

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НЕПОДВИЖНЫМ КАТОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор  
С.И. ВАСИЛЕВСКАЯ, аспирант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 4 марта 2016  
Рецензирование 5 апреля 2016  
Принята к печати 15 мая 2016

**Рахимьянов Х.М.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: kharis51@mail.ru; Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Рассматриваются технологические возможности электрохимической размерной обработки меди неподвижным катодом-инструментом. Катод выполнен полым для подачи электролита в зону обработки. Предложено использовать схему с горизонтальным расположением катода, что позволило рассматривать струю электролита как формообразующий инструмент. Получена зависимость изменения глубины прошивки во времени, свидетельствующая о снижении скорости обработки по мере увеличения межэлектродного зазора. Данный факт подтверждается снижением плотности тока при обработке, что объясняется увеличением омического сопротивления потока электролита с ростом межэлектродного зазора. Установлено, что повышение технологического напряжения на электродах приводит к увеличению как глубины обработки, так и диаметра входного отверстия. Изменение избыточного давления струи от 0,3 до 0,8 МПа не оказало заметного влияния как на производительность обработки, так и на закономерности формирования отверстия. Показано, что увеличение диаметра катода-инструмента сопровождается ростом глубины отверстия и его диаметра. Показаны перспективы дальнейшего совершенствования процесса электрохимической размерной обработки малых отверстий для увеличения производительности процесса и улучшения точностных показателей.

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, анод, катод-инструмент, анодное растворение, электролит, плотность тока.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20

## Введение

В современном машиностроении существует ряд технологических задач, реализация которых традиционными методами обработки не представляется возможной. Это относится как к обработке высокопрочных материалов, в том числе аморфных и нанокристаллических, различного рода покрытий, так и к обработке микрообъектов (отверстий, пазов и т. д.).

Решение этих задач возможно при использовании электрофизических технологий, включающих традиционные схемы разрушения

материала, присущие механическим методам обработки. Комплексное решение по обеспечению точности и качества обработки электропроводных материалов достигается при использовании электрохимической обработки (ЭХО), основанной на локальном анодном растворении обрабатываемого материала [1–7]. Применение ЭХО как для предварительной, так и для окончательной обработки различных классов материалов позволяет обеспечить требуемые показатели точности и качества обработки при высокой производительности процесса [8–14]. Это спо-

собствовало внедрению ЭХО в технологические процессы обработки деталей машин и инструментов в машиностроительной, инструментальной, авиационной, медицинской и других отраслях промышленности.

В настоящее время интенсивно развиваются исследования, связанные с микрообработкой деталей, когда размеры обрабатываемых поверхностей составляют десятые доли миллиметра, а порой и несколько микрометров [16]. Так, в работе [17] отмечается, что основные трудозатраты при изготовлении исследованной номенклатуры деталей связаны с получением отверстий диаметром от 0,1 до 0,3 мм. Обработка отверстий в данном размерном диапазоне с обеспечением требуемых показателей точности, качества и производительности является сложной технической задачей.

Настоящая статья посвящена оценке технологических возможностей ЭХО-отверстий малого диаметра неподвижным катодом-инструментом с прокачкой электролита в межэлектродном промежутке. Установление технологических ограничений в обработке позволит выявить пути дальнейшего совершенствования процесса.

### Методика экспериментального исследования

В качестве модельного материала в настоящем исследовании использовалась медь марки М1 ГОСТ 859–2001. Состав и концентрация электролита (5 % NaCl) для ЭХО были выбраны по результатам предварительных исследований [14]. Методика подготовки образцов подробно изложена в работе [18].

При подготовке методики исследований важным оказался выбор схемы ЭХО. Так, при использовании в ЭХО сплошного катода-инструмента по схеме, представленной на рис. 1, продукты электрохимических реакций (шлам), заполняя межэлектродный зазор, ухудшают условия обновления электролита в зоне обработки. Это приводит к торможению процесса и снижению качества обрабатываемой поверхности.

