

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»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/301

**ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СЛОЕВ Ti-Al НА РАЗРУШЕНИЕ
МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Ti-Al-N ПРИ ОДНООСНОМ
РАСТЯЖЕНИИ И ИХ СТОЙКОСТЬ К ОКИСЛЕНИЮ**

Шугуров А.Р., Кастеров А.М., Кузьминов Е.Д.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Нанесение многослойных композиций, в составе которых чередуются слои материалов, характеризующихся различными типами химической связи, является одним из наиболее перспективных направлений повышения физико-механических характеристик защитных покрытий. В частности, введение вязких металлических слоев между хрупкими керамическими слоями позволяет существенно повысить трещиностойкость покрытий за счет диссипации энергии деформации при распространении в них вертикальных трещин. Кроме того, металлические слои способствуют релаксации напряжений в покрытиях, увеличению их твердости, а также подавляют рост столбчатых зерен, которые обеспечивают быстрое распространение трещин в глубь покрытия по границам зерен. Однако, учитывая большое число материалов, используемых для нанесения многослойных покрытий, свойства которых варьируются в широких пределах, на сегодняшний день отсутствует однозначное представление об оптимальной архитектуре подобных структур. Поэтому для определения оптимальных параметров требуются детальные исследования их поведения при различных внешних воздействиях. Целью данной работы является исследование механизмов разрушения и стойкости к окислению многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al.

Покрытия Ti-Al-N/Ti-Al наносили методом магнетронного распыления на подложки из стали 12X18H9T и ситалла. Для улучшения адгезии покрытий перед их напылением подложки подвергали очистке пучками ионов Ag⁺. Слои Ti-Al напыляли в атмосфере Ar. Осаждение слоев Ti-Al-N проводили в смеси газов Ar+N₂. Общее давление газов в рабочей камере в обоих случаях составляло 0,3 Па. Покрытия наносили на подложки, подогретые до температуры 280 °С. Были исследованы пять различных типов покрытий: однослойное покрытие Ti-Al-N и 4 многослойных композиции Ti-Al-N/Ti-Al, количество слоев в которых изменялось от 7 до 21, а соотношение толщин керамических и металлических слоев варьировалось от 3:1 до 1:2 (см. таблицу 1).

Таблица 1. Количество и толщина слоев в покрытиях на основе Ti-Al-N

Покрытие	Количество слоев Ti _{0,45} Al _{0,55} N / Ti _{0,45} Al _{0,55}	Толщина слоев Ti _{0,45} Al _{0,55} N / Ti _{0,45} Al _{0,55} , мкм	Относительная общая толщина слоев Ti _{0,45} Al _{0,55} N, %	Общая толщина покрытия, мкм
Ti _{0,45} Al _{0,55} N	1/-	3,0/0	100	3,0
ML1	4/3	0,5/0,3	69	2,9
ML2	11/10	0,21/0,07	77	3,0
ML3	4/3	0,6/0,2	80	3,0
ML4	4/3	0,3/0,6	40	3,0

Рентгеновский микроанализ покрытий показал, что соотношение Ti и Al во всех исследованных образцах составляет 45/55. Анализ картин рентгеновской дифракции выявил, что однослойное покрытие Ti_{0,45}Al_{0,55}N имеет ГЦК структуру типа NaCl и соответствует кристаллической решетке TiN, в которой Al частично замещает Ti, то есть представляет собой твердый раствор Ti_{0,45}Al_{0,55}N. Аналогичные пики Ti-Al-N на дифрактограммах многослойных покрытий свидетельствуют об одинаковом фазовом составе их керамических слоев и однослойного покрытия. Единственной кристаллической фазой металлических слоев является γ-фаза алюминида титана с тетрагональной структурой.

Измерение механических характеристик покрытий методом наноиндентирования показало, что нанесение промежуточных металлических слоев Ti_{0,45}Al_{0,55} приводит к существенному снижению твердости и эффективного модуля упругости покрытий уже при глубине проникновения индентора в образец, не превышающей толщину верхнего керамического слоя. При этом степень снижения механических характеристик покрытий

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

зависит как от относительной, так и от абсолютной толщины керамических и металлических слоев. Кроме того механические характеристики многослойных покрытий падают с увеличением глубины индентирования, что обусловлено растущим вкладом более мягких металлических слоев в механический отклик покрытия.

В результате проведенных исследований закономерностей механического поведения однослойных ($\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}$) и многослойных ($\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}/\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$) покрытий на упруго-пластической стальной подложке при одноосном растяжении выявлен стадийный характер их разрушения, обусловленный последовательным развитием и конкуренцией между различными механизмами релаксации напряжений. Показано, что процесс разрушения покрытий состоит из четырех стадий, каждая из которых характеризуется различной скоростью роста плотности поперечных трещин. Установлено, что изменение архитектуры покрытий (их общей толщины и соотношения толщин металлических и керамических слоев) позволяет управлять характером развития конкурирующих механизмов их деформации и разрушения, обеспечивая повышение их надежности. Предложена методика количественной аттестации накопления повреждений в покрытиях в процессе растяжения, включающая в себя определение плотности распределения в них поперечных и перекрестных трещин, а также относительной площади скалывания.

Изучены закономерности деградации однослойных и многослойных покрытий в процессе изотермического отжига при температуре 900 °С. Установлено, что промежуточные слои $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$ оказывают существенное влияние на кинетику окисления и стойкость к окислению покрытий на основе системы Ti-Al-N. В однослойном покрытии с выраженной столбчатой зеренной структурой неплотные границы зерен способствуют интенсивной диффузии кислорода внутрь покрытия и ионов Al и Ti к его поверхности, приводя его быстрому окислению. В многослойных покрытиях $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}/\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$ границы раздела между слоями препятствуют росту столбчатых зерен через всю толщину покрытия, существенно замедляя скорость диффузии. Кроме того, формирование плотного защитного слоя Al_2O_3 на поверхности металлических слоев $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$ значительно снижает скорость дальнейшего окисления покрытий, причем данный эффект усиливается с ростом толщины металлических слоев. Таким образом, наиболее высокую стойкость к окислению продемонстрировали покрытия $\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}\text{N}/\text{Ti}_{0,45}\text{Al}_{0,55}$ с соотношением толщин керамических и металлических слоев 1:2.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (направление III. 23.1.3).