ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕДИ, КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiAlN ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

С.В. Константинов[1)], И.В. Чижов[2)], В.А. Зайков[2)]
[1)] *Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем имени Севченко, ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь, svkonstantinov@bsu.by*
[2)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, igorchizhovwork@gmail.com, zaikov@bsu.by*

Методом реактивно магнетронного распыления сформированы наноструктурированные покрытия нитрида титана-алюминия TiAlN, нитрида и карбонитрида с добавлением меди Cu – TiAlCuCN, TiAlCuN, а также покрытия TiAlSiCN, TiAlSiN с добавлением кремния Si. Для контроля и управления процессом нанесения покрытий методом реактивного магнетронного распыления использовался разработанный модульный комплекс управления расходом газов (МКУРГ). Средствами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изучена структура и морфология сформированных покрытий. Исследованы микромеханические свойства сформированных покрытий методом наноиндентирования: твёрдость (*H*), модуль Юнга (*E*), показатель ударной вязкости (H/E^*), показатель сопротивления пластической деформации (H^3/E^{*2}). Добавление в состав нитрида TiAlN меди Cu или кремния Si, а также углерода C позволяет улучшить микромеханические свойства защитных покрытий, а также потенциально способно повысить радиационную стойкость систем, узлов и механизмов, эксплуатируемых в условиях околоземного и космического пространства.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление; наноиндентирование; твёрдость; модуль Юнга; индекс ударной вязкости H/E^*; индекс сопротивления пластической деформации H^3/E^{*2}; космическое материаловедение.

INFLUENCE OF COPPER, SILICON AND CARBON ADDITIVES ON THE MICROMECHANICAL PROPERTIES OF TiAlN COATINGS FOR SPACE TECHNOLOGIES

Stanislav V. Konstantinov[1)], Igor V. Chizhov[2)], Valery A. Zaikov[2)]
[1)]*Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, 7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, svkonstantinov@bsu*
[2)]*Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, igorchizhovwork@gmail.com, zaikov@bsu.by*

Nanostructured coatings of titanium-aluminum nitride (TiAlN), nitride and carbonitride with the addition of copper Cu - TiAlCuCN, TiAlCuN, as well as coatings of TiAlSiCN, TiAlSiN with the addition of silicon Si were formed by reactive magnetron sputtering. To control and manage the deposition process by reactive magnetron sputtering, the developed modular gas flow control complex (MGFCC) was used. Scanning electron microscopy (SEM) was used to study the structure and morphology of the formed coatings. The micromechanical properties of the formed coatings were studied by the nanoindentation method: hardness (*H*), Young's modulus (*E*), impact strength index (H/E^*), plastic deformation resistance index (H^3/E^{*2}). The addition of copper Cu or silicon Si, as well as carbon C to the TiAlN nitride composition improves the micromechanical properties of protective coatings, and can also potentially increase the radiation resistance of systems, assemblies and mechanisms operated in near-Earth and outer space conditions.

Keywords: reactive magnetron sputtering; nanoindentation; hardness; Young's modulus; impact strength index H/E^*; plastic deformation resistance index H^3/E^{*2}; space materials science.

Введение

Разработка наноструктурированных покрытий, обладающих уникальными свойствами и изучение их оптических, микромеханических, и электрических свойств является одним из наиболее актуальных направлений современного материаловедения [1, 2]. Перспективными в

этом плане являются покрытия нитрида титана-алюминя TiAlN с различными добавками, которые оказывают значительное влияние на ключевые свойства нанокомпозита.

В работе [1] показано, что добавление меди в состав покрытия TiAlN приводит к повышению прочности нанокомпозита. Покрытия с добавлением кремния Si TiAlSiN и TiAlSiCN демонстрируют высокую твердость, хорошую адгезию к подложке, низкий коэффициент трения [3].

