

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 621.2.082.18

*А. И. КОМАРОВ, академик П. А. ВИТЯЗЬ, В. И. КОМАРОВА***СТРУКТУРА И ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО  
В ПРОЦЕССЕ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫМ TiN***Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
al\_kom@tut.by; vityaz@presidium.bas-net.by; komarova@inmash.bas-net.by*

Осуществлено модифицирование в процессе МДО оксидокерамических покрытий наноразмерным нитридом титана, что позволило получить оксидно-нитридную керамику в виде покрытия на алюминиевом сплаве Д16. Наибольшая концентрация нитрида титана регистрируется в поверхностных слоях покрытия, при этом область модифицирования распространена до 1/3 его толщины. Установлено, что модифицирование сопровождается повышением микротвердости в 1,2–1,4 раза, которая достигает 23 ГПа. Триботехнические испытания в условиях граничного трения показали, что модифицирование МДО-покрытий нитридом титана приводит к снижению коэффициента трения в 1,5–2,8 раз по сравнению с немодифицированным покрытием. Помимо повышения антифрикционных свойств, достигается повышение износостойкости покрытий в 3–5 раз.

*Ключевые слова:* микродуговое оксидирование, керамическое покрытие, нитрид титана, структура, микротвердость, коэффициент трения.

*A. I. KOMAROV, P. A. VITYAZ, V. I. KOMAROVA***STRUCTURE AND TRIBO-MECHANICAL PROPERTIES  
OF THE CERAMIC COATING MODIFIED BY NANOSIZED TiN DURING ITS SHAPING***Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
al\_kom@tut.by; vityaz@presidium.bas-net.by; komarova@inmash.bas-net.by*

Oxide-ceramic coatings during the process of Micro-Arc Oxidation (MAO) with nanoscale titanium nitride were modified, which allowed one to obtain oxide-nitride ceramics in the shape of a coating on an aluminum alloy D16. The highest concentration of titanium nitride was registered in the surface coating layers, and the modification area extended to 1/3 of its thickness. It was found that the modification was accompanied by a 1.2–1.4-fold increase in the microhardness that achieved 23 GPa. Tribological tests under boundary lubrication showed that the modification of the MAO-coating with titanium nitride reduced the friction coefficient by a factor of 1.5–2.8 as compared to an unmodified coating. In addition to improving anti-friction properties, the wear resistance of coatings increased by a factor of 3–5.

*Keywords:* microarc oxidation, ceramic coating, titanium nitride, structure, microhardness, friction coefficient.

**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, КП на сплавах алюминия находят все более широкое применение в современной технике [1; 2]. Вместе с тем антифрикционные свойства КП в ряде случаев не достаточны для обеспечения работоспособности трибосопряжений в условиях трения без смазочных материалов или ограниченной их подачи в зону фрикционного контакта [3]. Кроме того, к недостаткам алюмооксидной керамики можно отнести ее повышенную хрупкость. Отмеченные недостатки могут быть устранены путем включения в оксидное покрытие соединений неоксидной природы, отдельные физико-механические характеристики которых (ударная вязкость, устойчивость

к тепловым ударам, антифрикционные свойства) превосходят оксиды алюминия. Широко известны композиционные материалы, получаемые путем спекания оксида алюминия с неоксидными формами керамики (нитридом и карбидом титана, нитридом кремния), которые находят широкое применение в качестве инструментальных материалов [4; 5]. Основываясь на имеющихся данных, можно ожидать, что введение в матрицу оксидного покрытия нитридных фаз способно оказать положительное воздействие на его трибомеханические свойства. Нитрид титана, наряду с высокой твердостью, износостойкостью, низким коэффициентом трения, способствует повышению изгибной прочности композиционных керамических материалов, что делает обоснованным его выбор в качестве модификатора оксидного покрытия.

**Материалы и методы исследования.** Микродуговое оксидирование образцов из сплава Д16 выполняли в анодно-катодном режиме [1] в базовом силикатно-щелочном электролите и с добавлением в него 0,5 г/л нитрида титана. Суспензию нитрида титана перед введением в электролит диспергировали ультразвуком в течение 15 мин и стабилизировали додецилсульфатом натрия. Размер частиц нитрида титана, используемого для модифицирования покрытия, составлял 50–75 нм.

Исследования структуры и свойств керамических покрытий выполняли на поперечных шлифах методами рентгеноструктурного, металлографического анализов и сканирующей электронной микроскопии. Триботехнические испытания образцов КП проводили в режиме граничного трения по схеме возвратно-поступательного перемещения контртела из стали 65Г, закаленной до HRC 55, относительно неподвижного образца. Испытания осуществляли при скорости скольжения 0,1 м/с, при этом контактное давление изменяли пошагово с возрастанием по схеме 30 → 40 → 50 → 60 МПа. По результатам испытаний определяли коэффициент трения  $f$ , массовый износ  $\Delta m$  и интенсивность изнашивания  $I (I = \Delta m / L)$ . Износ образцов определяли взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200 с точностью 0,05 мг.

