DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-107-112

УДК 621.9.047

РОЛЬ АНИОННОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПРОШИВКЕ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

THE ROLE OF ANIONIC COMPOSITION OF ELECTROLYTE IN THE ELECTROCHEMICAL MACHINING OF SMALL DIAMETER HOLES

Рахимянов Харис Магсуманович,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru,
Kharis M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Василевская Светлана Игоревна,
ассистент, e-mail: vasilevskay@corp.nstu.ru,
Svetlana I. Vasilevskaya, Assistant,
Рахимянов Константин Харисович,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: raximyanov@corp.nstu.ru,
Konstantin Kh. Rakhimyanov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Джавадова Сабина Вагифовна, магистрант,
e-mail: dzhavadova1995@list.ru
Sabina V. Dzhavadova, Master student

Новосибирский государственный технический университет 630073, Россия,
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.
Novosibirsk State Technical University, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies,
630073 Prospect K. Marksa, 20, Novosibirsk, Russia.

Аннотация: *Рассмотрены вопросы выбора анионного состава электролитов при электрохимической размерной обработке (ЭХРО) отверстий малого диаметра в меди полым катодом – инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров – 0,26 / 0,46 мм. Подтверждено, что при анодном растворении меди в хлоридных растворах на поверхности обрабатываемого материала образуется труднорастворимое химическое соединение CuCl, препятствующее процессу формирования правильного профиля отверстий малого диаметра в начальный момент его прошивки. Показано, что в азотнокислых и сернокислых растворах при обработке меди анодное растворение осуществляется под торцем катода – инструмента. Выявлено, что с применением азотнокислых и сернокислых растворов при обработке меди, возможно прошивать отверстия малого диаметра при минимальном межэлектродном зазоре (МЭЗ) равном 0,05 мм, обеспечивая при этом не только повышение локализации процесса, но и высокую точность копирования формы катода – инструмента.*

Abstract: *The problems of the choice of the anionic composition of electrolytes during electrochemical dimensional machining (ECM) of small holes in copper with a hollow cathode – tool with an internal diameter 0.26 mm and external diameter 0.46 mm are considered. It is confirmed that when dissolving copper in chloride solutions on the surface of the processed material, a hardly soluble chemical compound CuCl forms, which impedes the process of forming the accurate profile of the small hole at the initial moment of its penetrating. It is shown that in the nitric acid and sulphate solutions during copper treatment anodic dissolution is carried out under the end face of the cathode-tool. It has been found that with the use of nitric acid and sulphate solutions in the treatment of copper, it is possible to drill small holes with a minimum electrochemical gap of 0.05 mm, thus ensuring not only an increase in the localization of the process, but also a high accuracy of copying the shape of the cathode – tool.*

Ключевые слова: *электрохимическая размерная обработка, межэлектродный зазор, нейтральный электролит, прошивка отверстий малого диаметра, медь, нержавеющая сталь, катод – инструмент, струя электролита, анод, труднорастворимое химическое соединение CuCl.*

Key words: *Electrochemical dimensional machining, electrochemical gap, neutral electrolyte, small hole drilling, copper, stainless steel, cathode – tool, electrolyte jet, anode, hardly soluble chemical compound CuCl.*

Введение

Эффективность формообразования при обработке внутренних поверхностей, в частности отверстий малого диаметра во многом определяется выбором рациональной технологической схемы, связанной с геометрией режущего инструмента и режимными параметрами. Такая технологическая задача относительно усложняется при использовании электрофизических методов обработки, когда в формообразовании поверхностей задействованы не процессы разрушения обрабатываемого материала режущим клином, что является характерным для лезвийной обработки, а иные физические воздействия такие как: химические, тепловые и др., а порой и их комбинации [1 – 5].

К таким обработкам относится и электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) материалов и сплавов, режимными параметрами которой помимо технологического напряжения являются характеристики рабочей среды – электролита (анионный и катионный состав, выход обрабатываемого материала по току, кинематическая вязкость, удельная электропроводность и др.), скорость гидродинамического потока в рабочей зоне, величина межэлектродного зазора (МЭЗ). Правильное назначение режимных параметров и будет определять эффективность ЭХРО обрабатываемого материала по оценкам точности формообразования отверстий и производительности процесса.

