

УДК 538.9+539.23

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlSiN, TiAlSiCN ДЛЯ ЗАДАЧ КОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**Константинов С.В.¹, Комаров Ф.Ф.¹, Чижов И.В.², Зайков В.А.²**¹НИИУ «Институт прикладной физический проблем им. А.Н. Севченко» БГУ,²Белорусский государственный университет,

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Сформированы образцы нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN. Проведены измерения поверхностного R_{\square} и удельного $R_{уд}$ сопротивления нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN четырехзондовым методом при помощи цифрового прибора ИУС-3. Установлено, что все сформированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiN с добавлением кремния Si имеют небольшие значения поверхностных сопротивлений $R_{\square} = 4,2-37,5 \text{ Ом}/\square$ и являются проводящими. Сформированные методом реактивного магнетронного напыления покрытия могут использоваться в качестве износостойких электропроводящих покрытий в авиационном и космическом приборостроении.

Ключевые слова: удельное сопротивление, поверхностное сопротивление, нитриды, карбонитриды, электропроводность.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED TiAlSiN, TiAlSiCN COATINGS FOR SPACE INSTRUMENTATION PROBLEMS**Stanislav V. Konstantinov¹, Fadei F. Komarov¹, Igor V. Chizhov², Valery A. Zaikov²**¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,

Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Samples of nitride and carbonitride TiAlSiN, TiAlSiCN coatings were formed. The surface R_{\square} and specific ρ resistivity of nitride and carbonitride coatings TiAlSiN, TiAlSiCN were measured by the fourprobe method using the IUS-3 digital device. It was found that all formed coatings of TiAlSiN nitride and TiAlSiN carbonitride with the addition of silicon Si are conductive and have small values of surface resistances $R_{\square} = 4.2-37.5 \text{ Ohms}/\square$. Coatings formed by the method of reactive magnetron sputtering can be used as wear-resistant electrically conductive coatings in aviation and space instrumentation.

Key words: resistivity, surface resistance, nitrides, carbonitrides, electrical conductivity.

Адрес для переписки: Константинов С.В., ул. Курчатова 7, г. Минск, 220045, Республика Беларусь

e-mail: svkonstantinow@gmail.com mymail3000@tut.by

Введение. Создание современных приборов с повышенными прочностными характеристиками, в том числе для космической и авиационной техники, требуют разработки принципиально новых материалов с уникальными свойствами [1].

Прочные покрытия на основе нитрида титана обладают высокой твердостью и устойчивостью к деформации [2]. Обладая хорошей электропроводностью данные покрытия позволят создать износостойкие токопроводящие механизмы и узлы для приборов и механизмов функционирующих в тяжелых условиях космического пространства.

Материалы и методы исследования. Формирование покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN осуществлялось методом реактивного магнетронного распыления [2; 3] при различных режимах нанесения.

Поверхностное сопротивление покрытий измерялось четырехзондовым методом при помощи цифрового прибора ИУС-3. Измерения производились в центре образца при комнатной температуре. Определение значения поверхностного сопротивления образца производилось несколькими сериями, в каждой серии производилось по 10 измерений, для получения усредненного значения.

После серии измерений, изменялось положение измерительных зондов на поверхности образца и производилась следующая серия измерений.

Поверхностное сопротивление R_{\square} определяется из выражения:

$$R_{\square} = 4,53U / I, \quad (1)$$

где I – ток, пропускаемый через два внешних зонда (для измерений выбирался рабочий ток $I = 20 \text{ мА}$); U – напряжение, измеряемое между двумя внутренними зондами с помощью вольтметра с высоким входным сопротивлением.

При известных толщинах покрытий и значениях их поверхностного сопротивления можно определить удельное сопротивление $R_{уд}$ по формуле:

$$R_{уд} = R_{\square}h, \quad (2)$$

где h – толщина пленки.

Покрытия наносились на подложки из ситалла, оксида кремния SiO_2 , обладающие высоким удельным сопротивлением, для нивелирования эффекта шунтирования исследуемых пленок.