**Результаты и их обсуждение.** Исследования структуры и фазового состава покрытий, сформированных в электролите с добавкой TiN, показали, что нитрид титана встраивается в покрытие в процессе микродугового оксидирования (рис. 1, 2).

Согласно данным МРСА (рис. 1) и рентгеноструктурного анализа (рис. 2), нитрид титана внедряется на глубину, составляющую примерно 1/3 толщины покрытия. При этом наибольшая концентрация TiN регистрируется в поверхностном оксидном слое. Из анализа полученных данных также следует, что модифицирование электролита наноразмерным TiN сопровождается формированием однородного, с низкой пористостью, керамического слоя (рис. 1), что в сочетании с по-

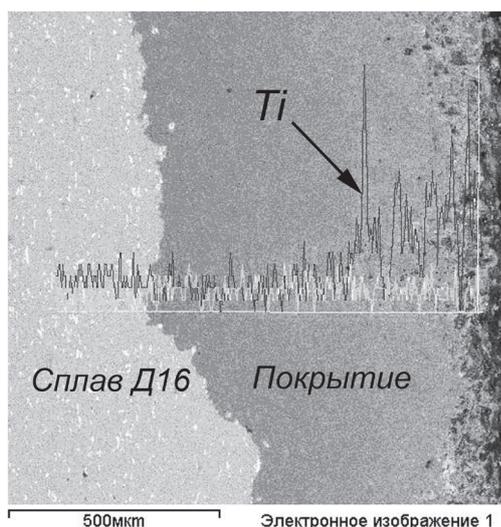


Рис. 1. Микроструктура модифицированного нитридом титана покрытия и распределение титана по глубине покрытия (поперечный ко- сой шлиф)

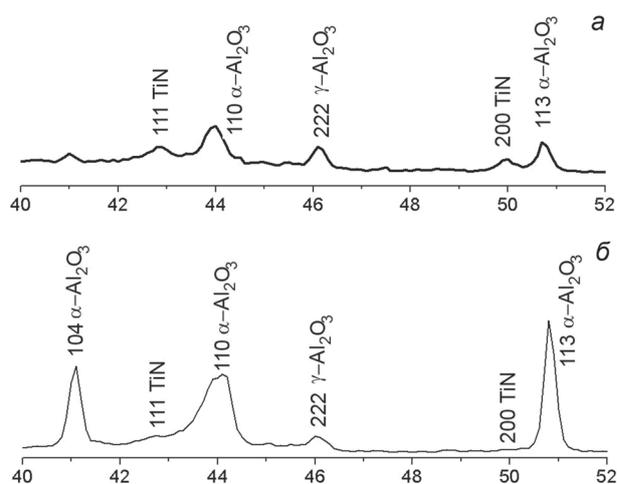


Рис. 2. Дифрактограммы модифицированного TiN покрытия на сплаве Д16: а – поверхностный слой; б – 40 мкм от поверхности

вышенным содержанием фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунда) в этом случае приводит к повышению микротвердости покрытия в 1,2–1,4 раза (рис. 3). Повышенное содержание корунда указывает на более высокие температуры протекающих с участием нитрида титана плазмохимических реакций, лежащих в основе формирования оксидного покрытия.

Анализ распределения микротвердости по глубине керамического слоя выявляет также нехарактерный рост ее значений до 20–21 ГПа вблизи поверхности покрытия (рис. 3). Такой характер зависимости может быть связан с повышенной, как отмечалось выше, концентрацией нитрида титана в поверхностных слоях покрытия.

Согласно результатам триботехнических испытаний, модифицирование покрытия TiN приводит к снижению коэффициента трения во всем диапазоне исследуемых давлений. Наибольший эффект снижения коэффициента трения регистрируется при давлении  $p = 30$  МПа. В этом случае коэффициент трения составляет 0,008, что приблизительно в 2,8 раз ниже соответствующей величины для немодифицированного покрытия (рис. 4).

Характер зависимости коэффициента трения от пути при  $p = 40$  МПа указывает на то, что процессы приработки образцов к началу испытаний при этом давлении практически завершились. Коэффициент трения немодифицированной керамики составляет 0,020–0,025, тогда как покрытия с нитридной фазой – 0,010–0,012 (рис. 4, б).

Повышение давления до 50 МПа сопровождается снижением коэффициента трения модифицированного нитридом титана покрытия с 0,02 в начале испытаний до 0,008–0,010 в конце. Коэффициент трения немодифицированного покрытия при этом давлении имеет значения 0,03–0,04 (рис. 4, в).

Дальнейшее повышение давления до  $p = 60$  МПа приводит к некоторому росту коэффициента трения, который все же не превышает 0,035. Это в 1,4 раза ниже значения  $f$  немодифицированной керамики (рис. 4, г).

