

УДК 621.839

В.Л. БАСИНЮК, д-р. техн. наук, доц.

начальник научно-технического центра «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»

E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20.07.2018.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ПОВЕХНОСТНО-МОДИФИЦИРОВАННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В статье показано, что использование при изготовлении фрикционных передач сплавов алюминия с МДО-покрытиями на рабочих поверхностях позволяет в 3...8 раз, по сравнению с взаимодействием стальных поверхностей, повысить коэффициент трения и, соответственно, их нагрузочную способность, причем практически на порядок может быть уменьшена инерционность ее вращающихся компонентов и, соответственно, улучшены связанные с инерционностью динамические качества, что в сочетании с повышенной износостойкостью МДО-покрытий и достаточно высокими демпфирующими свойствами сплавов алюминия обуславливает перспективность применения алюминиевых сплавов с этими покрытиями в конструкциях прецизионных фрикционных приводов точного машиностроения, мехатронных системах различного назначения, включая робототехнику.

Ключевые слова: динамические качества, МДО-покрытия, нагрузочная способность, прецизионные фрикционные передачи

Введение. К одной из основных тенденций развития современных технологий прецизионной механической обработки можно отнести повышение требований к точности и снижению шероховатости обрабатываемых поверхностей [1–5]. В лучших образцах оборудования точность механической обработки уже сегодня достигает 0,2 мкм [1]. При этом к основным компонентам, играющим в ряде случаев определяющую роль в достижении этих параметров, можно отнести механические передачи, в частности фрикционные. Как отмечено в работе [1], эти передачи имеют «показатели, не достижимые с помощью других типов механических передач», таких как винт-гайка с парами трения скольжения, качения или гидростатическими, имеющими максимально достижимую систематическую ошибку 0,5...0,6 мкм, и реечная с зацеплением «зубчатое колесо — рейка» или «червяк — рейка». В частности, разработанные в ОАО «Тантал» фрикционные передачи (ФП) при использовании в прецизионном токарном оборудовании обеспечивают точность позиционирования до 0,2 мкм [6]. К основным достоинствам передач этого типа можно отнести отсутствие люфтов, высокие плавность перемещения и КПД, низкую виброактивность и существенно меньшее рассогласование между заданной и фактической величинами подач. Этим предприятием решается задача достижения нанометровой точности формообразующих и иных перемещений. Поэтому фрикционные передачи

все более широко используются также в координатно-измерительных машинах.

К важной особенности ФП можно отнести то, что их использование в сочетании с, например, шаговыми двигателями позволяет осуществить непосредственное преобразование вращательного движения в прецизионное поступательное движение. Так, например, их применение в серийно изготавливаемом прецизионном токарном модуле ТПАРМ-100М, имеющем аэростатические опоры и направляющие, а также лазерный интерферометр в качестве ДОС, позволило обеспечить «точность обработки деталей 2...4 мкм, погрешность формы — 0,5 мкм, шероховатость поверхности, обработанной алмазом, $R_a = 0,04...0,08$ мкм» [1].

Важную роль в прецизионных фрикционных передачах играет силовое взаимодействие их основных элементов и динамических свойств [1]. Поэтому определенный научный и практический интерес представляют исследования возможностей использования в них роликов из алюминиевых сплавов или полимерных композитов с кольцевым элементом из этих сплавов, обладающих малой массой и, как следствие, минимально возможной инерционностью, на поверхности которых анодно-катодной микродуговой обработкой сформировано МДО-покрытие, обладающее высокими фрикционными свойствами.

Цель исследований — оценка возможности улучшения служебных свойств прецизионных фрикционных передач с использованием

в них компонентов из алюминиевых сплавов с МДО-покрытиями на рабочих поверхностях трибосопряжений.

Методика исследований. Для проведения исследований были изготовлены образцы из алюминиевых сплавов, на которых анодно-катодной микродуговой обработкой были сформированы МДО-покрытия толщиной 90...110 мкм.

С покрытий удалялся поверхностный, наиболее дефектный слой и исследовались:

- структуры элементного состава и пористости МДО-покрытия [7];
- топографии поверхности МДО-покрытия [7];
- коэффициент трения скольжения с МДО-покрытиями.

Исследование микроструктуры проводилось на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Miра фирмы Tescan (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания). Погрешность определяемых параметров не превышала пяти относительных процентов.

Пористость МДО-покрытия определялась на автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы «Joyce Loebel» (Англия) по программе «Автоскан». Погрешность определения пористости не превышала пяти относительных процентов.