Для своевременного удаления продуктов анодного растворения используют схему с про-

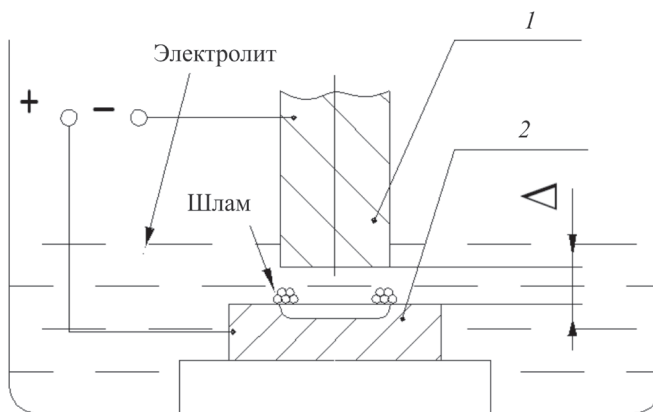


Рис. 1. Схема ЭХО с вертикальным расположением катода-инструмента 1; 2 – анод – деталь; Δ – межэлектродный зазор

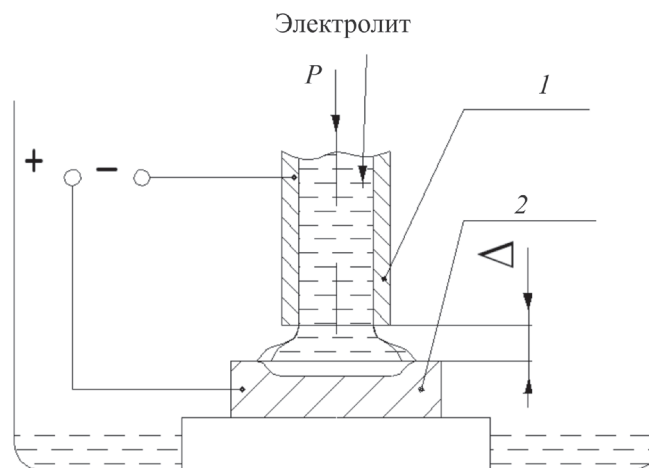


Рис. 2. Схема ЭХО с прокачкой электролита через полый катод-инструмент 1; 2 – анод – деталь; Δ – межэлектродный зазор

качкой электролита через полый катод-инструмент (рис. 2). Подача электролита через катод улучшает гидродинамические условия в межэлектродном промежутке, обеспечивая как удаление продуктов электрохимических реакций, так и обновление электролита в зоне обработки. Однако вертикальное расположение катода над анодом сопровождается скоплением определенного объема электролита на обрабатываемой поверхности анода. Это снижает локализацию процесса под катодом и приводит к растворению материала вокруг обрабатываемого отверстия.

Для устранения подобного явления в экспериментах реализована схема ЭХО с горизонтальным расположением полого катода-инструмен-

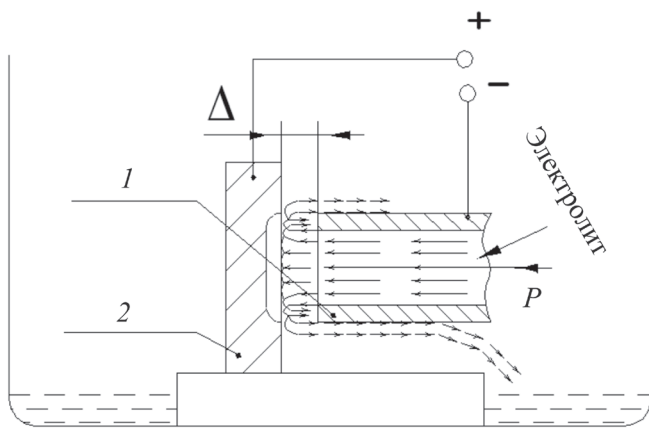


Рис. 3. Схема ЭХО с горизонтальным расположением полого катода-инструмента 1; 2 – анод – деталь; Δ – межэлектродный зазор

та относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3).

