

УДК 621.793.79:620.178.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ТА И МНОГОСЛОЙНОЙ АРХИТЕКТУРЫ
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ TI-AL-N НА ИХ ДЕФОРМАЦИЮ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ
СКРЕТЧ-ТЕСТИРОВАНИИ И ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ**

Е.Д. Кузьминов¹, Ю.А. Гаранин²

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А. Р. Шугуров¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/4

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: evgenij_kuzminov00@mail.ru

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TA ALLOYING AND MULTILAYER ARCHITECTURE
OF COATINGS ON THE BASIC TI-AL-N SYSTEMS ON THEIR DEFORMATION AND FRACTURE
DURING SCRATCH TESTING AND UNIAXIAL STRETCHING**

E. D. Kuzminov¹, Yu.A. Garanin²

Scientific Supervisor: Dr. A.R. Shugurov¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskyy av. 2/4

²Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: evgenij_kuzminov00@mail.ru

***Abstract.** The effect of Ta alloying and the multilayer architecture of coatings based on the Ti-Al-N system on their behavior under uniaxial tension and scratch testing is investigated. It is shown that the alloying with tantalum leads to a considerable decrease in the density of transverse cracks in the coatings. At the same time, the creation of multilayer compositions consisting of alternating ceramic and metal layers contributes to an increase in the crack resistance of the protective coatings under scratch testing due to the suppression of grain growth through the entire thickness of the coating, as well as effective energy dissipation at the interfaces between the layers.*

Введение. На сегодняшний день осаждение твердых защитных покрытий является одним из основных способов повышения износостойкости, стойкости к окислению, коррозии и эрозии различных материалов. В частности, широкое применение получили покрытия системы Ti-Al-N. Однако, несмотря на высокую твердость данных покрытий, введение Al в решетку TiN также приводит к снижению их трещиностойкости (вязкости разрушения) [1], а следовательно, и к ухудшению износостойкости. Наиболее перспективными направлениями увеличения трещиностойкости покрытий на основе нитридов переходных металлов являются их легирование дополнительными химическими элементами и создание многослойных композиций с чередующимися слоями различных материалов. В частности, введение тантала в покрытия Ti-Al-N позволяет в широких пределах варьировать электронную конфигурацию атомов, что обуславливает существенное изменение характера химической связи и, тем самым, ключевых свойств покрытий. При создании многослойных композиций перспективным является

створення системи, що складається з чергуючих керамічних і металічних шарів. Введення металічних шарів дозволяє збільшити енергію руйнування подібних покриттів, а також забезпечити додаткову дисипацію енергії за рахунок створення меж розділу між шарами, які сприяють відхиленню тріщин [2]. Таким чином, метою даної роботи є дослідження впливу легування Ta і багаторівневої архітектури покриттів на основі системи Ti-Al-N на їх деформацію і руйнування при скретч-тестуванні і одноосному навантаженні.

Експериментальна частина. Покриття системи Ti-Al-N наносили методом реактивного магнетронного розпилення в середі з суміші газів аргону і азоту на підкладки з технічно чистого титану. Осадження покриттів проводили з допомогою двухмагнетронної розпилювальної системи з використанням мішеней TiAl (50/50 ат.%) і Ta (99,9 ат.%). Товщини покриттів і окремих шарів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Кількість шарів, товщина і елементний склад покриттів

Покриття	Число шарів	Товщина шару, мкм	Загальна товщина покриття, мкм	Вміст елементів в керамічних шарах, ат. %		
				Ti	Al	Ta
Ti-Al-N	1	3,0	3,0	44	56	-
Ti-Al-Ta-N	1	3,0	3,0	42	47	11
Ti-Al-Ta-N/TiAl	4/3	0,7/0,1	3,1	42	47	11
Ti-Al-Ta-N/Ta	4/3	0,7/0,1	3,1	42	47	11

Методами рентгеновської дифракції і просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ) були вивчені фазовий склад і внутрішня мікроструктура покриттів відповідно. Механічні характеристики покриттів були досліджені методом наноіндентування. Дослідження тріщиностійкості покриттів на основі системи Ti-Al-N проводили методами скретч-тестування і одноосного розтягнення. При скретч-тестуванні були визначені критичні навантаження L_{c1} і L_{c2} , що відповідають виникненню в покриттях перших тріщин і їх повному викрашіванню відповідно. Параметри L_{c1} і L_{c2} характеризують тріщиностійкість і адгезійну міцність покриттів відповідно. Вивчення царапин після скретч-тестування, а також поверхні зразків після одноосного розтягнення проводили методами оптичної і скануючої електронної мікроскопії (СЕМ).