Топография поверхности МДО-покрытия исследовалась на атомно-силовом микроскопе NT-206 производства ОДО «Микротестмашины (г. Гомель). Исследования на атомно-силовом микроскопе осуществлялись в контактном режиме на воздухе с использованием стандартных V-образных кантилеверов NSC11. Сканирование по поверхности осуществлялось в поперечном направлении к линиям трения с регистрацией топографии и картин распределения латеральных отклонений.

Исследования коэффициентов трения [8] проводились при нормальной температуре и влажности окружающей среды на машине трения с возвратно-поступательным движением контртела относительно образца и управляемыми угловыми скоростями вращения электропривода. Регистрация мгновенных значений коэффициентов трения осуществлялась в автоматизированном режиме.

В основу методического подхода, позволяющего оценить влияние на коэффициенты трения удельных давлений при взаимодействии трущихся поверхностей в условиях отсутствия смазки, принята модифицированная, применительно к рассматриваемому случаю, зависимость [9]

$$f = a + b \cdot p, \quad (1)$$

где a и b — коэффициенты, определяемые экспериментально (a — безразмерный коэффициент, b] МПа⁻¹; p — удельные контактные давления, МПа.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты исследований приведены на рисунке, анализ которого показал следующее:

- толщина МДО-покрытия после удаления поверхностного слоя варьировалась в диапазоне 68...81 мкм (см. рисунок *a*);
- состав МДО-покрытия по толщине слоя был практически равномерным (см. рисунок *б*);
- МДО-покрытие имело микротрещины и поры в объеме 0,2...0,3 % (см. рисунок *в*), при этом размер пор находился в диапазоне 0,3...4,0 мкм;
- после чистовой механической обработки поверхность МДО-покрытия имела достаточно развитый рельеф (см. рисунок *г, д*), среднеквадратичная шероховатость которой по данным АСМ составляла около 400 нм.

Наличие развитого поверхностного рельефа объясняется не только наличием микротрещин и пор в прилегающем к поверхности материале МДО-покрытия, но и особенностями этого материала. В его состав в качестве основных входят две фазы оксида алюминия — α -Al₂O₃ и γ -Al₂O₃, — имеющие различную твердость, а также ряд более мягких включений. Кроме того, в этой области, как правило, содержится наибольшее число микротрещин и пор.

Изменения максимальных коэффициентов трения скольжения при увеличении нагруженности взаимодействующих поверхностей фрикционного сопряжения с оксидно-керамическими покрытиями при отсутствии смазки показана на рисунке *e*. Они практически линейно связаны с контактными давлениями — среднее квадратическое отклонение полученных результатов в рассматриваемом диапазоне контактных давлений составило $\sigma_p = 0,048$, а вариации коэффициентов сухого трения не превышали 8 %. Его величина практически не зависела от скоростей скольжения [8] и описывалась линейной эмпирической зависимостью, в рассматриваемом случае имеющей вид

$$f = 0,63 + 0,02 \cdot p. \quad (2)$$

Величина коэффициента сухого трения скольжения при взаимодействии оксидно-керамических поверхностей, сформированных методом анодно-катодной микродуговой обработки, при увеличении удельного давления изменялась в диапазоне $f = 0,6 \cdot 1,5$, что хорошо коррелирует с результатами аналогичных исследований для пресованной оксидокерамики.

К наиболее важным результатам проведенных исследований можно отнести также следующие:

- в рассматриваемом трибосопряжении существовал определенный диапазон удельных давлений и скоростей скольжения с достаточно высокими коэффициентами трения, в котором не возникало схватываний и разрушений МДО-покрытий при их длительном взаимодействии;