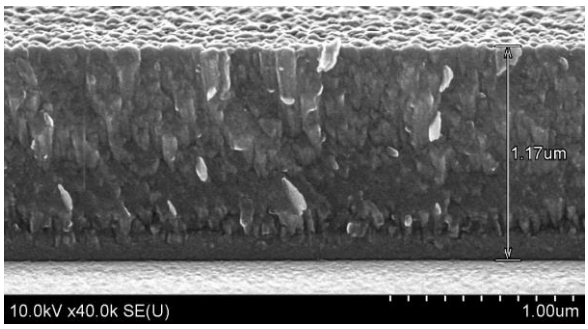
Материалы и методы исследования

Методом реактивного магнетронного распыления сформированы покрытия TiAlN [2], а также нитридные и карбонитридные покрытия с добавками кремния Si TiAlSiN, TiAlSiCN [3] и меди Cu TiAlCuN, TiAlCuCN [2].

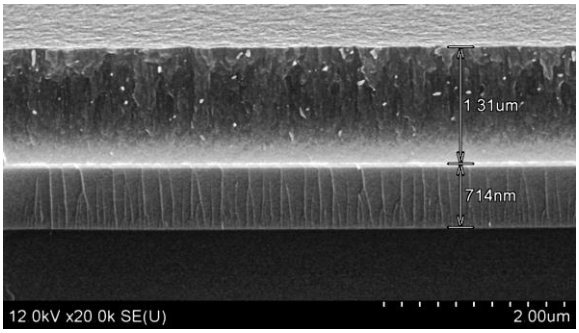
Морфология и микроструктура нанесённых покрытий исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Hitachi SU3400 (Япония). Микромеханические характеристики полученных покрытий исследовались по методике Оливера и Фарра методом наноиндентирования [1-3] на приборе NanoHardness Tester (NHT2) CSM Instruments (Швейцария).

Результаты и их обсуждение

Морфология сформированных покрытий характеризуется частично глобулярной однородной микроструктурой равноосных нанокристаллитов (рисунок 1). В структуре отсутствуют трещины и пустоты, которые могут оказывать негативное влияние на механические свойства покрытий. Изображения исследуемых покрытий в поперечном сечении, где обнаружено присутствие переходного слоя металла без азота, позволяют сделать вывод о хорошей адгезии пленок к подложке. Толщина покрытий с добавкой меди Cu варьируется в диапазоне 1120 – 1900 нм, с добавкой кремния Si – в пределах 430 - 1370 нм.



(а)



(б)

Рис. 1. СЭМ микрофотографии поперечного сечения покрытия нитрида титана TiAlSiN с добавлением кремния Si 1N1.27 (а) и покрытия карбонитрида титана TiAlCuN с добавлением меди Cu 4N1.2 (б)

На рисунке 2 представлены величины твёрдости образцов покрытий с добавлением меди Cu, кремния Si и углерода C. Внесение добавок в покрытие приводит к измельчению кристаллитов, ввиду сегрегации меди и кремния по границам раздела фаз в аморфном состоянии [1, 3]. Это, в свою очередь, приводит к повышению твердости, наибольшее значение которой H = 40.43 ГПа демонстрирует образец 3CN1.30. Добавка углерода также способна увеличивать твердость покрытий за счет формирования карбидов.

Измеренные значения модуля Юнга для исследуемых образцов покрытий TiAlN, TiAlSiCN, TiAlSiN, TiAlCuN, TiAlCuCN представлены на рисунке 3.

В сравнении с образцом нитрида титана TiAlN, покрытия с добавками кремния Si демонстрируют больший модуля Юнга, а образцы с добавлением меди Cu, наоборот, демонстрируют меньший модуль Юнга.

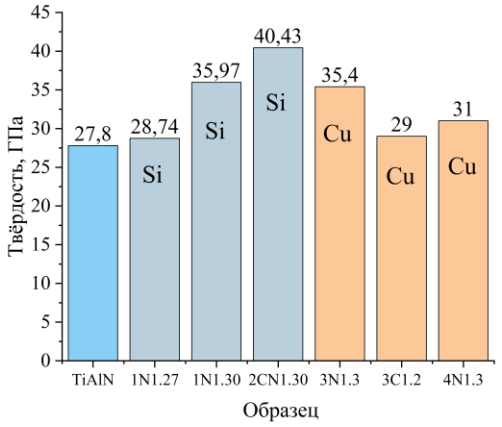


Рис. 2. Твёрдость покрытий: чистого нитрида (голубой), с добавлением меди Cu (оранжевый) и добавлением кремния Si (серый)