Результати. Методом рентгеновської дифракції встановлено, що керамічні шари во всіх досліджуваних покриттях мають ГЦК структуру типу NaCl (B1) без вираженої переважної орієнтації. Наряду з пиками Ti-Al-Ta-N на дифрактограмах багаторівневих покриттів Ti-Al-Ta-N/TiAl і Ti-Al-Ta-N/Ta присутні рефлекси γ -TiAl і Ta відповідно. Дослідження поперечного перерізу зразків методами СЕМ і ПЕМ показали, що всі покриття характеризуються щільною структурою. Керамічні шари во всіх досліджуваних покриттях мають стовпчасту зеренну структуру. Металічні шари подавляють ріст стовпчастих зерен через всю товщину покриттів, так що в кожному новому шарі Ti-Al-Ta-N відбувається зародкоутворення і ріст нових зерен.

Методом наноіндентування показано, що одношарові покриття Ti-Al-N і Ti-Al-Ta-N характеризуються близькими значеннями твердості H (31,8 і 31,5 ГПа відповідно), тоді як ефективний модуль Юнга E^* покриття Ti-Al-Ta-N (312 ГПа) на ~5% менше, ніж у Ti-Al-N (328 ГПа).

У многослойных покрытий наблюдается снижение твердости на 10-15% по сравнению с покрытием Ti-Al-Ta-N до 27,5 и 28,6 ГПа для Ti-Al-Ta-N/TiAl и Ti-Al-Ta-N-Ta соответственно. В то же время эффективный модуль Юнга многослойных покрытий незначительно уменьшается до 307 и 310 ГПа для Ti-Al-Ta-N/TiAl и Ti-Al-Ta-N-Ta соответственно. Снижение механических характеристик многослойных покрытий обусловлено вкладом более мягких металлических слоев в механический отклик покрытий при наноиндентировании.

Проведенные исследования выявили у всех покрытий трехстадийный характер разрушения при одноосном растяжении. На первой стадии в покрытиях возникли поперечные трещины (при деформациях $\varepsilon_I = 2,00-2,36\%$), плотность распределения N_t которых быстро росла с увеличением степени деформации. Вторая стадия разрушения ($\varepsilon_{II} = 2,61-3,09\%$) характеризовалась снижением скорости роста плотности распределения поперечных трещин. При деформациях $\varepsilon_{III} = 3,72-4,45\%$ наступила третья стадия разрушения покрытий на основе системы Ti-Al-N, на которой в них образовались диагональные трещины. Согласно полученным результатам у всех исследованных покрытий, легированных Ta, величина N_t оказалась ниже, чем покрытие Ti-Al-N.

Исследование закономерностей деформации и разрушения покрытий при скретч-тестировании показало, что самой низкой стойкостью к возникновению трещин ($L_{c1} = 6,1$ Н) характеризуется покрытие Ti-Al-N, в то время как наиболее высокая критическая нагрузка $L_{c1} = 9,0$ Н была обнаружена у покрытия Ti-Al-Ta-N. Многослойные композиции продемонстрировали близкие значения L_{c1} , которые оказались ниже, чем у покрытия Ti-Al-Ta-N. В то же время, самой сильной адгезией обладает многослойное покрытие Ti-Al-Ta-N/TiAl, у которого в отличие от других образцов практически не наблюдалось обнажения подложки вплоть до максимальной приложенной нагрузки 40 Н. Самая низкая величина $L_{c2} = 25,7$ Н была установлена в случае покрытия Ti-Al-Ta-N-Ta.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что легирование покрытий Ti-Al-N танталом и создание многослойной архитектуры, состоящей из чередующихся керамических и металлических слоев, приводит к снижению их твердости и модуля упругости. В то же время, испытания на одноосное растяжение продемонстрировали снижение плотности растрескивания всех покрытий легированных Ta. Более того, создание многослойных композиций Ti-Al-Ta-N/TiAl и Ti-Al-Ta-N-Ta позволило эффективно подавить формирование столбчатых зерен через всю толщину покрытий, границы которых являются путями для быстрого распространения трещин. В результате, наиболее высокая стойкость к царапанию индентором была выявлена у покрытий Ti-Al-Ta-N/TiAl.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0010. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eremeev S.V., Shugurov A.R. Chemical bonding analysis in $Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN$ solid solutions // Surf. Coat. Technol. – 2020. – V. 395. – P. 125803.
2. Zhang S., Sun D., Fu Y., Du H. Toughening of hard nanostructural thin films: a critical review // Surf. Coat. Technol. – 2005. – V. 198. – P. 2-8.