

КОЛИЧЕСТВО КРАТЕРОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ С ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ НА ОСНОВЕ TA- SI-AL-N ПРИ УДАРАХ ГИПЕРСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ

Р.Б. Турсунханова, аспирант гр. А0-08

В.П.Сергеев, д.т.н., профессор ОмШ, ИШНПТ

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,

E-mail: rbt1@tpu.ru

Космические аппараты (КА) на низкой орбите сталкиваются с природными метеороидами, повреждаются от ударов микрометеороидов и осколков космического мусора. Эти удары могут происходить на чрезвычайно высоких скоростях, и могут привести к разрушению и повреждению важных систем КА [1]. В [большинстве случаев](#) от ударов гиперскоростных частиц страдают различные оптические системы: стекла иллюминаторов, оптические линзы фотоаппаратов, фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей (ФЭП СБ) и т. д. При попадании высокоскоростной частицы в поверхностный слой стекла происходит локальное разрушение и распыление материала. На поверхности обычно образуется повреждение в виде лунки или кратера. В результате ухудшаются их оптические, физические свойства и технические характеристики.

Исходя из этого, одним из эффективных способов упрочнения материалов может быть нанесение на их поверхность наноструктурированных покрытий. На их основе можно формировать наноматериалы с высокими физико-химическими и физико-механическими характеристиками.

Целью данной работы является исследование изменения стойкости кварцевых стекол против ударного воздействия гиперскоростных твердых сферических частиц железного порошка со средним поперечным размером ~60 мкм после нанесения защитных двухслойных прозрачных покрытий на основе Ta/SiAlN в сравнении с SiAlN/TaN.

Методом импульсного магнетронного распыления получены и исследованы 2 вида образцов кварцевых стекол с защитными 2-х-слойными покрытиями: I – на основе Ta/SiAlN с толщиной слоев ~0,1 мкм и 0,9 мкм, и II – на основе SiAlN/TaN с толщиной слоев ~0,9 мкм и 0,1 мкм, соответственно.

При толщине ~1 мкм слой SiAlN является прозрачным в видимой области спектра, тогда как TaN – полупрозрачный, а Ta – совсем непрозрачен. Поэтому за критерий выбора толщины слоев TaN и Ta и порядка их нанесения была принята близость спектров пропускания видимого света. Они были подобраны так, что спектры имели одинаковый характер изменения средней величины коэффициента пропускания видимого света $T = 69 \pm 2\%$ для Ta/SiAlN и SiAlN/TaN и равные в пределах экспериментальной ошибки в области длин волн 450 – 780 нм.

Структурно-фазовое состояние формируемых покрытий исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-7 в $Co-K_{\alpha}$ излучении. Установлено, что слои SiAlN в покрытии I формируют нанокристаллическую структуру, тогда как в покрытии II они находятся в аморфном состоянии. Об этом свидетельствуют картины дифракции, построенные по данным РСА (рисунок 1).

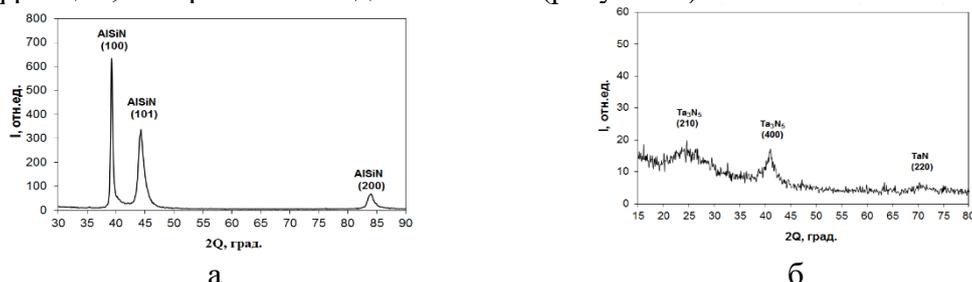


Рисунок 1. Рентгенограммы для покрытий I (а) и для покрытий II (б).

С целью исследования механических свойств кварцевых стекол с покрытиями I и II была измерена микротвердость H_m с помощью нанотвердомера NanoHardnessTester при нагрузке 20 мН, и рассчитаны значения приведенного модуля упругости E^* и коэффициента упругого восстановления k_e (таблица 1). Как видно на образцах с покрытием I механические свойства на 15–20% выше по сравнению с покрытием II. Это согласуется с данными более высоких механических свойств нанокристаллического материала SiAlN [2] в сравнении с TaN [3] и аморфным состоянием SiAlN [4].

Таблица 1. Средние значения микротвердости H_m , модуля упругости E^* , коэффициента упругого восстановления k_e , адгезии F_a и отношение поверхностной плотности кратеров ρ_0 на стекле без покрытия к плотности на стекле с покрытием ρ_n .

Образец	H_m , ГПа	E^* , ГПа	k_e	F_a , Н	ρ_0/ρ_n , мм ⁻²
Стекло с покрытием I	21,73 ± 1,06	133 ± 3	0,85	11,3 ± 0,6	2,1
Стекло с покрытием II	18,73 ± 0,95	131 ± 4	0,72	15,4 ± 0,7	1,57

Величину адгезии покрытий к стеклу определяли с помощью метода царапания поверхности покрытия алмазным индентором при равномерном увеличении нагрузки на него на макроскретч-тестере REVETEST-RST. Царапание поверхности покрытий проводили со скоростью 5 мм/мин, до максимального значения нагрузки 25 Н. Для каждого образца делали две царапины. Длина царапин составляла 10 мм. Оба покрытия обладают удовлетворительной величиной адгезии к подложке. Из полученных данных видно, что покрытие II имеет более высокую величину адгезии к кварцевой подложке, чем покрытие I (таблица 1).

Эксперимент по бомбардировке образцов из кварцевого стекла высокоскоростными сферическими микрочастицами железа со скоростью в интервале 5–8 км/сек был проведен на легкогазовой пушке МПХ23/8. После выстрела зарядом порошка подсчитывали количество образовавшихся кратеров с помощью сканирующего электронного микроскопа и определяли их поверхностную плотность по формуле:

$$\rho = \frac{N}{S},$$

где N - количество образовавшихся кратеров за один выстрел; S – площадь обстрелянного образца. Из таблицы 1 видно, что поверхностная плотность образующихся кратеров для покрытий I и II приведены в таблице 1.

Таким образом, исследованы 2 вида образцов кварцевых стекол с защитными 2-х-слойными покрытиями. Оба слоя Ta и SiAlN в покрытии I и верхний слой TaN в покрытии II формируются в наноструктурном состоянии, нижний слой SiAlN в покрытии II – в аморфном состоянии. Покрытие I имеет более высокие величины микротвердости, модуля упругости и коэффициента упругого восстановления, что обуславливает при осаждении покрытия I на стекло в сравнении с покрытием II достижение более высокого защитного эффекта от ударного воздействия гиперсверхскоростных микрочастиц железа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программ повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (проект ВИУ-ИИШНПТ-213/2020) и фундаментальных научных исследований ИФПМ СО РАН (тема номер FWRW-2021–0010).

Список литературы:

- Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: М., 2009.
- Musil, M. Sasek, P. Zeman, et al. Surf. Coat. Technol. 202, 3485—3493 (2008).

**XIV Международная научно-техническая конференция
«Современные проблемы машиностроения»**

3. Y. H. Yang, D. J. Chen, F. B. Wu. Surf. Coat. Technol. 303, 32-40 (2016).
4. V.P. Sergeev, M.V. Fedorischeva, et al. Adv. Mater. Res. 1085, 289-293 (2015).