

# ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ SI-AL-N ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ РЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МИШЕНИ ALSIRE В АТМОСФЕРЕ АЗОТА И АРГОНА

Турсунханова<sup>2</sup> Р.Б.<sup>1,2</sup>, аспирант гр. А0-08

Сергеев В.П.<sup>1,2</sup>, д.т.н., профессор ОмШ, ИШНПТ

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,

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

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

E-mail: rbt1@tpu.ru

В настоящее время остро стоит проблема безопасности космических аппаратов (КА), связанная с частыми столкновениями корпусов КА с мелкими фрагментами космического мусора и микрометеороидами. В результате оптические системы и конструкции КА накапливают повреждения в виде кратеров и царапин, что приводит к снижению их прочности и долговечности. Обеспечение безопасности космических полетов является важным фактором в освоении космоса. При контроле состояния иллюминаторов, осуществляемом экипажами КА, обнаружены множественные следы мелкократерных повреждений размером до 1 мм [1]. Связи с этим разными исследователями были проведены расчеты потока метеороидных и техногенных частиц, бомбардирующих стекла иллюминаторов, которые впоследствии были сопоставлены с экспериментальными данными и другими теоретическими моделями [2, 3]. Из результатов работы [4] следует, что одним из эффективных способов решения данной проблемы является нанесение на оптические детали КА защитного покрытия Si-Al-N, которое характеризуется высокой прозрачностью в видимой области спектра и высоким уровнем механических свойств.

Целью настоящей работы является исследование микроструктуры, фазового состава и механических свойств многокомпонентного покрытия на основе Al-Si-Re-N, полученного методом магнетронного распыления композиционной мишени на основе сплава  $Al_{1-x}Si_xRe_y$  в газовой азото-аргонной атмосфере.

Материалом для исследований являлось покрытие Al-Si-Re-N, осажденное на поверхность кварцевого стекла диаметром 15 и толщиной 4 мм. Синтез покрытия осуществляли методом магнетронного напыления на установке УВН-05МД «КВАНТ» (НПП «Техимплант лтд», г. Томск) в атмосфере азота и аргона. Микроструктуру и элементный анализ образцов анализировали на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100 (Jeol Ltd, Japan), оснащенный приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) INCA Energy (Oxford Instruments, Великобритания). Микротвердость покрытия определяли на микротвердомере «ПМТ-3» при одной нагрузке 0,3434 Н. Ударные испытания стекла с покрытием Al-Si-Re-N и без покрытия проводили на легкогазовой пушке МПХ23/8 путем бомбардировки образцов железными частицами размерами 50–60 мкм со скоростью 5–8 км/с. Поверхностную плотность образовавшихся на стеклянной пластине кратеров оценивали на сканирующем электронном микроскопе LEO EVO 50 (Zeiss, Германия). Химический состав покрытия, согласно методу ЭДС/ПЭМ, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав покрытия Al-Si-Re-N

Покрытие	Элементы	Концентрация (ат. %)
Al-Si-Re-N	Al	34
	Si	11
	Re	12
	N	43

Структура покрытия Al-Si-Re-N представлена на рис. 1, а. В образце с покрытием, согласно темнопольному ПЭМ изображению, обнаружены столбчатые зерна. Средний размер элементов столбчатой структуры составляет  $39,8 \pm 6,2$  нм в поперечном сечении и  $188 \pm 86$  нм в продольном сечении. На микродифракционной картинке присутствуют кольцевые рефлексы от фазы AlN с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, имеющей пространственную группу P63mc (186), (ICDD #00-008-0262) (рис. 1, б).

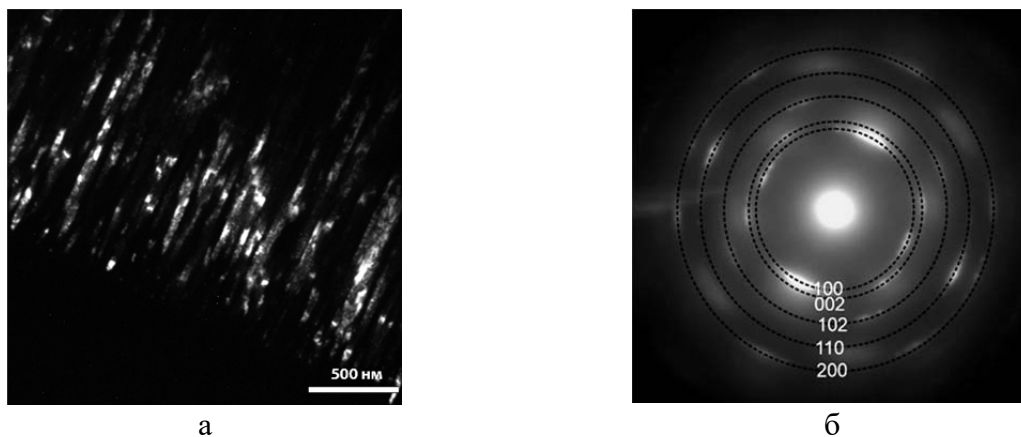


Рис. 1. ПЭМ-изображения микроструктуры покрытия Al-Si-Re-N (а) и соответствующая ему микродифракционная картина (б)

Результаты исследований показали, что среднее значение микротвердости для исходного стекла составляет  $10,6 \pm 1,0$  ГПа, а для стекла с покрытием составляет  $16,9 \pm 0,4$  ГПа, что превышает аналогичное значение для подложки в 1,6 раз. Поверхностная плотность кратеров для подложки из кварцевого стекла (без покрытия) составила  $5,52 \text{ мм}^{-2}$ . Напротив, в образцах с покрытием на основе Al-Si-Re-N толщиной 4 мкм наблюдается значительное снижение количества мелких кратеров и, соответственно, поверхностной плотности кратеров в 1,8 раза (до  $3,08 \text{ мм}^{-2}$ ). Полученные результаты свидетельствуют о том, что нанесение покрытий Al-Si-Re-N снижает вероятность образования кратеров на поверхности кварцевого стекла. Противоударные свойства покрытия обусловлены сформированной в нем нанокристаллической структурой фазы AlN, имеющей более высокие значения микротвердости и модуля упругости, чем у исходного стекла, и повышенную плотность материала легированного рением покрытием Al-Si-Re-N в сравнении с кварцевым стеклом SiO<sub>2</sub>.

Исследование выполнено в рамках программ развития Томского политехнического университета и фундаментальных научных исследований ИФПМ СО РАН (FWRW-2021–0003).

### Список литературы

1. Воробьев Ю.А., Магжанов Р.М., Семенов В.И., Устинов В.В., Фельдштейн В.А., Чернявский А.Г., Влияние высокоскоростных ударов метеороидов и частиц космического мусора на прочность стекол иллюминаторов модулей Международной космической станции, Космическая техника и технология. 1 (2015).
2. Adushkin V.V., Aksenov O.Y., Veniaminov S.S., Kozlov S.I., Tyurenkova V.V. The small orbital debris population and its impact on space activities and ecological safety, Acta Astronaut. 176 (2020) 591–597. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.015>.
3. F. wei Ke, J. Huang, X. zhong Wen, Z. xia Ma, S. Liu, Test study on the performance of shielding configuration with stuffed layer under hypervelocity impact, Acta Astronaut. 127 (2016) 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.06.037>.
4. Божко И.А., Рыбалко Е.В., Иванова А.В., Калашников М.П., Сергеев В.П., Христенко Ю.Ф., Экспериментальное исследование воздействия потока высокоскоростных микрочастиц на защитные покрытия системы Al-Si-N, Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 1 (2017) 95–99.