

# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 629.7.021:621.7.015

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ЭЛЕКТРОЛИТАХ, СОДЕРЖАЩИХ НИТРАТ АММОНИЯ

Шестаков И.Я., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

### Аннотация

В данной статье приводятся результаты исследований электрохимической обработки (ЭХО) алюминиевого сплава 1201 в водных растворах нитрата аммония. Анализ различных отечественных и зарубежных исследований в области электрохимической обработки материалов показал, что изучение и моделирование формы электрода-инструмента является актуальной задачей. Форма электрода-инструмента подбирается с учетом множества факторов: скорости потока электролита, температуры электролита, плотности тока. Кроме того, важную роль играет электродное покрытие, использование которого позволяет повысить качество обработки деталей. В ходе проведенных исследований определено влияние состава электролита, плотности тока, скорости потока на качество поверхности по длине межэлектродного канала. Эксперименты показали, что скорость потока электролита  $\sim 0,55$  м/с обеспечивает минимальное значение шероховатости. Превышение скорости потока электролита приводит к существенному снижению качества поверхности детали. Выявлено, что при применении катода-инструмента, имеющего в сечении круглую форму, происходит растекание тока по поверхности обрабатываемого материала, что снижает точность обработки и шероховатость поверхности в переходной зоне. Использование катода с плоской рабочей поверхностью позволяет увеличить степень локализации плотности тока на обрабатываемой поверхности и повысить точность обработки. Установлено, что катод-инструмент с плоской рабочей поверхностью из окислов титана позволяет уменьшить шероховатость обрабатываемой детали. В результате исследований выявлен оптимальный режим ЭХО тонкостенных крупногабаритных деталей при использовании катода инструмента из титана с полупроводниковым покрытием на его поверхности. Рекомендуемые параметры процесса ЭХО: плотность тока в диапазоне от 14 до  $26$  А/см<sup>2</sup>, скорость потока электролита от 0,3 до 0,6 м/с, температура электролита 25–30°C. В качестве электролита целесообразно применять водный раствор 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 2,5%  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ .

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, электрод-инструмент, катод, шероховатость, электролит, скорость потока, плотность тока.

### Введение

В последние годы методы электрохимической обработки материалов, позволяющие изменять форму, размеры, шероховатость обрабатываемых поверхностей, находят все большее применение для обработки деталей летательных аппаратов, как наиболее эффективные и экономичные способы размерного формообразования. Отличительной особенностью данных методов, составляющей их специфику и сущность, является использование электрической энергии непосредственно для технологических целей без промежуточного преобразования ее в другие виды энергии [1, 2].

Электрохимическая обработка (ЭХО) материалов является эффективным методом для обработки деталей практически из любых металлов и сплавов. ЭХО характеризуется тем большей эффективностью, чем сложнее форма обрабатываемой детали, выше механические свойства (твердость) и значительное количество технологических проблем, возникающих при обработке другими методами.

В современной промышленности при обработке деталей летательных аппаратов часто используют электроды специальных конструкций, позволяющие проводить ЭХО крупногабаритных сборочных единиц, в том числе деталей, имеющих форму тел вращения.

Наиболее известны в этой области работы [3–

8], в которых представлены разнообразные конструкции электродов различной формы рабочей поверхности. При анализе зарубежных научных статей, описывающих различные результаты исследования процесса электрохимической обработки, установлено, что серьезное внимание уделяется не только таким факторам, как скорость потока, температура электролита, плотность тока. Особое место занимает изучение и моделирование формы электрода-инструмента, применяемого при ЭХО. Форма электрода-инструмента подбирается с учетом множества факторов, в том числе краевого эффекта, возникающего при обработке поверхности. Результаты исследований показывают, что возможные микроскопические пустоты, несплошности, газонасыщенность и прочие дефекты обрабатываемого материала являются ключевыми факторами в выборе формы электрода-инструмента.