В работе [6] представлены результаты исследований по электрохимической прошивке отверстий диаметром менее 0,5 мм в меди. ЭХРО осуществлялась с использованием полого катода – инструмента с соотношением наружного и внутреннего диаметров – 0,46 / 0,26 мм. В качестве электролита был выбран 5 % водный раствор NaCl, обладающий высоким значением выхода меди по току, достаточной при низких концентрациях раствора электропроводностью. Избыточное давление струи на входе катода – инструмента составляло P = 0,3 МПа, значение которого обеспечивало в МЭЗ приемлемые для удаления продуктов анодного растворения гидродинамические потоки [7]. Электрохимическая прошивка отверстий малого диаметра предполагает возможность и перспективу обработки при меньших значениях МЭЗ по сравнению с традиционно исследуемыми в ЭХРО (0,1 – 0,5 мм) [8 – 13].

Электрохимическая обработка при уменьшении величины МЭЗ позволит повысить локализацию процесса анодного растворения, что, с одной стороны, приведет к увеличению плотности тока и, следовательно скорости обработки, а с другой, улучшению точности копирования формы катода – инструмента. Однако, как показали результаты исследований [6], попытка ЭХРО на МЭЗ равном 0,05 мм при избыточном давлении струи P = 0,3 МПа электролита 5 % NaCl и технологическом напряжении 10 В привела к полной пассивации поверхности меди не только под катодом, но и за его контуром. Это объясняется высокой интенсивностью образования в зоне обработки труднорастворимого химического соединения *CuCl* [14], удаление которого гидродинамическими потоками при давлении 0,3 МПа оказалось невозможным. Сбалансированность процессов образования данного химического соединения и его удаления гидродинамическими потоками при отмеченном давлении обеспечивалась при увеличении МЭЗ до 0,3 – 0,4 мм. Это привело к снижению локализации процесса анодного растворения и, соответственно уменьшению производительности обработки и ухудшению точности формообразования. Однако, проведение ЭХРО при сохранении высокой степени локализации анодного растворения меди за счет малой величины МЭЗ возможно при выборе состава электролита, анионы которого исключают образование труднорастворимых химических соединений в зоне обработки.

В настоящей статье рассмотрено влияние анионных составов водных нейтральных электролитов $NaNO_3$ и Na_2SO_4 на процесс электрохимической прошивки отверстий в меди.

Описание экспериментальных исследований

Исследования по прошивке отверстий малого диаметра проводились на экспериментальной установке, описанной в работе [6]. Обрабатываемым материалом являлась медь марки М1 ГОСТ 859 – 2001. Формообразование отверстий в указанном материале осуществлялась полым катодом – инструментом. В качестве его использовалась медицинская металлическая игла с соотношением наружного и внутреннего диаметров 0,26 мм / 0,46 мм [15]. Между анодом и полым катодом – инструментом устанавливался МЭЗ равный 0,05 мм. Для экспериментальных исследований были применены 5 % водные растворы нейтральных солей азотнокислого натрия ($NaNO_3$) ГОСТ 828 – 77 и сернокислого натрия (Na_2SO_4) ГОСТ 4166 – 76. Подача электролита осуществлялось через отверстие катода – инструмента под избыточным давлением P = 0,3 МПа. В исследованиях использовался источник технологического тока с диапазоном рабочих напряжений от 5 В до 20 В. Прошивка отверстий проводилась при напряжении 10 В. Время прошивки отверстий варьировалось от 4 с до 20 с. Оценка результатов ЭХРО отверстий проводилась с помощью измерительного микроскопа Nikon MM – 400.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты обработки отверстий малого диаметра в меди при электрохимической прошивке их в 5 % водных растворах на основе нейтральных солей азотнокислого и сернокислого натрия ($NaNO_3$; Na_2SO_4) с применением минимальной величины МЭЗ, равного 0,05