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 представлены средние значения поверхностного

сопротивления, толщина сформированных наноструктур и значения удельного сопротивления нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий. Удельное сопротивление $R_{уд}$ покрытий варьируется в диапазоне 0,51–42,6 мОм. Влияние материала подложки на измеренное сопротивление незначительно.

Полученные покрытия обладают низким сопротивлением и являются электропроводящими. Не обнаружено значительного влияния градиентного адгезионного подслоя на сопротивление покрытий. Поверхностное сопротивление на подложке из ситалла и оксида кремния SiO₂ отличается незначительно (на ≈13 %).

Таблица 1. Усредненные значения поверхностного сопротивления карбонитридного покрытия TiAlSiCN и нитридного покрытия TiAlSiN на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂

Подложка	Ситалл		SiO ₂	
	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, мОм·см	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, мОм·см
1N1.30	–	–	21,1	15,4
1N1.30 gr	21,0	15,3	23,8	17,3
1N1.32	–	–	28,9	21,9
1N1.32 gr	30,2	22,9	30,6	23,2
2N1.30	35,4	40,2	37,5	42,6
2N2.34	7,5	0,92	–	–
2CN1.30	7,2	16,8	–	–
2CN1.30 gr.	10,2	23,6	7,3	17,0
2CN2.33	4,2	0,51	–	–
2CN2.33 gr.	4,6	0,56	–	–

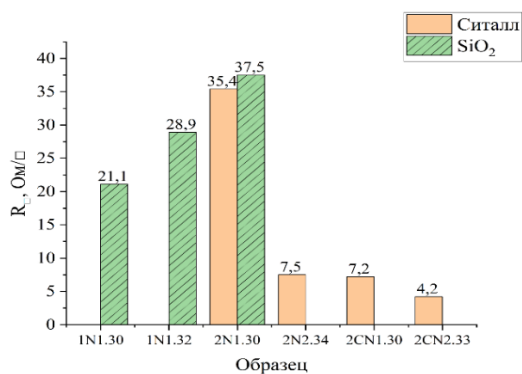


Рисунок 1 – Показатели поверхностного сопротивления R_{\square} покрытий без адгезионного подслоя на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂

Показатели поверхностного сопротивления покрытий без градиентного адгезионного подслоя на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂ показаны на рисунке 1. Минимальное значение поверхностного сопротивления R_{\square} демонстрирует образец 2CN2.33 (4,2 Ом/□). Максимальное значение обнаружено у образца 2N1.30 на подложке из оксида кремния SiO₂ (37,5 Ом/□). Чем выше доля металла в составе покрытия (Ti+Al ат %), тем ниже поверхностное сопротивление покрытия.

Заключение. Установлено, что все сформированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiCN с добавлением кремния Si имеют небольшие значения поверхностных сопротивлений $R_{\square} = 4,2–37,5$ Ом/□ и являются проводящими, демонстрируя металлическую природу проводимости. Выявлено, что чем выше доля металла в составе покрытия (Ti + Al, ат. %), тем ниже сопротивление получаемой структуры. Наименьшие значения сопротивлений ($R_{\square} = 4,2$ Ом/□, $R_{уд} = 0,51$ мОм·см) наблюдались у образца 2CN2.33 с наибольшей концентрацией металлов титана Ti и алюминия Al в составе. Формирование градиентного адгезионного подслоя не оказывает значительного влияния на поверхностное сопротивление нитридных и карбонитридных пленок. Сформированные покрытия могут найти применение в качестве электропроводящих структур, обладающих механической и химической стойкостью и являются пригодными для применения в авиационном и космическом приборостроении.

Литература

- Новиков, Л.С. Космическое материаловедение : учебное пособие / Л.С. Новиков. – М. : Макс Пресс, 2014. – 448 с.
- Структура и микромеханические свойства покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN сформированных методом реактивного магнетронного распыления / Ф.Ф. Комаров [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 241–252.
- Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions / F.F. Komarov [et al.] // RSC Adv. – 2023. – № 13. – P. 18898–18907.