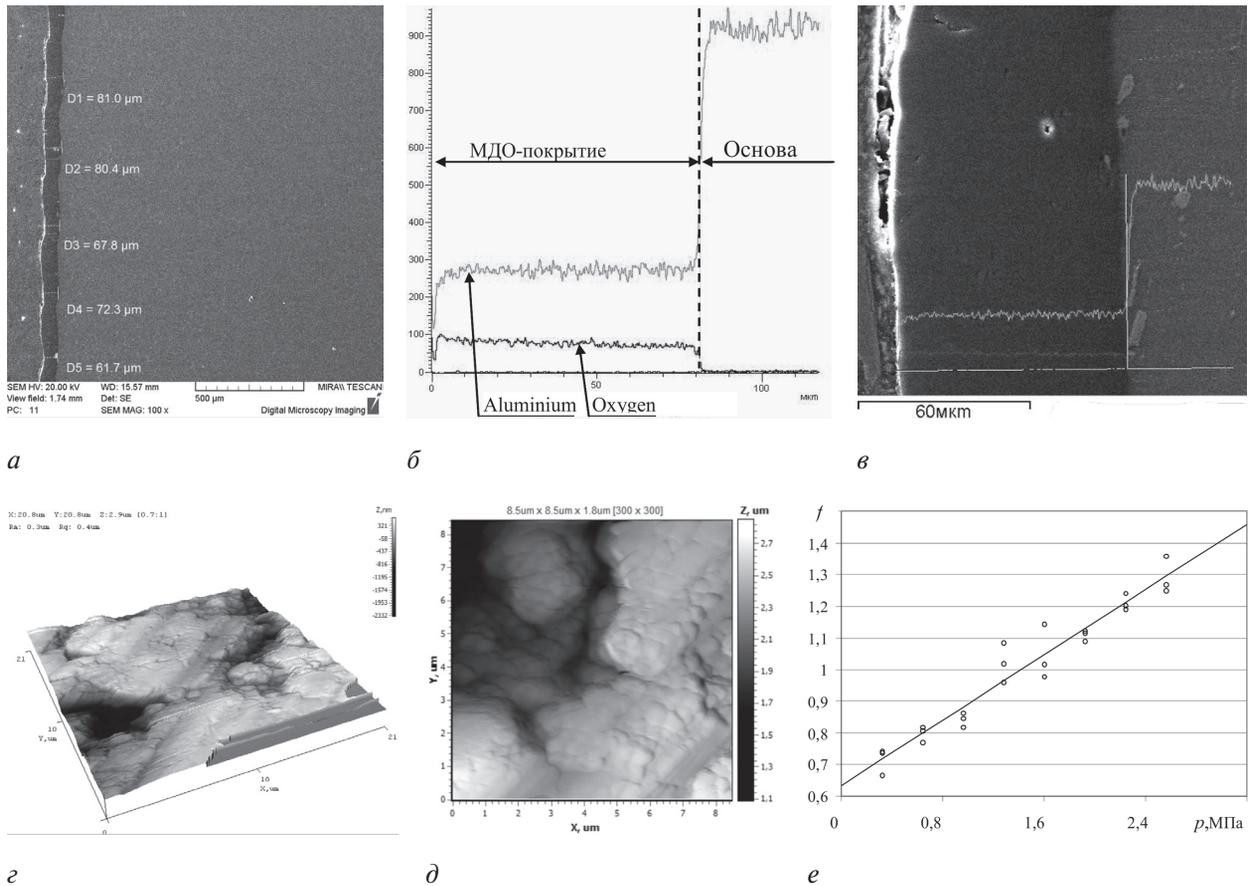


Рисунок — Структура и элементный состав МДО-покрытия (а–в), его АСМ 3D (г) и 2D-топография (д), зависимость коэффициента трения от удельного давления (е)

- скорости скольжения практически не оказывали влияния на коэффициент трения скольжения, и при переходе от покоя к движению коэффициенты трения изменялись незначительно, не более чем на 3 %.

Высокие коэффициенты при взаимодействии МДО-покрытий и их зависимость от удельных давлений могут быть объяснены развитым рельефом их поверхностей и взаимодействием микронеровностей друг с другом, число которых возрастает с увеличением нагруженности.

Таким образом, существенно больший (в 3...8 раз), по сравнению с взаимодействием стальных поверхностей, в трибосопряжении МДО-покрытий коэффициент трения обеспечивает, соответственно, большую нагрузочную способность ФП.

При сохранении одинаковой нагрузочной способности переход от стали к сплаву алюминия с использованием МДО-покрытия позволит, по меньшей мере, втрое уменьшить толщину роликов, что в сочетании с меньшей, по сравнению со сталью плотностью сплавов алюминия, на порядок уменьшит инерционность вращающихся компонентов фрикционных передач и, соответственно, улучшит их динамические качества. При использовании полимерных композитов с кольцевым периферийным элементом из алюминиевого

сплава, имеющим МДО-покрытие, эти качества могут быть улучшены еще больше. При этом эффективность применения МДО-покрытий будет определяться толщиной кольца из сплава алюминия, которая в свою очередь зависит от требований к его жесткости.

Заключение. Использование при изготовлении фрикционных передач сплавов алюминия с МДО-покрытиями на рабочих поверхностях позволят в 3...8 раз, по сравнению с взаимодействием стальных поверхностей, повысить коэффициент трения и, соответственно, нагрузочную способность ФП. При этом практически на порядок может быть уменьшена инерционность ее вращающихся компонентов и, соответственно, улучшены связанные с инерционностью динамические качества.

В сочетании с повышенной износостойкостью МДО-покрытий [10] и достаточно высокими демфирующими свойствами сплавов алюминия это обуславливает перспективность применения алюминиевых сплавов с этими покрытиями в конструкциях прецизионных фрикционных приводов.