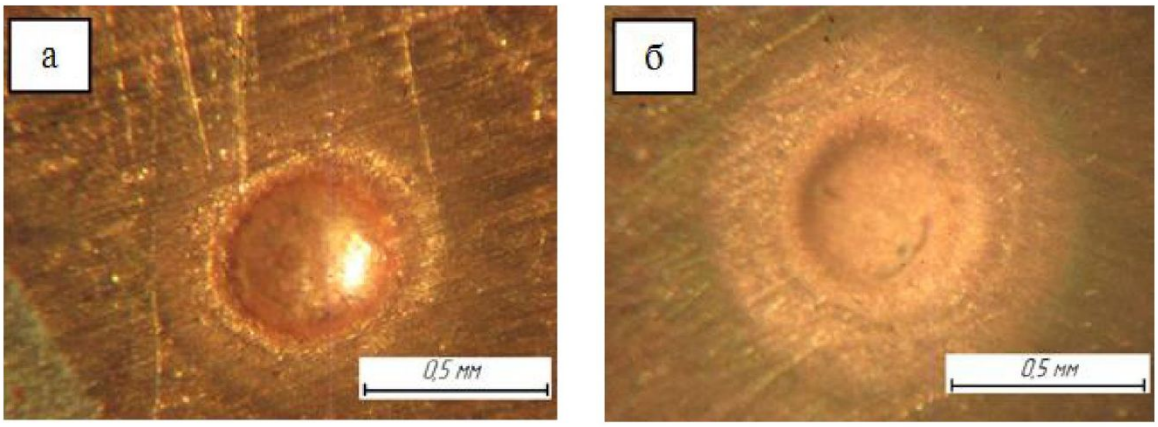

Рис. 1. Формирование отверстия в меди при электрохимической обработке в нейтральных растворах после 10 с; P = 0,3 МПа; Δ = 0,05 мм: а – азотнокислый натрий ($NaNO_3$); б – сернокислый натрий (Na_2SO_4)

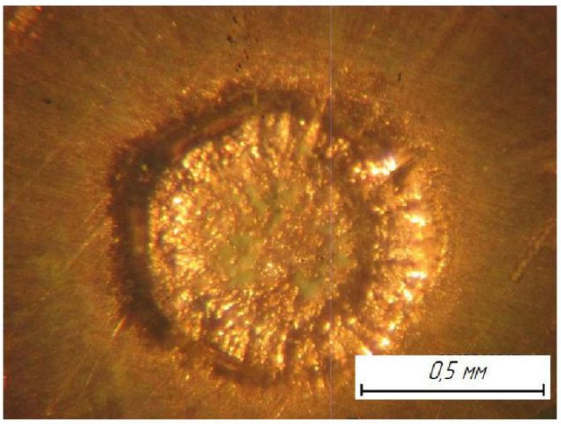

Рис. 2. Фото поверхности образца после 20 с электрохимической обработки отверстия в меди в 5 % растворе хлористого натрия (NaCl): P = 0,3 МПа; Δ = 0,05 мм [6]

мм.

Анализ результатов электрохимического растворения меди в указанных электролитах (рис. 1 а, б) при МЭЗ равном 0,05 мм после 10 с обработки показал иной характер, чем при обработке ее в хлоридных растворах после 20 с (рис. 2) [6].

Так при электрохимической обработке отверстия в меди в электролитах $NaNO_3$ и Na_2SO_4 (рис. 1 а, б) его формообразование начинается под торцем катода – инструмента. Схематично начало процесса формообразования отверстия показано на рис. 3. Подобная кинетика процесса ЭХРО позволяет осуществить непрерывную стабилизацию МЭЗ на установленном уровне (0,05 мм) в условиях относительного перемещения электродов, что обеспечивает высокую степень локализации электрохимической обработки. Стабилизация МЭЗ равного 0,05 мм нереальна при использовании хлоридного раствора, когда в рабочей зоне под торцем катода – инструмента в результате интенсивного анодного растворения образуется труднорастворимое химическое соединение (*CuCl*), удалить которое с помощью действующих гидродинамических потоков не возможно (рис. 2). Смена электролита с хлоридного на азотнокислый или сернокислый позволила сбалансировать процессы интенсивного (за счет малого МЭЗ) анодного растворения с образованием окислов меди и их эффективного удаления из зоны обработки даже при малых избыточных давлениях (0,3 МПа) электролита.