Немаловажным фактором является наличие нанесенного на электрод покрытия в виде различных оксидов и их соединений, улучшающих широкий спектр характеристик от увеличения срока службы анодов до увеличения возможной плотности тока и получения в итоге более высокого качества поверхности. Примерами таких покрытий для различных материалов анодов служат:  $\text{RuO}_2 + \text{TiO}_2$ ,  $\text{RuO}_2 + \text{IrO}_2 + \text{TiO}_2$ ,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12} + \text{TiO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$ ,  $\text{IrO}_2 + \text{TiO}_2$ ,  $\text{IrO}_2 + \text{RuO}_2 + \text{TiO}_2$  +  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и наночастицами платины [9-19]. Однако такие покрытия дороги и поэтому не находят широкого применения в ЭХО. Поэтому особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку и внедрение электрода-инструмента, позволяющего локально обрабатывать крупногабаритные тонкостенные детали летательных аппаратов с требуемым качеством поверхности.

## Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Для исследования распределения шероховатости при схеме обработки, максимально приближенной к реальным условиям, использовали установку, изображенную на рис. 1.

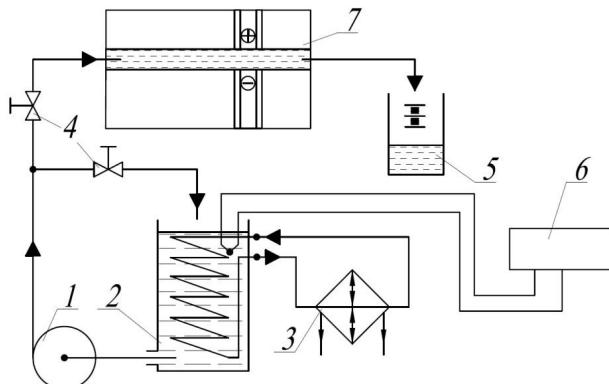


Рис. 1. Схема установки для исследования процесса ЭХО: 1 – насос; 2 – бак; 3 – термостат; 4 – вентили; 5 – мерная емкость; 6 – потенциометр; 7 – ячейка Ландольта

В качестве анода применен алюминиевый сплав 1201 в виде пластины размером  $40 \times 40$  мм, толщиной 4 мм, с токоподводом через корпус ячейки. Зазор между анодом и катодом обеспечивается набором резиновых прокладок, позволяющих в широких пределах (0,5–3 мм) изменять его величину. Катод-инструмент (рис. 2) представляет собой фторопластовую втулку 1 с запрессованной в нее медной пластиной 2 и по форме рабочей поверхности выполнен двух типов: а – выпуклая рабочая поверхность, б – плоская рабочая поверхность. Формы катода-инструмента выбраны с целью имитации реальных условий обработки.

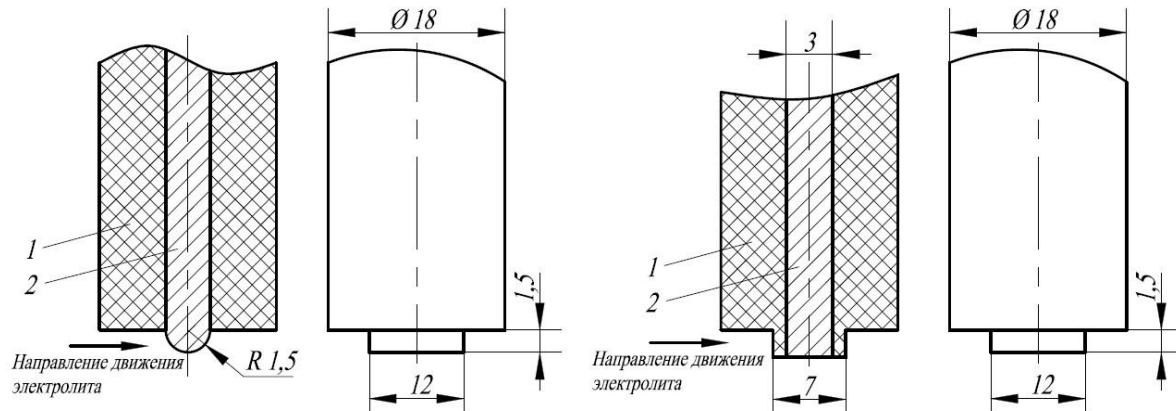


Рис. 2. Форма катода-инструмента: а – выпуклая рабочая поверхность; б – плоская рабочая поверхность

Центробежный насос позволяет создать поток электролита со скоростью до 2,2 м/с.

