагается переходный слой, в котором нанозерна AlN размером менее 15 нм в виде глобул распределены в аморфной матрице. Согласно электронно-зондовому анализу при исследовании «поперечных» фольг с помощью ПЭМ локальные области в покрытиях между нанозернами AlN имеют химический состав, соответствующий нитриду кремния. Самый верхний слой покрытия имеет столбчатую структуру. Столбцы, состоящие из фазы AlN, растут в направлении нормальном к поверхности подложки, начиная от переходного слоя вплоть до поверхности покрытия. Между столбцами имеются прослойки из аморфного нитрида кремния. Средний размер поперечного сечения столбцов совпадает в пределах экспериментальной погрешности со средним размером зерен, определенным ранее на «продольных» фольгах.

Механические характеристики покрытий Al-Si-N и кварцевой подложки показаны в таблице 1. Видно, что кварцевое стекло с нанокompозитным покрытием системы Al-Si-N имеет более высокую величину микротвердости H_m , модуля упругости E^* и коэффициента упругого восстановления материала k_y по сравнению с кварцевой подложкой без покрытия.

Таблица 1. Средние величины механических характеристик исследуемых образцов, плотность кратеров на их поверхности

Образец	H_m , ГПа	E^* , ГПа	k_y	$\rho \cdot 10^6$, м ⁻²
Кварцевая подложка без покрытия	$9,9 \pm 0,1$	$72,6 \pm 0,3$	$0,61 \pm 0,03$	$9,8 \pm 0,9$
Кварцевая подложка с покрытием Al-Si-N	$31,2 \pm 2,4$	$258,1 \pm 3,2$	$0,88 \pm 0,04$	$3,6 \pm 0,3$

Известно, что при воздействии высокоскоростных частиц на поверхности образца ударная волна возникает и проникает глубоко в материал. В результате кратер формируется в пятне воздействия на поверхности подложки. Рис. 1 показывает изображения кратеров, сформированных на поверхности образцов в результате подвергания потоку микрочастиц железа высокой скорости.

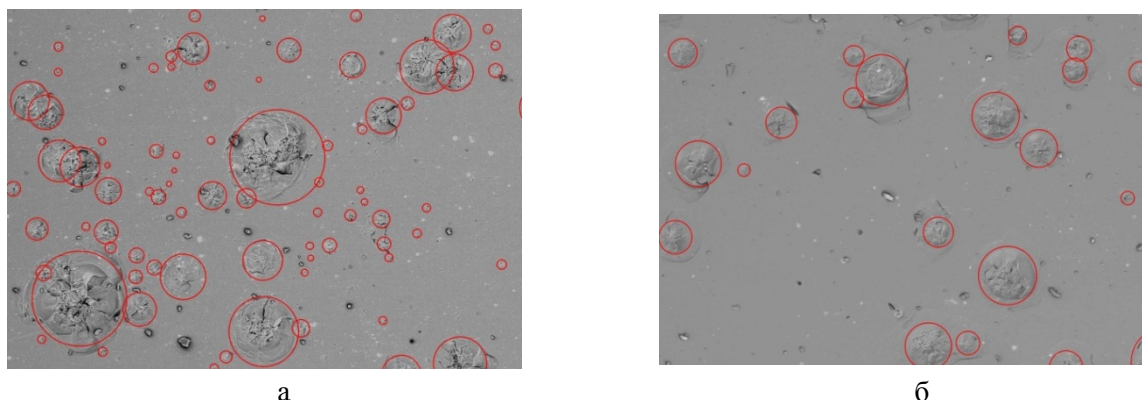


Рис. 1. РЭМ-изображения кратеров, сформированных на поверхности образцов под воздействием высокоскоростного потока микрочастиц Fe: а – кварцевая подложка без покрытия, б – кварцевая подложка с покрытием на основе Al-Si-N (размеры показанных участков поверхности образцов $1,74 \times 1,23$ мм, кратеры обведены красными окружностями)

Можно видеть, что кратеры, сформированные в поверхностном слое кварцевых образцов как с покрытиями, так и без них, имеют форму, характерную для хрупких материалов. Есть большое количество кратеров, имеющих различный размер (рис. 1а) на поверхности исходного кварцевого стекла. На кварцевой подложке с защитным покрытием Al-Si-N число кратеров значительно уменьшается (рис. 1б). Этот факт также подтвержден результатами оценки поверхностной плотности кратеров ρ , показанными в таблице 1.

Экспериментально установлено, что осаждение покрытий Al-Si-N уменьшает в ~ 3 раза поверхностную плотность кратеров, образующихся на кварцевой подложке при ударном воздействии микрочастиц железного порошка средним размером 60 мкм, движущихся со скоростью 5-8 км/сек. Эффект объясняется изменением структуры, фазового состава и механических свойств поверхностного слоя кварцевого стекла при нанесении на него твердого нанокompозитного покрытия с градиентной структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silverman E.M. Space. Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide, NASA Contractor Report 4661, Part 1, August 1995, pp.116.
2. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2009. – 104 с.