Для подтверждения того, что основной причиной при обработке меди в хлоридных растворах является образование на поверхности материала труднорастворимого химического соединения *CuCl* в работе проведено исследование процесса ЭХРО отверстий в нержавеющей стали 12Х18Н10 ГОСТ (5582 – 75). Электрохимическая обработка отверстий в данном материале осуществлялась в 5 % водных растворах азотнокислого натрия ($NaNO_3$) и хлористого натрия (NaCl) на МЭЗ равном 0,05 мм при давлении струи электролита P = 0,3 МПа и технологическом напряжении 10 В.

Результаты экспериментальных исследований по формообразованию отверстий малого диаметра в нержавеющей стали при обработке в электролитах $NaNO_3$ и NaCl, показаны на рис. 3. Экспериментальные исследования электрохимического

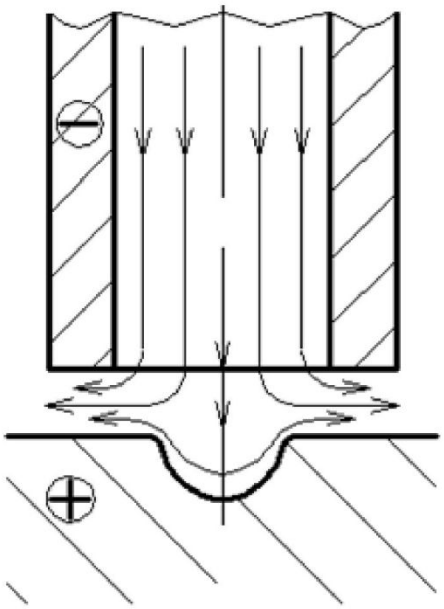

Рис. 3. Схема формирования отверстия в меди при электрохимической обработке в нейтральных растворах $NaNO_3$ и Na_2SO_4

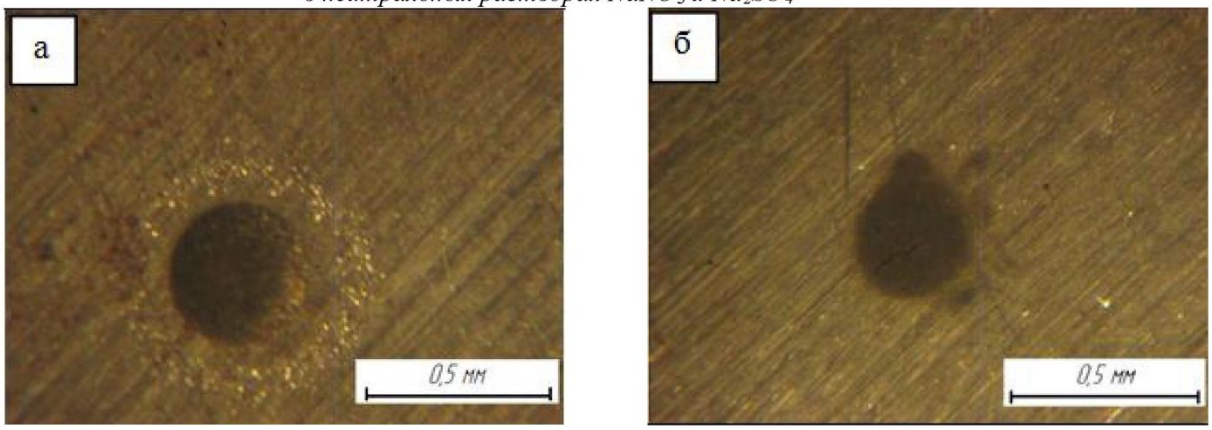

Рис. 4. Формирование отверстия в нержавеющей стали при электрохимической обработке в нейтральных растворах после 4 с; P = 0,3 МПа; Δ = 0,05 мм: а – хлористый натрий (NaCl); б – азотнокислый натрий ($NaNO_3$)

растворения нержавеющей стали в указанных электролитах (рис. 4 а, б) при МЭЗ равном 0,05 мм после 4 с обработки показали, что механизм формообразования отверстий в данном материале, как в электролите $NaNO_3$, так и в электролите NaCl осуществляется по схеме, представленной на рис. 3.

