

# ОСОБЕННОСТИ ТРИБОФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МДО-ПОКРЫТИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КАРБИДА И НИТРИДА ТИТАНА

Комаров А.И., Комарова В.И.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
[al\\_kom@tut.by](mailto:al_kom@tut.by)

## Введение

Оксидные керамические покрытия (КП), формируемые методом микродугового оксидирования (МДО), позволяют значительно расширить область применения алюминиевых сплавов благодаря сочетанию высокой (до 25 ГПа) твердости, износостойкости, коррозионной стойкости [1]. Вместе с тем, не достаточно высокие антифрикционные свойства КП в условиях трения без смазочных материалов или ограниченной их подачи в ряде случаев не обеспечивают работоспособность пар трения [1, 3]. Кроме того, алюмооксидная керамика имеет повышенную хрупкость. Отмеченные недостатки могут быть устранены путем включения в оксидное покрытие неоксидных форм керамики, например, нитрида или карбида титана. Такие композиционные материалы, получаемые спеканием оксида алюминия с тугоплавкими карбидами и нитридами, широко используются рядом компаний (Toshiba Tungalloy, Kyocera, NTK Cutting Tools, Kennametall, Sandvik Coromant, Widia, Ssangyong Materials Corporation и др.) в качестве инструментальной керамики [4]. Основываясь на имеющихся данных, можно ожидать повышения трибомеханических свойств МДО-покрытия при введении нитридных или карбидных фаз в его матрицу.

Цель работы - исследование триботехнических характеристик и структуры поверхности трения КП, формируемой под воздействием включенных в его поверхностные слои модифицирующих карбидных и нитридных добавок.

## Методика исследования

Трибомеханическое модифицирование покрытий осуществлялось нитридом и карбидом титана. Нитрид титана представлял собой нанопорошок с размером частиц от 50 до 75 нм. Размер частиц TiC составлял 0,5-5,0 мкм. Из порошков готовили суспензию на спирту, которую втирали в КП. Массовую долю нитрида или карбида в покрытии определяли методом рентгенофазового анализа. Увеличение концентрации модифицирующих фаз в КП достигалось путем введения порошков в масло И20А, используемое в качестве среды для проведения трибоиспытаний. Концентрация добавок в масло составляла 0,4 мас.%, 0,8 мас.% и 1,2 мас.%. Триботехнические испытания образцов КП выполняли в режиме граничного трения по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела из стали 65Г (HRC 55) относительно неподвижного образца. Испытания осуществляли при скорости скольжения 0,1 м/с, при этом контактное давление изменяли пошагово по схеме 30 МПа→40→50 МПа. Продолжительность испытаний на каждой ступени составляла 5–7 ч. По результатам испытаний определяли коэффициент трения  $f$ , массовый износ  $\Delta m$  и интенсивность изнашивания  $I$  ( $I = \Delta m/L$ ).

Рентгеноструктурные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Сканирующую электронную микроскопию выполняли на приборе VEGA II TESCAN с использованием энергодисперсионной приставки РМА типа InCa 350 Cambridge Instrument GB для элементного анализа. Анализ АСМ проводился на сканирующем микроскопе NT-206.

## Результаты исследования

Результаты триботехнических испытаний показали, что при модифицировании покрытий карбидом титана коэффициент трения снижается в 1,5-10 раз по сравнению с не-

модифицированным КП. Коэффициент трения при этом снижается с увеличением концентрации TiC в поверхностном слое КП (табл. 1).

Таблица 1. Триботехнические характеристики керамического покрытия на сплаве Д16, модифицированного карбидом титана

Образец	Концентрация TiC, масс.%	Триботехнические характеристики				
		Коэффициент трения $f$			Интенсивность изнашивания $I_q$ , $10^{-5}$ мг/м	
		30 МПа	40 МПа	50 МПа	покрытие	индентор
1	–	0,040–0,055	0,048–0,053	0,053–0,056	13,60	21,9
2	2,0	0,031–0,035	0,032–0,035	0,035–0,037	1,17	3,5
3	4,5	0,010–0,032	0,022–0,025	0,027–0,031	5,60	17,8
4	7,0	0,005–0,017	0,017–0,020	0,013–0,015	8,10	20,8
5	9,5	0,005–0,012	0,006–0,008	0,010–0,022	3,42	11,4

Как следует из табл. 1, наибольший эффект добавки TiC проявляется при концентрации  $C_{TiC}$  от 7 до 9,5 мас.%. Полученные данные свидетельствуют также о том, что концентрация  $C_{TiC} = 9,5$  мас.% является предельным значением, поскольку при давлении 50 МПа наблюдается рост коэффициента трения.