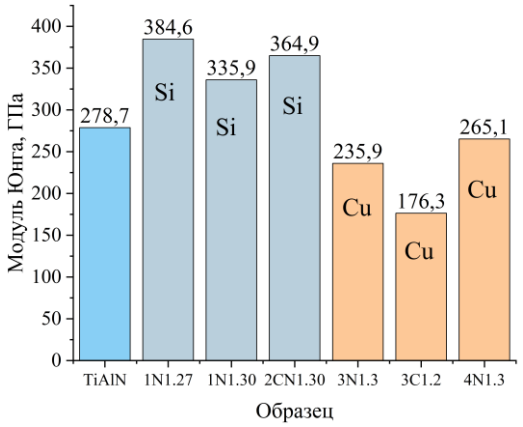


Рис. 3. Модуль Юнга покрытий: чистого нитрида (голубой), с добавлением меди Cu (оранжевый) и добавлением кремния Si (серый)

Образцы нитридных TiAlSiN и карбонитридных покрытия TiAlSiCN, демонстрируют на 3.2 – 45.3 % большую твёрдость, на 20.5 – 38 % больший модуль Юнга в сравнении с чистым нитридом TiAlN. Покрытия TiAlCuN, TiAlCuCN обладают на 4.2 – 27.4 % большей твёрдостью и меньшим модулем Юнга (на 4.8 – 36.7 %), относительно чистого нитрида TiAlN. Добавление меди Cu и кремния Si в нанокомпозит повышает значения индексов ударной вязкости H/E^* и сопротивления пластической деформации H^3/E^{*2} относительно нитрида TiAlN без добавок (рис. 4).

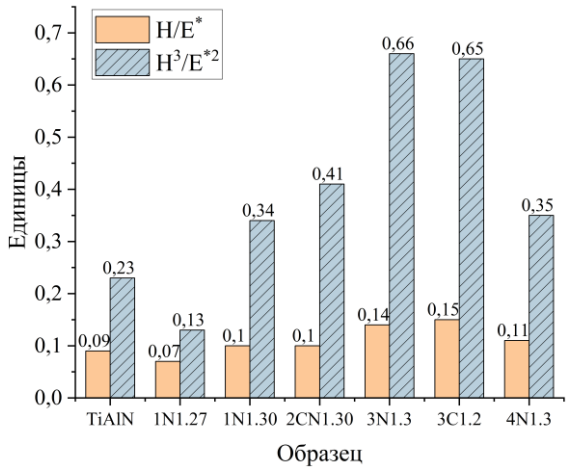


Рис. 4. Показатели ударной вязкости H/E^* и сопротивления пластической деформации H^3/E^{*2} покрытий: TiAlN, с добавлением меди (1N1.27, 1N1.30, 2CN1.30) и добавлением кремния Si (3N1.3, 3C1.2, 4N1.3)

Заключение

Полученные покрытия обладают высокой твёрдость, устойчивостью к ударным нагрузкам, кроме этого, хорошей сопротивляемостью пластической деформации. Сформированные покрытия пригодны для повышения надежности и защиты узлов и деталей космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1 Константинов С.В., Комаров Ф. Ф., Чижов И. В., Зайков В. А. Структурно-фазовые состояния и микромеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN *Доклады Национальной академии наук Беларуси* 2023; 67(2): 101–110.

2 .Komarov F.F., Konstantinov S.V., Żuk J., Droździel A., Pyszniak K., Chizhov I.V et al. Structure and Mechanical Properties of TiAlN Coatings under High-Temperature Ar^+ Ion Irradiation. *ACTA PHYSICA POLONICA A.* 2022; 142(6): 690-696.

3 Константинов С. В., Комаров Ф. Ф., Чижов И. В., Зайков В. А. Влияние добавки кремния на элементный состав и структуру покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN. Материалы 7-й Международной конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (18-19 мая 2023 года) г. Минск. 2023 С.319-321.