Перед началом исследования каждый образец взвешивается на аналитических весах ED423S-RCE, а также контролируется исходная шероховатость профилометром 170623. Значение базовой длины при этом составляет 0,08 мм.

После обработки образцы промывают, взвешивают, на профилометре замеряют шероховатость в 13 точках, равноудаленных друг от друга.

В качестве электролитов использовали следующие водные растворы:

1 – 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 5%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ;

2 – 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ;

3 – 5%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 2,5%  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Исследования влияния скорости потока электролита на шероховатость обработанной поверхности первоначально проводили, используя катод-инструмент с выпуклой рабочей поверхностью (рис. 2, а), в качестве электролита применяли 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 5%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , при этом плотность тока составляла 10,7  $\text{A}/\text{cm}^2$ . На рис. 3 представлен график зависимости шероховатости поверхности по длине межэлектродного канала от скорости потока электролита.

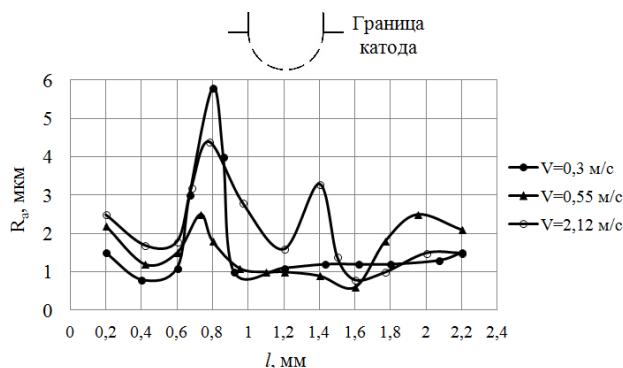


Рис. 3. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала в зависимости от скорости потока электролита

Необходимо отметить, что явно выражены две переходные зоны, на входе и выходе электролита в межэлектродный канал, где шероховатость поверхности образца значительно выше, чем в зоне обработки. В ходе экспериментов выявлено, что скорость потока электролита  $\sim 0,55$  м/с обеспечивает минимальное значение шероховатости, что делает целесообразным проведение дальнейших опытов при данной скорости.

Изучение зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от плотности тока (рис. 4)

при постоянной скорости электролита (0,55 м/с) проводилось с использованием электролита 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 5%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , при этом плотность тока изменялась в диапазоне от 0,4 до 26  $\text{A}/\text{cm}^2$ .

Установлено, что при повышении плотности тока на катоде шероховатость обрабатываемой поверхности существенно снижается, а ее распределение становится равномернее по длине межэлектродного канала. Однако с увеличением плотности тока зона растиривания на образцах сохраняется. Это можно объяснить отрицательным влиянием введенного в состав электролита  $\text{NH}_4\text{Cl}$  на шероховатость поверхности за счет содержания в нем ионов хлора.

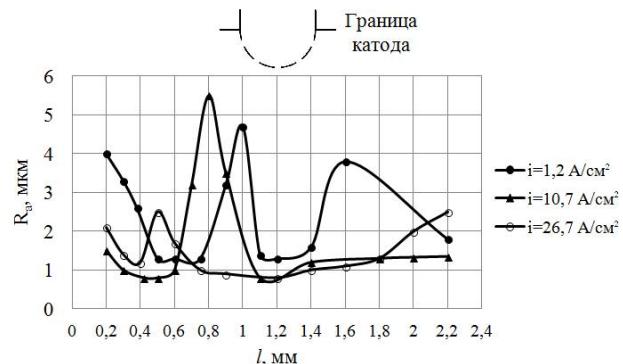


Рис. 4. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала в зависимости от плотности тока

Исследование шероховатости обрабатываемой поверхности при постоянной плотности тока и скорости потока электролита показало, что с применением электролита 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  зона растиривания на поверхности образца сохраняется, но смещается в сторону выхода электролита из межэлектродного канала, причем шероховатость поверхности, расположенной напротив поверхности катода, не изменяется в диапазоне плотностей тока от 14 до 26  $\text{A}/\text{cm}^2$ .