Список литературы:

1. Виноградов, М.В. Обеспечение нанометровой точности формообразующих перемещений рабочих органов прецизионных автоматизированных станков / М.В. Ви-

- ноградов, А.А. Игнатьев, Е.А. Сигитов. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. — 100 с.
2. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / А.А. Игнатьев [и др.]. — Саратов: СГТУ, 1999. — 124 с.
 3. Официальный сайт компании MAZAK [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.mazak.com>. — Дата доступа: 17.05.2018.
 4. Официальный сайт компании Knuth Werkzeugmaschinen GmbH [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.knuth.de>. — Дата доступа: 17.05.2018.
 5. Официальный сайт Центрального выставочного комплекса «Экспоцентр» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.expocentr.ru>. — Дата доступа: 17.05.2018.
 6. Официальный сайт компании ОАО «Тантал» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.oao-tantal.ru>. — Дата доступа: 25.05.2018.
 7. О некоторых особенностях использования МДО-покрытий в подшипниках качения приводных систем космической техники / В.Л. Басинюк [и др.] // VI Белорусский космический конгресс: матер. конгресса, Минск, 28–30 окт. 2014 г.: в 2 т. / ОИПИ НАН Беларуси; науч. ред.: А.В. Тузиков, В.А. Лапицкий. — 2014. — Т. 1. — С. 31–35.
 8. Basiniuk, V.L. Frictional and mechanical characteristics of oxide-ceramic coatings / V.L. Basiniuk, E.I. Mardosevich // *Journal of Friction and Wear*. — 2003. — Vol. 24, No. 5. — Pp. 510–516.
 9. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М., Машиностроение, 1977. — 526 с.
 10. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / В.Н. Малышев [и др.] // *Физика и химия обработки материалов*. — 1985. — № 1. — С. 82–87.

BASINYUK Vladimir L., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Chief of R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”

E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 20 July 2018.

PRECISION FRICTION DRIVES WITH THE SURFACE-MODIFIED COMPONENTS FROM ALUMINUM ALLOYS

The article shows that in comparison with interaction of steel surfaces the use of aluminum alloys with micro-arc oxide coatings on effective areas when manufacturing friction drives allows to increase a friction coefficient and their load capacity up to 3...8 times. And the inertance of its rotating components can be reduced substantially and the dynamic qualities connected with inertance can be improved. That in combination with the increased wear resistance of micro-arc oxide coating and rather high damping properties of aluminum alloys determines the prospects of the use of aluminum alloys with these coatings in structures of precision friction drives of precise mechanical engineering, mechatronic systems of different purpose, including robotics.

Keywords: *dynamic properties, micro-arc oxide coatings, load capacity, precision friction drives.*

References:

1. Vinogradov M.V., Ignatev A.A., Sigitov E.A. *Obespechenie nanometrovoy tochnosti formoobrazuyushchikh peremeshcheniy rabochikh organov pretsizionnykh avtomatizirovannykh stankov* [Assurance of nanometer accuracy of forming movements of working bodies of precision automated machines]. Saratov, State Technical University of Saratov Publ., 2011. 100 p.
2. Ignatev A.A., Vinogradov M.V., Dobryakov V.V., Gorbunov V.V., Bondarev V.V. *Tochnost i nadezhnost avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallovezhushchikh stankov* [Accuracy and reliability of automated precision machine tools]. Saratov, State Technical University of Saratov Publ., 1999. 124 p.
3. MAZAK. Available at: <http://www.mazak.com> (accessed 17 May 2018).
4. Knuth Werkzeugmaschinen GmbH. Available at: <http://www.knuth.de> (accessed 17 May 2018).
5. Expocentre. Available at: <http://www.expocentr.ru> (accessed 17 May 2018).
6. Open Company “Tantal”. Available at: <http://www.oao-tantal.ru> (accessed 25 May 2018).
7. Basiniuk V.L., Volkotrub R.E., Kovaleva S.A., Papina S.S. О некоторых особенностях использования МДО-покрытий в подшипниках качения приводных систем космической техники [Some features of the use of micro-arc oxide coatings in roller bearings of drives systems of space technology]. *Materialy VI Belorusskogo kosmicheskogo kongressa* [Proc. 6th Belarusian Space Congress]. Minsk, 2014, vol. 1, pp. 31–35.
8. Basiniuk V.L., Mardosevich E.I. Frictional and mechanical characteristics of oxide-ceramic coatings. *Journal of Friction and Wear*, 2003, vol. 24, no. 5, pp. 510–516.
9. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Komalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Fundamentals of friction and wear calculations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p.
10. Malyshev V.N. Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki i iznosostoykost pokrytiy, nanesennykh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya [Physical and mechanical properties and wear resistance of coatings applied by microarc oxidation]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 1985, no. 1, pp. 82–87.