

УДК 621.793.7:620.178.1

**ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА И ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЯХ
Ti-Al-Ta-N/Ti-Al-N НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Е.Д. Кузьминов^{1,2}

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А. Р. Шугуров²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/4, 634055
E-mail: evgenij_kuzminov00@mail.ru

**INFLUENCE OF NUMBER AND THICKNESS OF LAYERS IN Ti-Al-Ta-N/Ti-Al-N MULTILAYER
COATINGS ON THEIR MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS**

E.D. Kuzminov^{1,2}

Scientific Supervisor: Dr. A.R. Shugurov²

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute for Physics of Strength and Material Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055
E-mail: evgenij_kuzminov00@mail.ru

Abstract. *The work investigated the dependence of the mechanical and tribological characteristics of multilayer coatings $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}N$ on the number and thickness of individual layers. It is shown that, despite a decrease in the hardness of multilayer composites $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N/Ti_{0.45}Al_{0.55}N$ in comparison with a single-layer coating $Ti_{0.41}Al_{0.49}Ta_{0.10}N$, they are characterized by increased wear resistance. The main reason for increasing the wear resistance of multilayer coatings based on the $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ system is the suppression of the growth of columnar materials through the entire thickness of the coating due to the presence of interfaces between the layers.*

Введение. Твердые керамические покрытия широко используются в различных отраслях промышленности для защиты деталей, работающих в условиях сильных механических и фрикционных нагрузок [1]. Одним из ключевых параметров, позволяющих обеспечить повышенную износостойкость защитных покрытий, является их высокая твердость. Однако известно, что твердые покрытия обычно характеризуются низкой трещиностойкостью [2]. Быстрое распространение трещин через всю толщину покрытия обуславливает отслоение и скалывание его фрагментов, а, следовательно, способствует его быстрому изнашиванию. Поэтому для повышения стойкости покрытий к износу необходимо обеспечить в них оптимальное сочетание твердости и трещиностойкости. Основными способами повышения трещиностойкости покрытий являются их легирование дополнительными химическими элементами, а также нанесение многослойных композиций, состоящих из чередующихся слоев различных материалов [3]. При этом большое влияние на характеристики подобных покрытий оказывает их архитектура, т.е. количество и толщина отдельных слоев. Целью данной работы являлось изучение влияния количества и

толщины слоев в многослойных покрытиях $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ на их механические и трибологические характеристики.

Экспериментальная часть. Покрытия системы Ti-Al-Ta-N наносили методом реактивного магнетронного распыления в среде из смеси газов аргона и азота на подложки из технически чистого титана. Были исследованы многослойные композиции $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$, состоящие из 6 (3 слоя $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ и 3 слоя $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$) и 15 слоев (8 слоев $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ и 7 слоев $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$), а также однослойное покрытие $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$. Толщина слоев составляла 0,55/0,45 мкм в шестислойных композициях и 0,25/0,15 мкм в покрытиях, содержащих 15 слоев. Общая толщина покрытий варьировалась в пределах 3,00-3,05 мкм.

Механические характеристики покрытий были исследованы методом наноиндентирования и скретч-тестирования с помощью приборов NanoTest и Revetest-RST соответственно. Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифракции были изучены внутренняя микроструктура и фазовый состав покрытий соответственно. Трибологические испытания проводились на установке CSEM CH2000 в условиях сухого трения по схеме «шар-по-диску». Оценка износа покрытий была выполнена путем анализа профилей поперечного сечения дорожек трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ. Морфологию поверхностей трения исследовали методом сканирующей электронной микроскопии.

Результаты. Анализ картин рентгеновской дифракции выявил, что все слои в многослойных композициях, как и однослойное покрытие $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$, имеют ГЦК структуру типа NaCl (B1), то есть представляют собой твердый раствор, в котором Al и Ta частично замещают Ti в кристаллической решетке TiN. Анализ внутренней микроструктуры многослойных покрытий методом ПЭМ показал, что слои $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ и $Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ обладают выраженной столбчатой зеренной структурой. При этом чередование слоев эффективно подавляет рост столбчатых зерен через всю толщину покрытия. В каждом новом слое $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ на границе с нижележащим слоем происходит образование зародышей и рост новых зерен.

Установлено, что многослойные композиции $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ характеризуются более низкой твердостью H , чем однослойное покрытие (30,0 ГПа). Напротив, приведенный модуль Юнга E^* многослойных покрытий оказывается выше, чем у покрытия $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$ (312 ГПа). При этом уменьшение количества слоев в многослойных покрытиях с 0,55/0,45 до 0,25/0,15 мкм, приводит к небольшому повышению H и E^* с 28,2 и 356 ГПа до 28,6 и 363 ГПа соответственно. В результате, у многослойных композиций существенно уменьшаются параметры H/E^* и H^3/E^{*2} , которые определяют предельную упругую деформацию, вязкость разрушения и критическую нагрузку для начала пластической деформации.

Скретч-тестирование образцов показало, что многослойные покрытия $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ характеризуются более низкими, по сравнению с однослойным покрытием, значениями критических нагрузок, которые соответствуют началу растрескивания и скалывания, а также полному удалению покрытия из царапины разрушения. При этом увеличение количества слоев в композиции $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ способствует повышению её стойкости к образованию трещин при скретч-тестировании, в то время как адгезионная прочность покрытий практически не изменяется.

Установлено, что основным механизмом разрушения всех покрытий при трибологических испытаниях является их абразивное изнашивание. При этом переход от стадии умеренного изнашивания

к стадии катастрофического изнашивания происходит в результате распространения трещин через всю толщину покрытий, что приводит к отслоению крупных фрагментов покрытий. В процессе дальнейших испытаний данные фрагменты переносятся вдоль дорожки трения, способствуя существенному увеличению абразивного воздействия.

Создание многослойной архитектуры в покрытиях $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ привело к подавлению распространения трещин вглубь покрытий за счет наличия границ раздела между слоями. Во-первых, границы раздела препятствовали росту через всю толщину покрытий столбчатых зерен, границы которых являются путями для быстрого распространения трещин. Во-вторых, они способствовали отклонению трещин на границах раздела между слоями. При этом увеличение количества слоев сопровождалось повышением интенсивности износа. В результате наиболее высокой износостойкостью характеризуются шестислойные покрытия $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$, у которых она снизилась на 30% по сравнению с однослойным покрытием.

Заключение. В результате проведенных исследований показано, что создание многослойной архитектуры покрытий $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N/Ti_{0,45}Al_{0,55}N$ позволило повысить в 1,3 раза их износостойкость по сравнению с однослойным покрытием $Ti_{0,41}Al_{0,49}Ta_{0,10}N$. Ключевым преимуществом нанесения многослойных композиций с чередующимися керамическими слоями является возможность повысить их трещиностойкость без существенного снижения твердости и изгибной жесткости. В результате удается получить покрытия, обладающие высокой стойкостью к разрушению в различных условиях нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perea D., Bejarano G. Development and characterization of TiAlN (Ag, Cu) nanocomposite coatings deposited by DC magnetron sputtering for tribological applications // Surf. Coat. Technol. – 2020. – V. 381. – P. 125095.
2. Sun D., Fu, Y., Pei Y.T., De Hosson J.T.M. Ni-toughened nc-TiN/a-SiNx nanocomposite thin films // Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 200. – №. 5-6. – P. 1530-1534.
3. Musil J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness // Surface and Coatings Technology. – 2012. – V. 207. – P. 50-65.