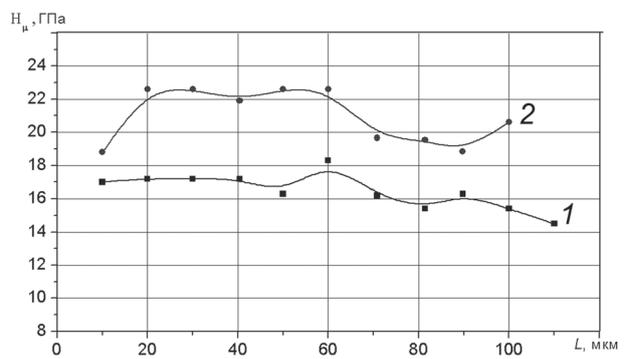


Рис. 3. Микротвердость покрытий, полученных в базовом электролите (1) и с добавкой TiN (2)

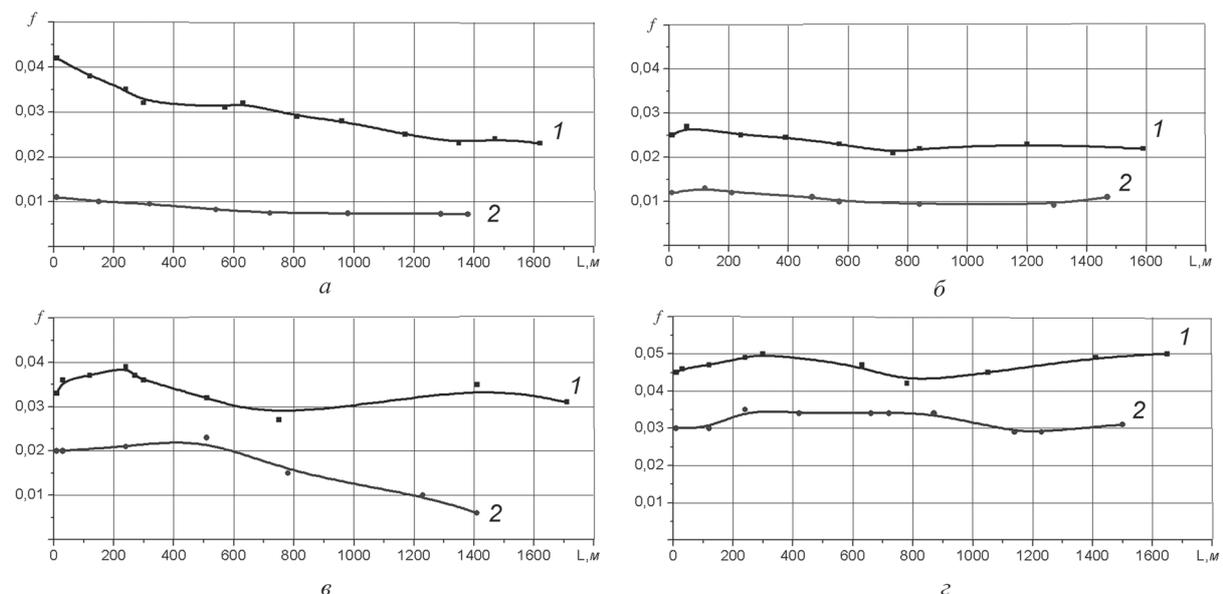


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от пути для покрытия на сплаве Д16 при различных давлениях: а – 30 МПа; б – 40; в – 50; г – 60 МПа; 1 – базовый электролит; 2 – с добавкой нитрида титана

Следует отметить, что помимо повышения антифрикционных свойств покрытия, модифицирование нитридом титана обеспечивает повышение его износостойкости в 3–5 раз.

**Заключение.** Впервые осуществлено модифицирование в процессе МДО оксидокерамических покрытий нитридом титана, что позволило получить оксидно-нитридную керамику в виде покрытия на алюминиевых сплавах. Глубина модифицирования покрытия нитридом титана составляет ~1/3 общей толщины керамического слоя. Модифицирование сопровождается повышением микротвердости в 1,2–1,4 раза, которая достигает 23 ГПа при формировании покрытия на сплаве Д16.

Триботехнические испытания в условиях граничного трения показали, что модифицирование МДО-покрытий нитридом титана приводит к снижению коэффициента трения в 1,5–2,8 раз по сравнению с немодифицированным покрытием. Помимо повышения антифрикционных свойств, модифицирование нитридом титана сопровождается повышением износостойкости покрытий в 3–5 раз.

### Список использованной литературы

1. *Витязь, П. А.* Триботехнические свойства оксидокерамического покрытия в режиме граничного трения в контакте со сталью / П. А. Витязь, А. И. Комаров, В. И. Комарова // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 5. – С. 447–452.
2. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов [и др.]. – М.: ЭКОМЕТ, 2005.
3. Создание наноструктурированных композиционных модификаторов для сплавов алюминия / П. А. Витязь [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 5. – С. 91–96.
4. *Зубков, Н. Н.* Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов / Н. Н. Зубков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 5. – С. 75–100.
5. *Матренин, С. В.* Техническая керамика: учеб. пособие / С. В. Матренин, А. И. Слосман. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.

*Поступило в редакцию 15.06.2015*