Выводы

Установлено, что главным ограничением в процессе получения отверстий в меди при электрохимической прошивке в хлоридных растворах является возникновение пассивационных ограничений связанных с интенсивным образованием труднорастворимого химического соединения *CuCl* на поверхности при малых значениях МЭЗ. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования, связанные с обработкой меди в азотнокислом и сернокислом электролитах. Показано, что механизм формирования в меди отверстий малого диаметра в указанных электролитах осуществляется в зоне максимальной локализации процесса под активным торцем катода – инструмента. Отмечено, что при смене обрабатываемого материала с использованием не только азотнокислых и сернокислых растворов, но и хлоридных электролитов, механизм формирования отверстий малого диаметра происходит по аналогичной схеме. Выявлено, что при обработке малых отверстий в меди для обеспечения высокой степени процесса локализации за счет уменьшения МЭЗ до 0,05 мм необходимо применять электролиты исключающие образование труднорастворимого химического соединения *CuCl* на поверхности материала. Полученные результаты подтверждают возмож-

ность ЭХРО отверстий малого диаметра в меди с непрерывным перемещением одного из электродов, установленных на МЭЗ равном 0,05 мм, что позволяет обеспечить достаточную степень процесса локализации, точность копирования формы катода – инструмента и высокую производительность обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веневцева С.Н., Белоусов И.А. Микроэлектрохимическая обработка материалов с применением наносекундных импульсов технологического напряжения // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации) // Сборник трудов научно – технической конференции. Тула, 7 октября 2011 г. – Тула: ТулГУ, 2011. С. 9 – 10.

2. Баранова С.Н. Микроэлектрохимическая обработка при сверхмалых зазорах // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации) // Сборник трудов научно – технической конференции. Тула, 12 октября 2010 г. – Тула: ТулГУ, 2010. – 65 с.

3. Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P. Research on ECD Localization in Case of Micro Machining with Ultra Short Pulses / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. – pp. 319 – 322.

4. Yong Li, Xiaoyu Ma, Gaihong Liu fnd others. Research of Micro ECM Using Micro Array Electrode / Proceeding of the International Symposium of Electro Machining (ISEM – 13). – Shanhau, 2010. – pp. 319 – 322.

5. Ma X., Li Y. Research of Micro Electrode Fabrication Based on ECM / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. –pp. 331 – 334.

6. Рахимянов Х.М., Василевская С.И. Особенности формообразования малых отверстий в меди при электрохимической обработке в водных хлоридных растворах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. - № 2 (75). – С. 6 – 16. – doi:10.17212/1994 – 6309 – 2017 – 2 – 6 – 16.

7. Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Захаров А.С., Василевская С.И. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах // Механики XXI веку. – 2015. – № 14. – С. 112 – 115.

8. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1976. – 346 с.

9. Байсупов И.А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1981. – 152 с.

10. Черепанов Ю.П., Самецкий Б.И. Электрохимическая обработка в машиностроении. – М.: «Машиностроение», 1972. – 117 с.

11. Артамонов Б.А., Бишницкий А.Л., Волков Ю.С., Глазков А.В. Размерная электрическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1978. – 336 с.

12. Такунцев К.В., Зайцев А.Н. Электроэрозионно – электрохимическая обработка: современное состояние, проблемы, перспективы // Перспективные технологии физико – химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 9 – 13.

13. Мороз И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: «Машиностроение», 2009. – 279 с.

14. Грушевская С.Н. Кинетика анодного растворения Cu, Au – сплавов в условиях образования труднорастворимых соединений Cu (I): дис. … к – та хим. наук: 02.00.05 / Воронежский государственный университет. – Воронеж, 2000. – 200 с.

15. Рахимянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом – инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. - № 2. – С. 12 – 20. – doi:10.17212/1994 – 6309 – 2016 – 2 – 12 – 20.