Вследствие того, что катод-инструмент (рис. 2, а) имеет в сечении круглую форму, происходит растекание тока по поверхности обрабатываемого материала. Это снижает точность обработки и шероховатость поверхности в переходной зоне. Таким образом, целесообразно применение катода-инструмента, имеющего плоскую рабочую поверхность (рис. 2, б), с целью повышения степени локализации плотности тока на обрабатываемой поверхности.

Кроме того, в процессе ЭХО деталей происходит образование большого количества шлама, который, находясь в межэлектродном канале и

оседая на обрабатываемой поверхности, снижает производительность, точность обработки, ухудшается шероховатость поверхности. Для устранения вредного влияния шлама и увеличения прорабатываемости электролита в него введен комплексообразователь 2,5%  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ .

Исследования показали, что при ЭХО с помощью катода-инструмента с плоской рабочей поверхностью степень локализации выше, следовательно, увеличивается точность обработки. Однако, несмотря на более высокую локализацию обработки, растратливание поверхности на входе в межэлектродный канал и на выходе из него сохраняется. В диапазоне плотностей тока от 7 до  $26 \text{ A/cm}^2$  значения шероховатости в переходной зоне значительно отличаются друг от друга.

Одним из путей повышения качества обработки является использование титанового (ВТ1-0) катода с полупроводниковым покрытием. Из литературы известно [20], что оксид титана обладает полупроводниковыми свойствами. Это может быть использовано для повышения качества обработки, что, в свою очередь, должно привести к снижению переходной зоны на входе в межэлектродный канал и на выходе из него. Покрытие из оксида титана получено путем наложения положительного потенциала на анод из титана в водном растворе.

На рис. 5 приведены графики изменения шероховатости по длине межэлектродного канала при обработке с использованием медного и титанового катода.

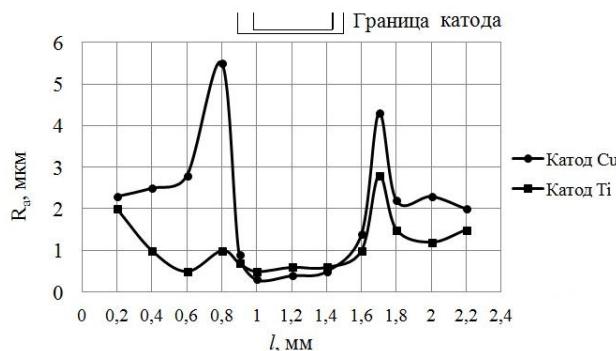


Рис. 5. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала в зависимости от материала катода-инструмента

Из графиков видно, что использование титанового катода-инструмента с плоской рабочей поверхностью, которая имеет полупроводниковое покрытие, при ЭХО деталей позволяет повысить качество обработки, т.к. шероховатость поверхности обработанной титановым катодом меньше

в переходной зоне, и сама зона короче по сравнению с результатами, полученными при использовании медного катода-инструмента. Необходимо отметить, что применение данной конструкции катода и режима обработки дает возможность избежать растратливания поверхности анода и получать тонкостенные детали летательных аппаратов с требуемым качеством поверхности.

### Заключение

Таким образом, при исследовании ЭХО тонкостенных деталей был выявлен оптимальный режим обработки с плотностью тока в диапазоне от 14 до  $26 \text{ A/cm}^2$ , скоростью потока электролита от 0,3 до 0,6 м/с, температурой электролита 25–30°C. В качестве электролита целесообразно применять водный раствор 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2,5\% \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ . Данный режим обработки дает возможность получать требуемое качество поверхности ( $R_a$  не более 2,6 мкм). В качестве материала катода перспективно использование титана с полупроводниковым покрытием на его поверхности, т.к. оно позволяет избежать растратливания обрабатываемой поверхности и улучшить ее качество.