При подаче электролита под давлением ( $P$ ) через полый катод-инструмент подающая струя, отражаясь от обрабатываемой поверхности, формирует обратный поток, движущийся вдоль катода. Данная схема исключает скопление электролита вне зоны обработки, что улучшает ее точностные параметры. Подобный результат может быть реализован и при вертикальном нижнем по отношению к аноду расположении катода.

Электрохимическое формообразование катодом-инструментом осуществляется на малых межэлектродных зазорах (0,1...0,3 мм), что обеспечивает достижение значительных плотностей тока в зоне обработки. Последнее является немаловажным в достижении как точности обработки, так и производительности процесса.

В настоящем исследовании использовалась схема с неподвижным относительно анода расположением катода-инструмента при первоначальном значении межэлектродного зазора, равным 0,1 мм. При использовании схемы ЭХО, представленной на рис. 3, при обработке отверстия в образце формируется струя электролита, состоящая из подающего и отраженного потоков, которая, по существу, и является инструментом при формировании отверстия на

аноде. В исследованиях использовался источник технологического тока с диапазоном рабочих напряжений от 5 до 20 В. Для подачи электролита через катод-инструмент избыточное давление изменялось от 0,3 до 0,8 МПа. Время обработки составляло от 1 до 10 мин. В качестве катода-инструмента использовались металлические иглы длиной 10 мм и соотношениями внутренних и наружных диаметров, равными  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; 0,39/0,64 мм; 0,55/0,8 мм. Глубина и форма полученных отверстий в образцах контролировались с помощью индикатора многооборотного с ценой деления 0,001 мм (ГОСТ 9696–82) и микроскопа Nikon MM – 400.

### Результаты и обсуждение

Данные экспериментальных исследований по оценке производительности обработки отверстия в виде зависимости глубины прошивки отверстия от времени обработки для различных значений напряжения на электродах представлены на рис. 4, а также на фотографиях поперечных сечений отверстий (рис. 5).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что производительность обработки отверстия снижается по мере его углубления и тем значительнее, чем меньше технологическое напряжение. При этом повышение напряжения интенсифицирует процесс обработки на всех ее этапах. Снижение производительности по

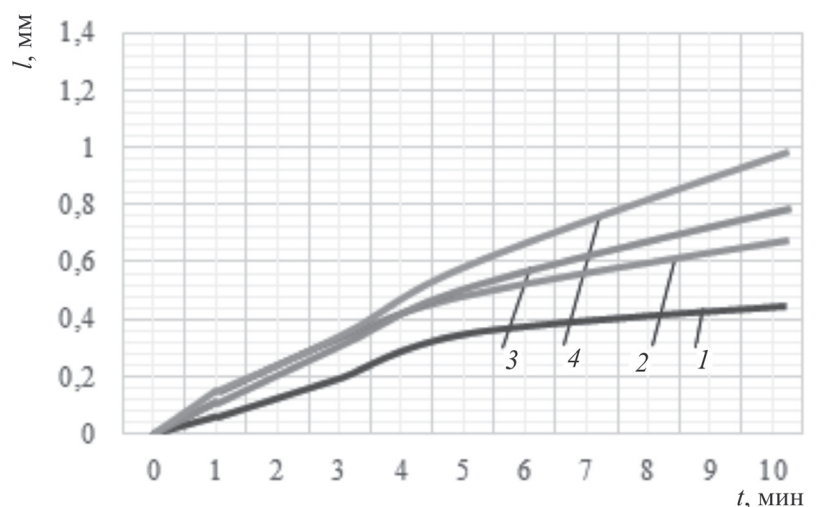


Рис. 4. Зависимость глубины отверстия от времени обработки:  $P = 0,3$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; 1 – 5 В; 2 – 10 В; 3 – 15 В; 4 – 20 В

