ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/239

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И
СВОЙСТВ УДАРОПРОЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
СИСТЕМЫ Zr-Y-O НА ПОДЛОЖКАХ Si**

^{1,2}Божко И.А., ²Поданев А.П., ^{1,2}Калашников М.П., ^{1,2}Федорищева М.В., ^{1,2}Сергеев В.П.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

²*Томский политехнический университет, Томск*

В связи с активным освоением космоса и необходимостью развития техники, способной работать в экстремальных условиях космического пространства в настоящее время актуальной задачей является разработка новых функциональных материалов и технологий их получения. В процессе эксплуатации космические аппараты (КА) подвергаются разрушающему воздействию различных факторов, в том числе столкновениям с микрометеороидами. При этом в наибольшей степени от ударов микрометеороидов страдают различные оптические элементы КА, такие как иллюминаторы, линзы, зеркала, фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечных батарей (СБ) и др. Очевидно, что микрочастицы при соударениях с КА не способны вызывать сквозное пробитие указанных элементов, но они способствуют деградации их поверхности. Это приводит к тому, что в процессе длительной эксплуатации КА происходит изменение оптических, электрических, механических и других характеристик оптических элементов [1], которые влияют на работоспособность КА в целом.

Солнечные батареи являются одним из важнейших элементов конструкции КА, так как в космосе они являются единственным источником выработки необходимого количества электроэнергии. В результате негативного воздействия факторов космического пространства, в том числе при воздействии потока высокоскоростных микрометеороидов, происходит нарушение структуры солнечных элементов, что влечет за собой снижение выработки электроэнергии. Одним из возможных способов защиты ФЭП СБ может быть использовано нанесение на их поверхность защитных покрытий, обладающих высокой стойкостью к ударным нагрузкам. В настоящей работе в качестве защиты стеклянных элементов КА от механических повреждений, возникающих при ударном воздействии высокоскоростных твердых частиц, предлагается использовать покрытия на основе Zr-Y-O, полученных методом импульсного магнетронного осаждения. 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. В связи с этим целью данной работы являлось исследование микроструктуры, фазового состава, физико-механических свойств композиционных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм, полученных в условиях импульсного магнетронного осаждения, а также оценка их стойкости к ударному воздействию твердых микрочастиц железа, скорость которых лежит в интервале 5-7 км/с.

Осаждение покрытий системы Zr-Y-O осуществляли методом импульсного магнетронного осаждения на вакуумной установке УВН-05МД «КВАНТ» [2]. Питание магнетрона осуществлялось от импульсного биполярного источника питания частотой 50 кГц, мощность магнетрона достигала 1,2 кВт. Отношение парциальных давлений кислорода и аргона в вакуумной камере установки в процессе осаждения покрытий составляло 1:3. В качестве материала подложки использовали диски диаметром 15 мм и толщиной 4,5 мм из монокристаллического кремния с кристаллографической ориентацией [100]. В процессе магнетронного осаждения защитных покрытий подложку Si предварительно нагревали до $280 \pm 10^\circ\text{C}$ с помощью резистивного молибденового нагревателя мощностью 10 кВт. Температура подложек измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары. По данным гравиметрического метода было установлено, что полученные покрытия системы Zr-Y-O имеют толщину $3 \pm 0,5$ мкм.

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

Результаты исследования фазового состава полученных образцов методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии показали, что покрытие Zr-Y-O имеет ярко выраженную кристаллическую столбчатую структуру, которая формируется по всей толщине покрытия. При этом столбцы ориентированы перпендикулярно поверхности подложки. Фазовый состав формируемого покрытия на основе Zr-Y-O представлен диоксидом циркония ZrO_2 в моноклинной и тетрагональной модификациях.

Рисунок 1 – Спектр светопропускания образца с покрытием системы Zr-Y-O

На рисунке 1 представлены спектры светопропускания образцов стекла К8 с покрытиями Zr-Y-O толщиной 3 мкм в ультрафиолетовом ($\lambda=200-380$ нм) и видимом ($\lambda=380-800$ нм) диапазонах длин волн. Видно, что коэффициент светопропускания исследуемого образца при длине волны 400 нм составляет 65 %. При перемещении в область больших длин волн для исследуемого образца наблюдается увеличение коэффициента светопропускания, величина которого при длине волны 800 нм достигает 80 %. Результаты исследования механических свойств исследуемых образцов показали, что нанотвердость формируемых защитных покрытий системы Zr-Y-O, осаждаемых на поверхность монокристалла Si, при нагрузке 20 мН составляет $12,1 \pm 0,8$ ГПа, что сопоставимо с нанотвердостью образцов исходного кремния, величина которой при нагрузке 20 мН составляет $11,5 \pm 0,4$ ГПа.

В результате ударно-волнового взаимодействия потока высокоскоростных микрочастиц железа [3] и исследуемых образцов на поверхности последних было обнаружено формирование кратеров различного размера. Результаты измерения размеров кратеров по СЭМ изображениям для исходного образца кремния показали, что большинство из них имеют размеры в интервале от 10 до 50 мкм. При переходе в сторону больших размеров наблюдается резкое снижение количества образующихся кратеров и в области 500–800 мкм наблюдается формирование единичных кратеров. Поверхностная плотность кратеров для образцов кремния без покрытия составила $10,85 \text{ мм}^{-1}$. После нанесения защитных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм на образцы кремния поверхностная плотность кратеров составила $2,94 \text{ мм}^{-1}$, что в 3,7 раза меньше по сравнению с исходными образцами. Это происходит за счет того, что защитные покрытия системы Zr-Y-O предотвращают образование на поверхности исследуемых образцов кратеров с размерами менее 30 мкм, а доля кратеров с размером от 30 до 50 мкм составляет менее 5 %.

1. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
2. Сергеев В.П., Яновский В.П., Параев Ю.Н. и др. Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ) // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № Спец2. С. 333-336.
3. Стенд для исследования высокоскоростного соударения мелких частиц с преградой МПК F41F1/00: патент Рос. Федерация № 2610790; заявл. 23.10.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. № - 5.