### Список литературы

- Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; под общ. ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ие, 1988. 719 с.
- Смоленцев В.П., Болдырев А.И., Смоленцев Е.В. Теория электрохимических и физико-химических методов обработки. Воронеж: ГОБУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. 376 с.
- Chang C.S., Hourng L.W. Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining. Journal of Applied Electrochemistry. Volume 31, Issue 2, 2001, pp. 145-154.
- Zhou Y., Derby J.J. The cathode design problem in electrochemical machining. Chemical Engineering Science. Volume 50, Issue 17, September 1995, pp. 2679-2689.
- Jain V.K. Tooling design for ECM. Precision Engineering. Volume 2, Issue 4, October 1980, pp. 195-206.
- Reddy M.S., Jain V.K., Lal G.K. Tool design for ECM: Correction factor method. Journal of engineering for industry. Volume 110, Issue 2, May 1988, pp. 111-118.
- Chang C.S., Hourng L.W., Chung C.T. Tool design in electrochemical machining considering the effect of thermal-fluid properties. Journal of Applied Electrochemistry. Volume 29, Issue 3, March 1999, pp. 321-330.
- Purcar M., Bortels L., Van Den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations. Journal of Materials Processing Technology. Volume 149, Issue 1-3, 10 June 2004, pp. 472-478.
- Shibli S.M.A., Dilimon V.S., Saji V.S.  $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$  mixed oxide composite coating for improvement of Al-alloy sacrificial anodes. Journal of Solid State Electrochemistry. 2007, Volume 11, Issue 2, pp. 201–208. doi: 10.1007/s10008-005-0088-5.
- Shrivastava P., Moats Michael S. Wet film application techniques

- and their effects on the stability of  $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$  coated titanium anodes. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2009, Volume 39, Issue 1, pp. 107–116. doi: 10.1007/s10800-008-9643-y.
11. Gorodetskii V.V., Neburchilov V.A., Alyab'eva V.I. Titanium anodes with an active coating based on iridium oxides: the effect of the coating's thickness, porosity, and morphology on its stability, selectivity, and catalytic activity. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2005, Vol. 41, No. 10, pp. 1111–1117.
  12. Wang Y., Liao Y., Li W., Tang X., Li X. Carbon coating of  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}\text{-TiO}_2$  anode by using cetyl trimethyl ammonium bromide as dispersant and phenolic resin as carbon precursor. *Ionics*. 2015, Volume 21, Issue 6, pp. 1539–1544. doi: 10.1007/s11581-014-1309-7.
  13. Nikolic B.Z., Panic V.V., Dekanski A.B. Intrinsic potential-dependent performances of a sol-gel-prepared electrocatalytic  $\text{IrO}_2\text{-TiO}_2$  coating of dimensionally stable anodes. *Electrocatalysis*. 2012, Volume 3, Issue 3, pp. 360–368. doi: 10.1007/s12678-012-0086-1.
  14. Gorodetskii V.V., Neburchilov V.A. Titanium anodes with active coatings based on iridium oxides: the chemical composition of the coatings and the distribution of their components over depth on anodes made of  $\text{IrO}_2$ ,  $\text{IrO}_2 + \text{TiO}_2$ ,  $\text{IrO}_2 + \text{RuO}_2 + \text{TiO}_2$ , and  $\text{IrO}_2 + \text{RuO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ . *Russian Journal of Electrochemistry*. Vol. 39, No. 10, 2003, pp. 1116–1123.
  15. Gorodetskii V.V., Neburchilov V.A. Tantalum Oxide Effect on the Surface Structure and Morphology of the  $\text{IrO}_2$  and  $\text{IrO}_2 + \text{RuO}_2 + \text{TiO}_2$  Coatings and on the Corrosion and Electrochemical Properties of Anodes Prepared from These. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2007, Vol. 43, No. 2, pp. 223–228.
  16. Moradi F., Dehghanian C. Influence of heat treatment temperature on the electrochemical properties and corrosion behavior of  $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$  coating in acidic chloride solution. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 699–704. doi: 10.1134/S207020513060245.
  17. Dengyong W., Zengwei Z., Ningfeng W., Di Z. Effects of shielding coatings on the anode shaping process during counter-rotating electrochemical machining. *Chinise journal of mechanical engineering*. 2016, Vol. 29, No. 5, pp. 971–976. doi: 10.3901/CJME.2016.0419.055.
  18. Lee D.E., Soper S.A., Wang W. Fabrication and mathematical analysis of an electrochemical microactuator (ECM) using electrodes coated with platinum nano-particles. *Microsystem Technologies*. 2010, Volume 16, Issue 3, pp. 381–390. doi: 10.1007/s00542-009-0940-0.
  19. Wang D., Zhu Z., Bao J., Zhu D. Reduction of stray corrosion by using iron coating in  $\text{NaNO}_3$  solution during electrochemical machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, Volume 76, Issue 5, pp. 1365–1370. doi: 10.1007/s00170-014-6351-0.
  20. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Самсонов Г.В., Борисова А.Л. и др. М.: Металлургия, 1978. 472 с.