REFERENCES

1. Venevtseva S.N, Belousov I.A [Micro electro-chemical processing of materials using nanosecond pulse voltage technology] Sbornik trudov nauchno – tehnicheskoj konferentsii “Sovremennaya jelektrotehnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)” [Proceedings of the scientific - technical conference “Modern electrotechnology industry in Russia (youth innovation)”]. Tula, 2011. – pp. 9 – 10. (In Russian).

2. Baranova S.N. [Mikrojelektrohimicheskaja obrabotka pri sverhmalyh zazorah] Sbornik trudov nauchno –

tehnicheskoj konferentsii “Sovremennaya jelektrotehnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)” [Proceedings of the scientific - technical conference “Modern electrotechnology industry in Russia (youth innovation)”]. Tula, 2010. 65 p. (In Russian).

3. Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P. Research on ECD Localization in Case of Micro Machining with Ultra Short Pulses / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. – pp. 319 – 322.

4. Yong Li, Xiaoyu Ma, Gaihong Liu and others. Research of Micro ECM Using Micro Array Electrode / Proceeding of the International Symposium of Electro Machining (ISEM – 13). – Shanhau, 2010. – pp. 319 – 322.

5. Ma X., Li Y. Research of Micro Electrode Fabrication Based on ECM / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. – pp. 331 – 334.

6. Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I. Osobennosti formoobrazovanija malyh otverstij v medi pri jelektrohimicheskoj obrabotke v vodnyh hloridnyh rastvorah [Features of small holes formation in copper by electrochemical machining in water chloride solutions]. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science, 2017, no. 2 (75), pp. 6 – 16. Doi: 10.17212/1994 – 6309 – 2017 – 2- 6 – 16.

7. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Zakharov A.S., Vasilevskaya S.I. Vliyanie gidrodinamicheskogo rezhima na skorost' anodnogo rastvoreniya medi v passiviruyushchikh elektrolitakh [Influence of hydrodynamic conditions on the rate of anodic dissolution of copper in the passivating electrolytes]. Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century, 2015, no. 14, pp. 112–115.

8. Sedykin F.V. Razmernaja jelektrohimicheskaja obrabotka detalej mashin [Dimensional electrochemical processing of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 346 p.

9. Baisupov I.A. Jelektrohimicheskaja obrabotka metallov [Electrochemical machining]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1981. 152 p.

10. Cherepanov Yu.P., Sametsky B.I. Jelektrohimicheskaja obrabotka v mashinostroenii [Electrochemical machining in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 117 p.

11. Artamonov BA, Bishnitsky AL, Volkov Yu.S., Glazkov A.V. Razmernaja jelektricheskaja obrabotka metallov [Dimensional electrical processing of metals]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1978. 336 p.

12. Takuntsev K.V., Zaitsev A.N. Jelektrojerozionno – jelektrohimicheskaja obrabotka: sovremennoe sostojanie, problemy, perspektivy [Electroerosion-electrochemical treatment: current state, problems, prospects]. Perspektivnye tehnologii fiziko – himicheskoj razmernoj obrabotki i formirovanija jekspluatacionnyh svojstv metallov i splavov [Perspektivnye tehnologii fiziko – himicheskoj razmernoj jekspluatacionnyh formirovanija i obrabotki metallov i splavov svojstv], Ufa Publ., 2001. - pp. 9 – 13.

13. Moroz I.I. Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov [Electrochemical machining of metals], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 279 p.

14. Grushevskaya S.N. Kinetika anodnogo rastvorenija Cu, Au – splavov v uslovijah obrazovanija trudnorastvorimyh soedinenij Cu (I) [Kinetics of anodic dissolution of Cu, Au – alloys under conditions of formation of hardly soluble Cu (I). Candidate of chemical sci. diss.]. Voronezh, 2000. 200 p.

15. Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya. S.I. Tekhnologicheskie vozmozhnosti ehlektrohimicheskoj obrabotki otverstij nepodvizhnym katodom – instrumentom [Technological capabilities of the electrochemical machining of holes using fixed cathode – tool]. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science, 2016, no. 2 (71), pp. 12 – 20. Doi: 10.17212/1994 – 6309 – 2016 – 2 – 12 – 20.

Поступило в редакцию 19.04.2018
Received 19.04.2018