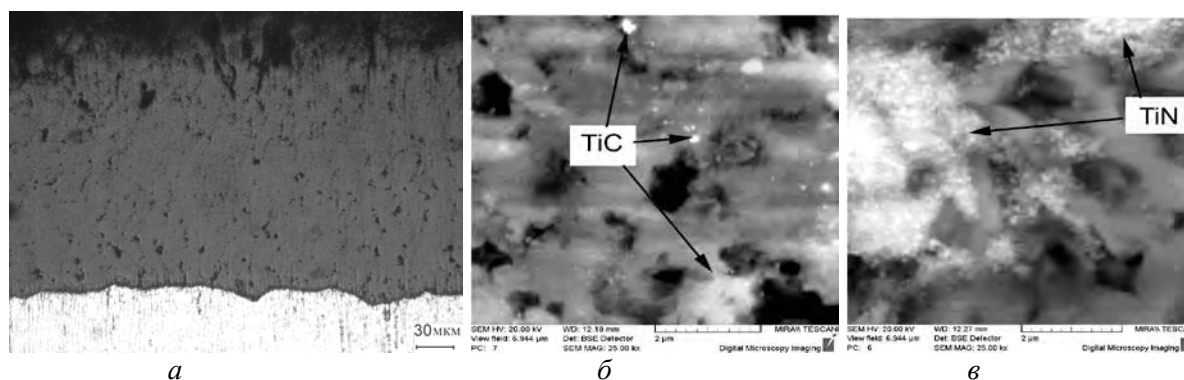
Модифицирование покрытия нитридом титана оказывает еще более выраженное воздействие на триботехнические характеристики КП (табл. 2). Наиболее низкие значения  $f$  регистрируются в диапазоне концентраций TiN 10,5-15,5 мас.%. При более высоких значениях  $C_{TiN}$  наблюдается рост коэффициента трения.

Таблица 2. Триботехнические характеристики керамического покрытия на сплаве Д16, модифицированного нитридом титана

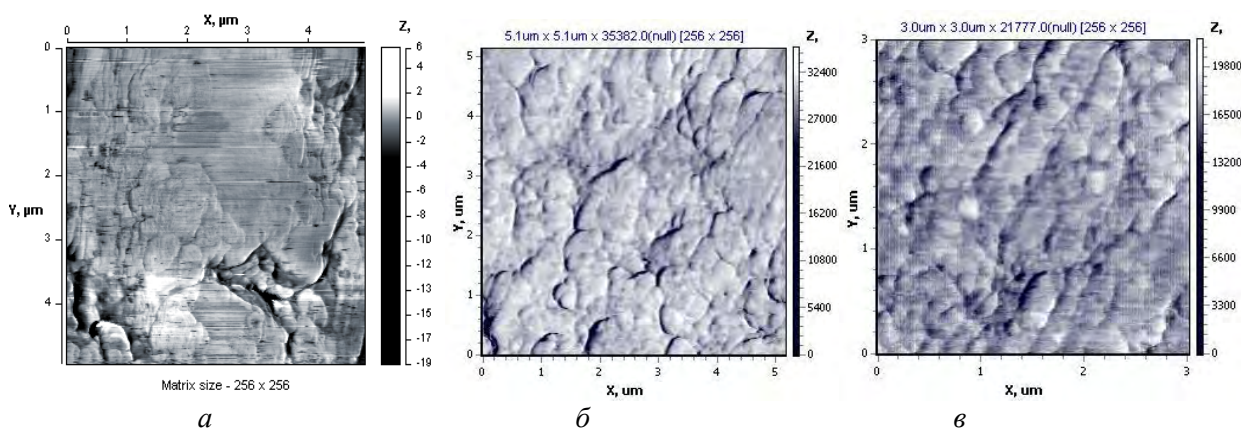
Образец	Концентрация TiN, масс.%, $C_{TiN}$	Триботехнические характеристики				
		Коэффициент трения $f$			Интенсивность изнашивания $I_q$ , $10^{-5}$ мг/м	
		30 МПа	40 МПа	50 МПа	покрытие	индентор
6	10,5	0,014–0,017	0,010–0,012	0,006–0,008	не зарегист.	23,3
7	13,0	0,015–0,017	0,008–0,012	0,004–0,006	не зарегист.	11,8
8	15,5	0,0015–0,002	0,002–0,006	0,003–0,005	не зарегист.	5,6
9	18,0	0,005–0,008	0,005–0,008	0,016–0,035	1,2	4,9

Результаты испытаний свидетельствуют также о повышении износостойкости модифицированной нитридом титана керамики и стального индентора. В то время как интенсивность изнашивания немодифицированного покрытия составляет  $13,6 \cdot 10^{-5}$  мг/м, при модифицировании КП нитридом титана износ не регистрируется, и лишь при наибольшем значении концентрации  $C_{TiN} = 18,5$  мас.% составляет  $1,2 \cdot 10^{-5}$  мг/м. Интенсивность изнашивания стального контртела также существенно снижается.