Материал поступил в редакцию 07.11.16.

**INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH**

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

## LOOKING AT THE SURFACE QUALITY DURING LOCAL AMMONIUM NITRATE ELECTROLYTIC MACHINING

**Ivan Ya. Shestakov** – D.Sc. (Eng.), Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-78. E-mail: yakovlevish@mail.ru

**Marina V. Voroshilova** – Assistant Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-36-18. E-mail: aniram1988@yandex.ru

**Denis S. Voroshilov** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-31. E-mail: d.s.voroshilov@gmail.com

### Abstract

This article describes the results of the research into electrolytic machining of 1201 aluminium alloy in aqueous solutions of ammonium nitrate. Having analysed some of Russian and international research papers on electrolytic machining, the authors came to the conclusion that studying the shape of an EDM tool (including its simulation) presents an important problem. A variety of factors determine the shape of an EDM tool, such as the electrolyte flow rate, the electrolyte temperature, the current density. The electrode coating is also important as it helps improve the quality of machining. The research conducted helped determine the effect of the electrolyte composition, current density and flow rate on the surface quality along the anode-to-cathode distance. The experiments showed that the flow rate of  $\sim 0.55$  m/s provides the minimum roughness and the excessive flow rate largely affects the surface quality. It was found that the use of a circular cross-section cathode tool leads to the

current spreading across the surface of the workpiece which reduces the machining accuracy and surface roughness in the transition zone. The use of a cathode with a flat face helps localize the current density on the treated surface thus increasing the machining accuracy. It was established that a cathode tool with a titanium oxide flat face helps reduce the surface roughness. The research helped identify the best electrolytic machining technique for large thin-walled parts when using a titanium cathode tool with a semiconductor coating. Below are the recommended electrolytic machining parameters: current density between 14 and 26  $\text{A}/\text{cm}^2$ , flow rate between 0.3 and 0.6 m/s, electrolyte temperature 25 – 30°C. The following aqueous solution is recommended for electrolyte: 15%  $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2.5\% \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ .

**Keywords:** Electrolytic machining, EDM tool, cathode, roughness, electrolyte, flow rate, current density.

## References

1. Amitan G.L., Baysupov I.A., Baron Yu.M. et al. *Spravochnik po electrokhimicheskim i electrophizicheskim metodam obrabotki* [Handbook of electrochemical and electrophysical machining techniques]. Leningrad, 1988, 719 p. (In Russ.)
2. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. *Teoriya electrokhimicheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki* [The theory of electrochemical and chemo-physical machining techniques]. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2007. 376 p. (In Russ.)
3. Chang C.S., Hourng L.W. Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol.31, iss. 2, 2001, pp. 145–154.
4. Zhou Y., Derby J.J. The cathode design problem in electrochemical machining. *Chemical Engineering Science*. Vol. 50, iss. 17, September 1995, pp. 2679–2689.
5. Jain V.K. Tooling design for ECM. *Precision Engineering*. Vol. 2, iss. 4, October 1980, pp. 195–206.
6. Reddy M.S., Jain V.K., Lal G.K. Tool design for ECM: Correction factor method. *Journal of engineering for industry*. Vol. 110, iss. 2, May 1988, pp. 111–118.
7. Chang C.S., Hourng L.W., Chung C.T. Tool design in electrochemical machining considering the effect of thermal-fluid properties. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 29, iss. 3, March 1999, pp. 321–330.
8. Purcar M., Bortels L., Van Den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 149, iss. 1-3, 10 June 2004, pp. 472–478.
9. S.M. A. Shibli, V.S. Dilimon, V.S. Saji. RuO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> mixed oxide composite coating for improvement of Al-alloy sacrificial anodes. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2007, Vol. 11, iss. 2, pp. 201–208. doi: 10.1007/s10008-005-0088-5.
10. P. Shrivastava, Michael S. Moats. Wet film application techniques and their effects on the stability of RuO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> coated titanium anodes. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2009, Vol. 39, iss. 1, pp. 107–116. doi: 10.1007/s10800-008-9643-y.
11. V.V. Gorodetskii, V.A. Neburchilov, V.I. Alyab'eva. Titanium anodes with an active coating based on iridium oxides: the effect of the coating's thickness, porosity, and morphology on its stability, selectivity, and catalytic activity. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2005, vol. 41, no. 10, pp. 1111–1117.
12. Y. Wang, Y. Liao, W. Li, X. Tang, X. Li. Carbon coating of Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> TiO<sub>2</sub> anode by using cetyl trimethyl ammonium bromide as dispersant and phenolic resin as carbon precursor. *Ionics*. 2015, vol. 21, iss. 6, pp. 1539–1544. doi: 10.1007/s11581-014-1309-7.
13. B.Z. Nikolic, V.V. Panic, A.B. Dekanski. Intrinsic potential-dependent performances of a sol–gel-prepared electrocatalytic IrO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> coating of dimensionally stable anodes. *Electrocatalysis*. 2012, vol. 3, iss. 3, pp. 360–368. doi: 10.1007/s12678-012-0086-1.
14. V.V. Gorodetskii, V.A. Neburchilov. Titanium anodes with active coatings based on iridium oxides: the chemical composition of the coatings and the distribution of their components over depth on anodes made of IrO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub> + RuO<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub>, and IrO<sub>2</sub> + RuO<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub> + Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Russian Journal of Electrochemistry*. Vol. 39, no. 10, 2003, pp. 1116–1123.
15. V.V. Gorodetskii, V.A. Neburchilov. Tantalum Oxide Effect on the Surface Structure and Morphology of the IrO<sub>2</sub> and IrO<sub>2</sub> + RuO<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub> Coatings and on the Corrosion and Electrochemical Properties of Anodes Prepared from These. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2007, vol. 43, no. 2, pp. 223–228.
16. F. Moradi, C. Dehghanian. Influence of heat treatment temperature on the electrochemical properties and corrosion behavior of RuO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> coating in acidic chloride solution. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 699–704. doi: 10.1134/S2070205113060245.
17. W. Dengyong, Z. Zengwei, W. Ningfeng, Z. Di. Effects of shielding coatings on the anode shaping process during counter-rotating electrochemical machining. *Chinise journal of mechanical engineering*. 2016, vol. 29, no. 5, pp. 971–976. doi: 10.3901/CJME.2016.0419.055.
18. D.E. Lee, S.A. Soper, W. Wang. Fabrication and mathematical analysis of an electrochemical microactuator (ECM) using electrodes coated with platinum nano-particles. *Microsystem Technologies*. 2010, vol. 16, iss. 3, pp. 381–390. doi: 10.1007/s00542-009-0940-0.
19. D. Wang, Z. Zhu, J. Bao, D. Zhu. Reduction of stray corrosion by using iron coating in NaNO<sub>3</sub> solution during electrochemical machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 76, iss. 5, pp. 1365–1370. doi: 10.1007/s00170-014-6351-0.
20. Samsonov G.V., Borisova A.L. et al. *Fiziko-khimicheskie svoistva okislov. Spravochnik* [The physical and chemical properties of oxides. Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1978. 472 p. (In Russ.)

Received 07/11/16

## Образец для цитирования

Шестаков И.Я., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С. Исследование качества поверхности при локальной электрохимической обработке в электролитах, содержащих нитрат аммония // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 64–69. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69

## For citation

Shestakov I.Ya., Voroshilova M.V., Voroshilov D.S. Looking at the surface quality during local ammonium nitrate electrolytic machining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 64–69. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-64-69