

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Si-Al-N НА
КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ**

Е.В. Рыбалко, М.П. Калашников, А.В. Воронов,

Научный руководитель: проф., д.т.н. В.П. Сергеев *

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г.Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: evgeniaribka@yandex.com

**MECHANICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT COATINGS BASED Si-Al-N ON
QUARTZ GLASSIS**

E.V. Rybalko, M.P. Kalashnikov, A.V. Voronov

Scientific Supervisor: Prof. V.P. Sergeev *

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Russia, Tomsk, Av. Akademicheskii, 2/4 634021

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Av. Lenin, 30, 634050

E-mail: evgeniaribka@yandex.com

The transparent coatings on the basis of Si-Al-N were prepared by reactive magnetron sputtering method. Structural-phase state of coatings on the basis of Si-Al-N was investigated by TEM, SEM and X-ray analysis. Nanohardness was measured by nanoindentation method, also we measured the shock durability of samples with and without coating.

Столкновения космических аппаратов (КА) с метеорными телами естественного происхождения и продуктами антропогенного загрязнения космоса относятся к числу важнейших факторов, вызывающих повреждения и разрушения КА. В наибольшей степени от ударов мелких частиц страдают различные оптические элементы: иллюминаторы, линзы, зеркала и т. д. Удар высокоскоростной микрочастицы, вне зависимости от ее происхождения, вызывает механические и плазменные процессы, при которых на поверхности образуется кратер, распространяется ударная волна, нарушающая связи в слоистой структуре оптических элементов [1]. Одним из эффективных способов решения этой проблемы является нанесение износостойких сверхтвердых покрытий с высоким коэффициентом упругого восстановления и низким термическим коэффициентом линейного расширения, прозрачных в видимой области спектра, в частности, нанокompозитных керамических покрытий на основе нитридов и оксидов кремния-алюминия (Si-Al-O-N).

Целью работы является исследование структурно-фазового состояния и механических свойств покрытий на основе Si-Al-N на кварцевых стеклах.

Исследования проводили на двух видах образцов, изготовленных из кварцевого стекла марки КВ: с покрытием на основе Si-Al-N толщиной ~10 мкм, без покрытия. Осаждение покрытий проводили на вакуумной установке типа «КВАНТ» [2].

Структурно-фазовое состояние исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-7 в Co-K_α излучении (для отсеечения β -излучения использовали Fe-фильтр) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения на приборе JEOM-2100. По темнопольным изображениям, полученных методом ПЭМ, определяли средний размер зерен $\langle d \rangle$. Элементный состав покрытий определяли с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора (EDX) INCA-Energy (OxfordInstruments) (MPCA), встроенного в растровый электронный микроскоп LEOEVO-50XVP (РЭМ).

Микротвердость, приведенный модуль упругости и коэффициент упругого восстановления покрытий и стеклянных подложек измеряли, используя нанотвердомер NanoHardnessTester при нагрузке на индентор 20 мН (табл.1). Испытания экспериментальных образцов на ударную стойкость проводили с помощью легкогазовой пушки МПХ23/8 в научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета. Для проведения испытаний экспериментальных образцов была сконструирована специальная технологическая оснастка – предметный стол, который помещался в барокамеру в строго определенное положение относительно ствола легкогазовой пушки.

В качестве частиц для обстрела экспериментальных образцов были выбраны микрочастицы отклассифицированного порошка железа со средним размером $56,3 \pm 8,2$ мкм, с формой частиц близкой к сферической. Общая масса порции порошка для каждого выстрела была постоянной $60,0 \pm 0,1$ мг, при этом их скорости метания составляли 3-5 км/с.

После выстрела на поверхность с кратерами наносилась тонкая (10-20 нм) серебряная пленка (электропроводящий слой). Далее на РЭМ исследовали морфологию поверхности образцов. Съемка проводилась в режиме вторичных электронов с увеличением 100крат при ускоряющем напряжении 20кВ. На каждом образце снималась серия изображений и далее склеивалась в одно панорамное. После склеивания выбиралась площадка 100 м^2 на каждом из 8-ми образцов, на этой площадке производились замеры поперечного размера кратеров. После этого результаты по всем 4-м образцам стекол с покрытием заносились в одну таблицу и обрабатывались одним массивом. Эти данные сравнивались с аналогичными данными, полученными на 4-х исходных стеклах без покрытий, которые обстреливались вместе со стеклами с покрытиями на одной оснастке.

Методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения установлено, что покрытия Si-Al-N имеют многофазную структуру и имеют в своем составе AlN и $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ с ГПУ-решеткой. По темнопольным изображениям, полученных методом ПЭМ, определен средний размер зерен покрытия $\langle d \rangle$, он находится в пределах 5...12 нм. Показано методом MPCA, что соотношение атомной концентрации Al:Si в покрытии $\approx 4:1$.

Для кварцевого стекла с покрытием на основе Si-Al-N и без него была измерена микротвердость и рассчитаны значения приведенного модуля упругости E^* и коэффициента упругого восстановления k_y . Эти данные приведены в таблице 1. Видно, что микротвердость для образцов с покрытием в 3,4 раза выше, чем для образцов без покрытия. Что касается приведенного модуля упругости, то его значение для образца с покрытием превышает значение для кварцевого стекла в три с половиной раза.

На рис. 1 приведено изображение, полученное методом РЭМ, где кружками обведены кратеры, возникающие после обстрела.

Таблица 1. Средние значения микротвердости H_m , приведенного модуля упругости E^* , коэффициента упругого восстановления k_v

Образец	H_m , ГПа	E^* , ГПа	k_v
Стекло КВ без покрытия	$9,26 \pm 0,58$	75,1	0,48
Стекло КВ с покрытием	$31,6 \pm 3,6$	264,7	0,91

Установлено, что на стеклах с покрытием поверхностная плотность образующихся кратеров ρ при одних и тех же условиях испытания существенно ниже, чем на стеклах без покрытия (рис.1). Подсчет количества образовавшихся кратеров за один выстрел на общей площади испытанных стекол показывает, что значения ρ равны $1,08 \times 10^6 \text{ м}^{-2}$ на стеклах без покрытия и $0,39 \times 10^6 \text{ м}^{-2}$, на стеклах с покрытиями.

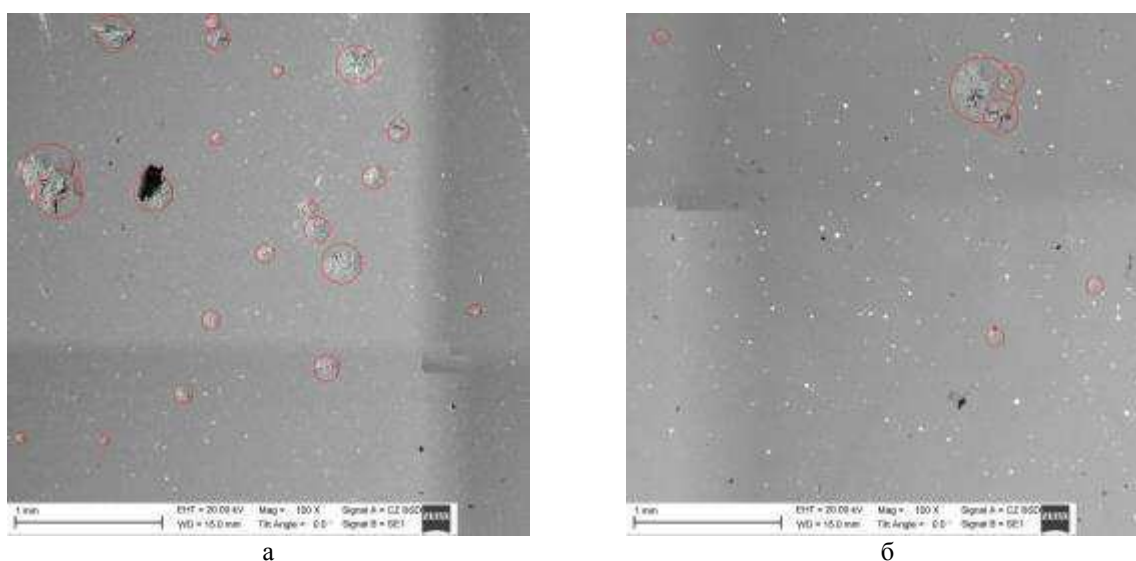


Рис. 1. Изображения кратеров, образовавшихся при воздействии потока частиц железа на образце без покрытия (а) и с покрытием (б)

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что нанесение на кварцевое стекло твердых прозрачных покрытий на основе нитрида кремния-алюминия повышает его микротвердость, а также ударную стойкость против воздействия микрочастиц железа, движущихся со скоростями в интервале 3-5 км/сек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романченков В.П., Бровкин А.Г., Люлин И.Б. Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов. – М.: Гидрометеоздат, 1992.
2. Сергеев В.П., Яновский В.П., Параев Ю.Н., Сергеев О.В., Козлов Д.В., Журавлев С.А. Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ) // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спец. выпуск. – Ч. 2. – С. 333–336.