ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/283

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УДАРОПРОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Божко И.А., Федорищева М.В., Калашников М.П., Сергеев В.П.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Постоянное повышение активности человека по освоению космического пространства вызывает необходимость в увеличении срока активного существования космических аппаратов (КА) путем разработки методов их защиты от различных факторов космического пространства. Одним из опасных факторов, способных вызывать значительную деградацию свойств различных конструкционных элементов КА и их разрушение, является столкновение КА с высокоскоростными микрочастицами естественного и искусственного происхождения. Наиболее подвержены такому воздействию оптические элементы КА. Одним из возможных вариантов защиты оптических элементов могут выступать оптически прозрачные защитные покрытия. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств однослойных и многослойных покрытий систем Al-Si-N и Zr-Y-O, а также оценка их стойкости к ударному воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц Fe.

Нанесение покрытий осуществлялось методом магнетронного осаждения на установке УВН-05МД «КВАНТ». Питание магнетрона осуществлялось от импульсного биполярного источника питания частотой 50 кГц. Мощность магнетрона при осаждении покрытий составляла 1,2 кВт. В качестве материала подложки использовался монокристалл Si (1 0 0). Исследование структурно-фазового состояния образцов проводили методами рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре ДРОН-7 в Co-K α излучении и методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100F при ускоряющем напряжении 200 кВ. Измерение механических свойств кремния с защитными покрытиями проводили методом микроиндентирования поверхности исследуемых образцов стандартной алмазной пирамидой Виккерса на микротвердомере DM8 (фирмы Affri, Италия). Отпечатки наносили при нагрузках 1–5 Н. Ударные испытания производились с помощью легкогазовой пушки МПХ23/8 [1]. В качестве бомбардирующих частиц использовали микрочастицы Fe сферической формы, со средним диаметром $56 \pm 8,2$ мкм, которые разгонялись до скорости 5–7 км/с. После проведения ударных испытаний с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) LEOEVO-50XVP исследовалась поверхность образцов и регистрировались образовавшиеся кратеры. В качестве количественной характеристики воздействия потока микрочастиц на защитные покрытия использовали относительную поверхностную плотность кратеров $\rho_{\text{отн}}$:

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_0}{\rho}$$

где ρ_0 и ρ – поверхностная плотность кратеров на исходных образцах и на образцах с нанесенным защитным покрытием, соответственно.

По данным РСА и ПЭМ установлено, что полученное однослойное покрытие системы Al-Si-N обладает наноразмерной столбчатой структурой и состоит преимущественно из w-AlN (ГПУ). Средний размер кристаллитов AlN в поперечном сечении составляет 25 ± 5 нм. Однослойное покрытие Zr-Y-O толщиной 3 мкм имеет субмикроструктурную столбчатую структуру, средний поперечный размер кристаллитов в котором при перемещении от подложки к свободной поверхности варьируется от 46 ± 7 нм до 200 ± 15 нм. Данное покрытие является двухфазным и содержит 55 об. % M-ZrO $_2$ (монокл.) и 45 об. % T-ZrO $_2$ (тетрагон.). Многослойное покрытие состоит из 12 чередующихся слоев на основе Zr-Y-O и AlSiN. Анализ микродифракционных картин и темнопольных изображений показал, что последние 2 слоя Al-Si-N в многослойном покрытии являются кристаллическими и содержат фазу w-AlN, средний размер кристаллитов которой ≈ 10 нм. Кристаллиты фазы w-AlN имеют волокнистую вытянутую форму, ориентированные по направлению роста

Секция 7. Тонкие пленки и многослойные покрытия как иерархически организованные структуры

данного покрытия. Остальные слои Al-Si-N, наиболее приближенные к подложке Si являются аморфными. Все слои Zr-Y-O в многослойном покрытии имеют ярко выраженную столбчатую структуру состоящую из M-ZrO₂ и T-ZrO₂. При исследовании оптических свойств исследуемых образцов обнаружено, что коэффициент светопропускания в видимой области спектра для покрытий Al-Si-N и Zr-Y-O достигает 83% и 78 %, соответственно. Исследования механических свойств позволили установить, что наибольшей микротвердостью обладает однослойное покрытие системы Al-Si-N, величина которой при нагрузке 1 Н составляет 18,6±1,15 ГПа. Однослойное покрытие системы Zr-Y-O характеризуется более низким значением микротвердости (13,8±0,71 ГПа при F=1 Н), что сопоставимо с микротвердостью многослойного покрытия Al-Si-N/Zr-Y-O (13,4±1,57 ГПа при F=1 Н). Микротвердость исходного Si составляет 10,8±0,58 ГПа. Также обнаружено, что нанесение однослойных и многослойных покрытий на основе Al-Si-N и Zr-Y-O на образцы монокристаллического Si приводит к снижению количества кратеров (рис. 2), формируемых при ударном воздействии потока высокоскоростных микрочастиц железа, в сравнении с исходными образцами Si при одинаковых условиях испытания. При этом, наибольшей стойкостью к ударным воздействиям микрочастиц Fe обладает образец кремния с однослойным покрытием системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм.

Рис. 1. Зависимость коэффициента K_{IC} от величины приложенной нагрузки F для образцов кремния с защитными покрытиями:

- 1 – Si без покрытия; 2 – Si/Al-Si-N;
- 3 – Si/Zr-Y-O; 4 – Si/Al-Si-N/Zr-Y-O

Рис. 2. Изображение кратеров, формируемых на поверхности Si в результате воздействия потока высокоскоростных твердых микрочастиц Fe:

- а – образец Si без покрытия; б – образец Si с защитным покрытием системы Zr-Y-O

Поверхностная плотность кратеров для образцов кремния с защитным покрытием Zr-Y-O составила 16,4 мм⁻², что в 3,55 раза меньше по сравнению с исходными образцами Si. Это происходит за счет предотвращения формирования мелких кратеров, размер которых не превышает 30 мкм, а также за счет существенного уменьшения количества кратеров размером от 30 до 50 мкм.

Работа выполнена в рамках основной научной программы исследований академии наук за 2013-2020 гг.

1. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // Вестник ТГУ. Математика и механика – 2011 – Т. 4. – № 16. – С. 70–78.