

## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

### **INTERNATIONAL WORKSHOP**

**«Multiscale Biomechanics and Tribology  
of Inorganic and Organic Systems»**

### **МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«Перспективные материалы с иерархической структурой  
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,  
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ  
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

**«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»**

DOI: 10.17223/9785946218412/302

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ Ta В ПОКРЫТИЯХ Ti-Al-Ta-N НА ИХ СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

<sup>1</sup>Шугуров А.Р., <sup>1,2</sup>Кузьминов Е.Д., <sup>1</sup>Кастеров А.М., <sup>1,3</sup>Акулинкин А.А., <sup>1,2</sup>Панин А.В.

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

<sup>2</sup>*НИИ Томский политехнический университет, Томск*

<sup>3</sup>*Томский научный центр СО РАН, Томск*

Покрытия на основе нитридов переходных металлов, в особенности системы Ti-Al-N, на сегодняшний день являются наиболее востребованными для защиты от износа и коррозии деталей и механизмов в обрабатывающей, авиакосмической, автомобильной, медицинской и других отраслях промышленности. Добавление Al в покрытия TiN позволило резко увеличить их стойкость к окислению (с 500 °С до 800 °С), а также обеспечить сохранение высоких значений твердости и износостойкости при повышенных температурах. Дальнейшие перспективы повышения надежности и долговечности покрытий на основе Ti-Al-N связаны с введением в их состав дополнительных элементов, то есть переход к системам, содержащим 4, 5 и более компонентов. В частности, легирование покрытий Ti-Al-N элементами IV и V групп (Zr, Hf, Nb и Ta) позволяет повысить их механические характеристики, износостойкость и термическую стабильность. Однако влияние легирующих добавок на характеристики подобных многокомпонентных покрытий в значительной степени определяется их относительным содержанием, что обуславливает необходимость поиска оптимального состава покрытий, обеспечивающего высокие значения прочности, вязкости разрушения, сопротивления образованию трещин и др. Цель данной работы – исследование влияния легирования Ta на структуру и механические свойства покрытий на основе Ti-Al-N, а также характер их деформации и разрушения при одноосном растяжении.

Осаждение покрытий выполняли методом реактивного магнетронного распыления на подложки из титанового сплава VT1-0 и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Покрытия наносили с помощью двухмагнетронной распылительной системы, в которой использовались две мишени, состоящие из сплава Ti-Al (64 вес. % Ti и 36 вес. % Al) и Ta соответственно. Распыление проводили в среде из смеси газов аргона и азота при давлении 0,3 Па. Отношение парциального давления азота к общему давлению газовой смеси в рабочей камере поддерживали на уровне 0,23. Подложки подогревали до температуры 425 °С. Толщина покрытий составляла 3 мкм.

Методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии исследовано влияние содержания Ta на морфологию поверхности и микроструктуру покрытий Ti-Al-Ta-N. Установлено, что независимо от концентрации Ta покрытия характеризуются мелкозернистой морфологией поверхности и столбчатой зеренной структурой. Методом рентгеновской дифракции в условиях симметричной съемки исследованы микроструктура и фазовый состав покрытий Ti-Al-Ta-N. Выявлено, что все исследованные покрытия имеют ГЦК структуру типа NaCl, в которой Al и Ta частично замещают Ti. При этом с увеличением концентрации Ta от 0 до 65 ат. % происходит линейный рост параметра решетки покрытий с 0,417 до 0,434 нм. Кроме того, с ростом содержания Ta наблюдается изменение текстуры покрытий от (111) в образцах, содержащих 10 ат. % Ta, к (200) у покрытий с 65 ат. % Ta.

Аттестация механических характеристик покрытий Ti-Al-Ta-N методом наноиндентирования показала, что введение Ta приводит к снижению их твердости и эффективного модуля упругости по сравнению с покрытием Ti-Al-N. При этом твердость покрытий  $H$  слабо зависит от содержания Ta, тогда как модуль упругости  $E^*$  монотонно снижается во всем исследованном диапазоне концентраций Ta. В результате зависимость отношения  $H/E^*$  от содержания Ta имеет максимум при 30-35 ат. %. На основе измерений кривизны прогиба подложки методом контактной профилометрии проведены расчеты остаточных внутренних напряжений в покрытиях с помощью формулы Стоуни. Показано, что введение Ta способствует росту сжимающих напряжений в покрытиях. При этом наиболее

## Секция 5. Деградация тонких пленок и многослойных покрытий как иерархически организованных структур

---

сильные напряжения также развиваются в покрытиях с 30-35 ат. % Ta, где они достигают величины 3,9 ГПа.

Исследованы закономерности механического поведения покрытий Ti-Al-Ta-N на подложке Ti при одноосном растяжении. Показано, что деформация и разрушение покрытий происходит посредством последовательного развития и конкуренции между различными механизмами релаксации напряжений, которые включают в себя образование поперечных и диагональных трещин, а также изгиб и отслоение образовавшихся фрагментов покрытий. Установлено, что процесс разрушения покрытий состоит из нескольких стадий, каждая из которых характеризуется различной скоростью роста плотности распределения трещин. Определен диапазон концентраций Ta, в котором покрытия Ti-Al-Ta-N характеризуются наиболее высокой стойкостью к образованию трещин.

Таким образом, в результате проведенных исследований изучены закономерности изменения структуры и механических характеристик покрытий Ti-Al-Ta-N с увеличением в них содержания Ta, а также выработаны рекомендации по их оптимальному элементному составу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №18-19-00589).