Выраженный эффект снижения коэффициента трения и износа КП при его модифицировании карбидом и нитридом титана может быть связан со следующим. Структура КП характеризуется наличием микро- и наноразмерных пор, что способствует включению и удержанию частиц модификатора в оксидной матрице (рис. 1). Благодаря этому высокодисперсные частицы модификатора постоянно поступают в зону трения и, оказывая сильные локальные воздействия на поверхность КП, инициируют формирование специфической наноразмерной структуры поверхностного слоя. Данные, полученные методом АСМ, показывают, что в процессе трения под воздействием карбида титана на поверхности КП формируется слой, который имеет субзернистую структуру с размером структурных элементов 70-200 нм. Подобная структура тонкого слоя поверхности трения формируется под воздействием TiN (рис. 2).



**Рис.1.** Структура поперечного сечения (а) и поверхности трения покрытия, модифицированного карбидом (б) и нитридом титана (в)



**Рис.2.** АСМ-изображение поверхности после трибоиспытаний немодифицированного (а) и модифицированного карбидом (б) и нитридом титана (в) покрытия

Показано, что существенное повышение триботехнических характеристик МДО-покрытия может быть достигнуто включением в его оксидную матрицу частиц неоксидной природы (карбидов и нитридов) методом трибомеханического модифицирования. В результате модифицирования образуется поверхностный слой глубиной до 20 мкм, содержащий 4,0-10,5 мас.% карбидов или нитридов. Модифицирующие добавки в процессе трения оказывают существенное воздействие на трибоформирование дисперсной однородной структуры поверхности, обеспечивая повышение износостойкости и антифрикционных свойств покрытия. В условиях граничного трения интенсивность изнашивания модифицированного покрытия снижается в 4 – 10 раз, коэффициент трения – в 3-10 раз.

## Список литературы

1. Витязь П.А., Жорник В.И., Кукареко В.А., Комаров А.И., Сенють В.Т. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками. – Минск: Беларуская навука – 2011, 527 с.
2. Витязь П.А., Комаров А.И., Комарова В.И. Интенсифицирующее воздействие углеродных наночастиц на формирование микродуговых покрытий на сплавах алюминия // Коррозия: материалы, защита. – 2011, № 5, с. 42 – 46.
3. Витязь П. А., Комаров А.И., Комарова В.И.. Триботехнические свойства оксидокерамического покрытия в режиме граничного трения в контакте со сталью // Трение и износ. 2008, Том 29, №5. с. 447–452.
4. Зубков Н.Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов //Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013, №5, с. 75-100.

## ФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ И ВИСКЕРНЫХ СТРУКТУР В МЕДНОМ ПОКРЫТИИ В ПРОЦЕССЕ ОТЖИГА

**Викарчук А.А., Дорогов М.В., Приезжева А.Н.**

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия*  
[maxim@tltsu.ru](mailto:maxim@tltsu.ru)

Медь издавна применяется в отраслях народного хозяйства, таких как металлургии, электронике и химической промышленности [1, 2]. В настоящее время медь является наиболее широко используемым катализатором процесса полимеризации ацетилена, синтеза метанола и анилина. Исследованию физических и химических свойств меди посвящено множество работ. Хорошо известно, что медь является переходным металлом и благодаря существованию незаполненных электронами d-оболочек в реакциях с кислородом может образовывать соединения с переменной валентностью [3]. Однако, устойчивыми оксидами являются только  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}_2\text{O}$ , которые являются полупроводниками р-типа.

В технике зачастую применяются пленочные системы типа «подложка / металлическое покрытие». В процессе термического воздействия в присутствии кислорода фазовый состав такой системы будет изменять, например, в следствии термического окисления. На свободной поверхности металлического покрытия должен формироваться высший оксид металла, в случае меди – куприт  $\text{CuO}$ . Однако, низшие оксиды также могут присутствовать в окисленном слое поверхности металла.

В данной работе исследованы оксидные слои, формирующиеся в процессе отжига в кислородсодержащей атмосфере медных покрытий. Медные покрытия наносились методом электролиза из водного раствора сернокислой меди. В качестве подложки использовалась микросетка из нержавеющей стали типа X18H10. Отжиг проводился на воздухе в муфельных печах при температуре  $400^\circ\text{C}$  и выдержке в течение 4 часов. Это оптимальный режим обеспечивающий формирование на поверхности меди нановискерных структур.

Исследование образцов методами рентгеновской дифракции, электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа позволили установить, что в процессе отжига в медном покрытии формируется многослойная структура, а на поверхности растут нановискеры длина которых достигает десятки мкм. Эти нановискеры являются нитевидными кристаллами оксида меди  $\text{CuO}$ .