

**КЕРАМИЧЕСКИЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ,
НАНОСИМЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ИСПАРЕНИЕМ КЕРАМИКИ
В УСЛОВИЯХ ФОРВАКУУМА**

А.П. Андрейчик, Д.Б. Золотухин, Ю.Г. Юшков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634055E-mail: andreichik94@mail.ru

В мире современных материалов керамика занимает особое место, что обусловлено широким диапазоном ее физических и химических свойств. Керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, великолепным сопротивлением окислению и коррозии, малым коэффициентом теплопроводности [1]. Эти свойства позволили керамическим материалам найти широкое применение в том числе и в авиационной и космической отраслях [2]: для тепловой защиты деталей [3], работающих при статических нагрузках, применяемых, например, для облицовки камер сгорания космических аппаратов, и для долгосрочной защиты последних от воздействия радиации [4] и др.

Наиболее полно требованиям, предъявляемым к современным керамическим материалам, удовлетворяет керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 . Среди методов получения керамических покрытий такого состава – газотермическое напыление, вакуумно-дуговое нанесение. Однако они требуют либо громоздкого и дорогостоящего оборудования, либо оказываются малоэффективными за счет относительно небольшой скорости роста покрытий и их неоднородности. Альтернативой данным методам является электронно-лучевое испарение керамической мишени с последующей конденсацией паров на изделии. Метод выгодно отличается простотой реализации процесса, высокими скоростями осаждения, возможностью регулирования параметров нанесения в широких пределах. Как правило, процесс осуществляется при рабочих давлениях, не превышающих 10^{-2} Па, но при таких низких давлениях во время обработки пучками электронов с энергиями в несколько килоэлектронвольт диэлектрических мишеней происходит их зарядка, приводящая к существенному снижению энергии электронного пучка. Это обстоятельство делает невозможной эффективную передачу энергии пучка обрабатываемому материалу. Предлагаемый метод позволяет решить такую проблему. При давлениях 1–100 Па в области транспортировки электронного пучка генерируется плотная пучковая плазма с концентрацией 10^{10} – 10^{11} см⁻³. Ионы этой плазмы обеспечивают нейтрализацию заряда изолированной мишени и открывают возможность непосредственной электронно-лучевой обработки непроводящих диэлектриков без создания специальных условий для нейтрализации зарядки ее поверхности.

Эксперименты по нанесению керамических покрытий в форвакуумной области давлений проводились на экспериментальной установке, внешний вид которой приведен на рис. 1.

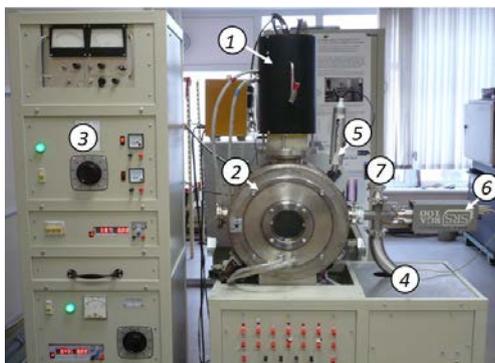


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – форвакуумный источник электронов, 2 – вакуумная камера, 3 – блок электропитания, 4 – патрубок для откачки квадрупольного масс-спектрометра RGA-100, 5 – термопарный вакуумметр, 6 – квадрупольный масс-спектрометр RGA-100, 7 – фланец для ионизационного вакуумметра ПМИ-2.

Исследования микроструктуры образовавшейся на поверхности подложек пленки и ее элементного состава проводились на растровом электронном микроскопе ТМ-1000 (Hitachi, Япония), оснащённом системой энергодисперсионного микроанализатора SwiftED (Bruker, Германия). Толщина тонких пленок (до 1 мкм) определялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 по стандартной методике. Для более толстых пленок использовался трехмерный бесконтактный профилометр (Micro Measure 3D Station) с диапазоном измерения до 80 мкм.

Типичный результат осаждения керамического покрытия на подложку (титановую фольгу) предлагаемым методом приведен на рис. 2.

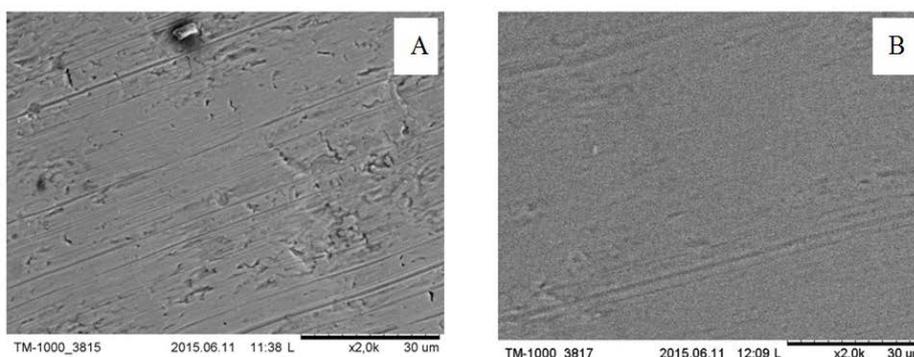


Рис. 2. Снимок поверхности
(А – исходный образец, титановая фольга, В – нанесенный слой керамики)

Как видно из рис. 2А, на поверхности исходного образца присутствуют следы проката, которые остаются после технологического процесса при изготовлении фольги. На рис. 2В представлен тот же образец, уже с нанесенным покрытием из алюмооксидной керамики. Видно, что поверхность образца значительно сглаживается в результате заполнения пор и дефектов подложки материалом распыляемого образца. Профилометрический анализ показал, что на исходном образце амплитуда неровности по глубине составляет порядка 1,2 мкм, а в результате осаждения покрытия она снизилась до 0,8 мкм, т.е. более чем на 30 %. Ширина пиков также уменьшилась более чем на 60 %, что говорит об уменьшении шероховатости поверхности.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность синтеза однородных керамических покрытий на основе Al_2O_3 электронно-лучевым способом в условиях форвакуума. Тем самым сформирован своеобразный задел для дальнейшего создания новой технологии осаждения защитных покрытий, способных решить целый спектр проблем на пути к безопасному функционированию изделий авиакосмической техники.

Работа поддержана грантом РФФИ №16-38-60059 мол_а_дк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волочко А.Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 386 с.
2. Сердобинцев Ю.П. Обзор и анализ применения керамических материалов в различных отраслях промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/115-12085>. – 31.08.17.
3. Максимов В.Г. Высокотемпературная керамическая теплоизоляция (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 6. – С. 72–78.
4. Безродных И. П. Радиационные эффекты в космосе. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2013. – 217 с.