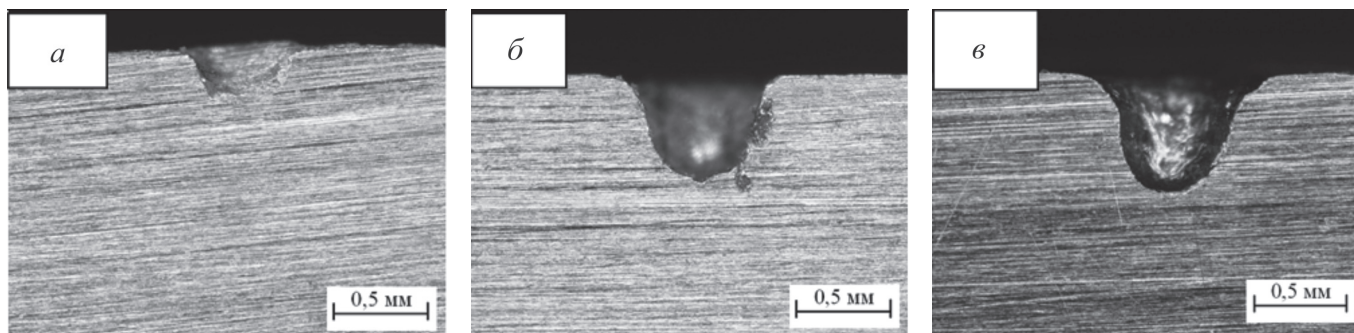


Рис. 5. Фотографии поперечных сечений отверстий:

$P = 0,3$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; а –  $U = 5$  В;  $t = 3$  мин; б –  $U = 15$  В;  $t = 5$  мин; в –  $U = 20$  В;  $t = 5$  мин

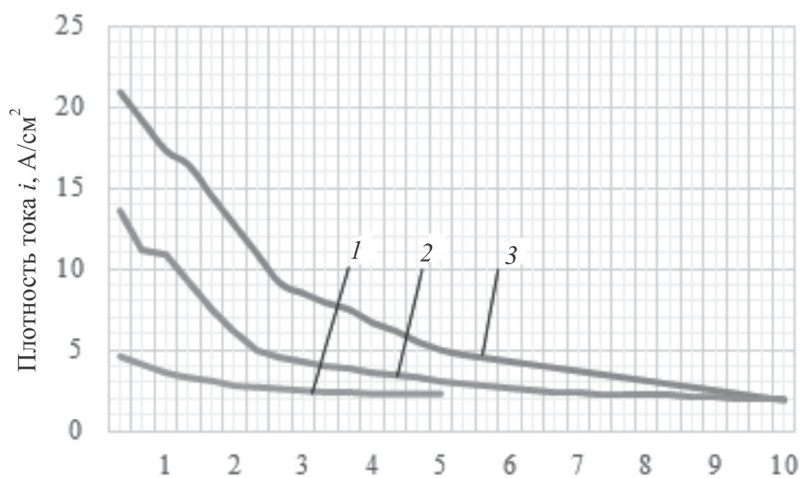


Рис. 6. Изменение плотности тока от времени обработки:

$P = 0,3$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; 1 –  $U = 5$  В; 2 –  $U = 10$  В; 3 –  $U = 20$  В

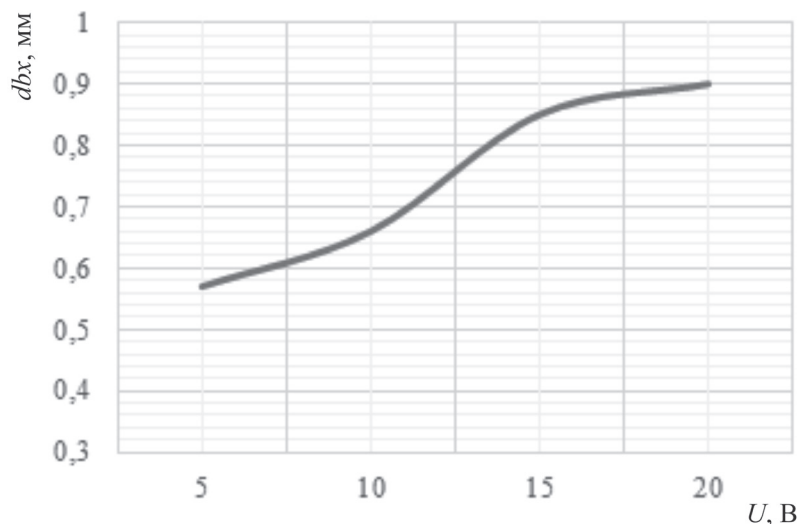


Рис. 7. Зависимость диаметра входного отверстия от напряжения;

$P = 0,3$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм

мере углубления отверстия также подтверждается падением плотности тока по ходу обработки (рис. 6).

Данный факт можно объяснить тем, что по мере обработки увеличивается первоначально установленное значение межэлектродного зазора, что сопровождается ростом омического сопротивления потока электролита.

В то же время рост напряжения приводит к увеличению диаметра входного отверстия на образце (рис. 7), что также можно увидеть на фотографиях поперечных сечений образцов (см. рис. 5).

Если изменение глубины обработки со временем носит очевидный характер, то колебания величины диаметра входного отверстия от времени весьма незначительны (рис. 8). В основном изменение данного параметра зависит от напряжения (см. рис. 7).

Увеличение избыточного давления струи до 0,55 и 0,8 МПа не привело к изменению закономерностей формирования отверстия (рис. 9, 10).

Переход на следующие типоразмеры катодов-инструментов  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,39/0,64$  мм и  $0,55/0,8$  мм сопровождается увеличением глубины и входного диаметра отверстия при равных значениях остальных режимных параметров (рис. 11, 12). При этом сохраняется общая закономерность влияния режимных параметров ЭХО на процесс анодного растворения.

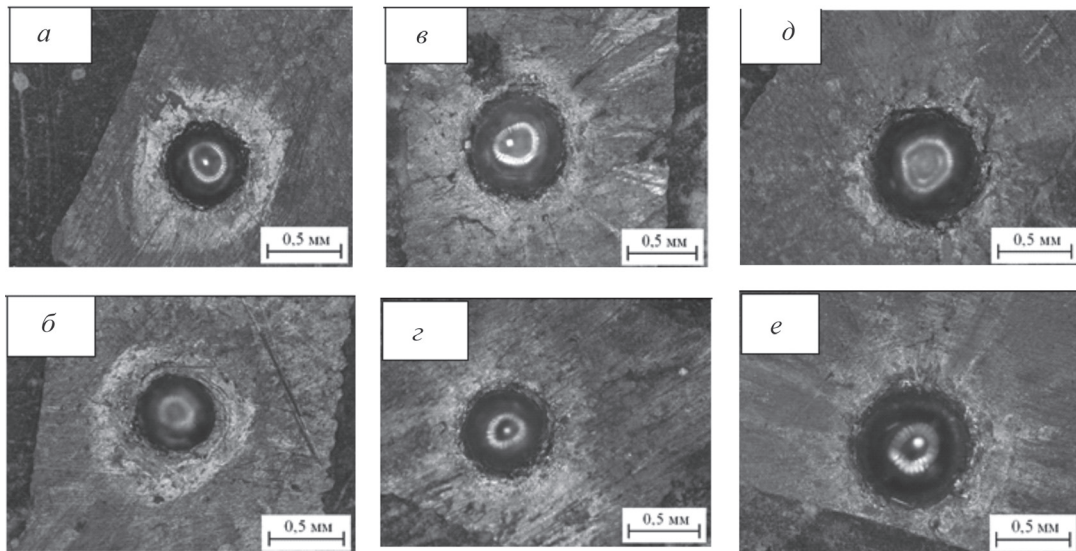


Рис. 8. Входное отверстие при различном времени обработки и напряжении на электродах:

$P = 0,3$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; а –  $U = 5$  В;  $t = 3$  мин; б –  $U = 5$  В;  $t = 5$  мин; в –  $U = 10$  В;  $t = 3$  мин; г –  $U = 10$  В;  $t = 5$  мин; д –  $U = 15$  В;  $t = 3$  мин; е –  $U = 15$  В;  $t = 5$  мин)

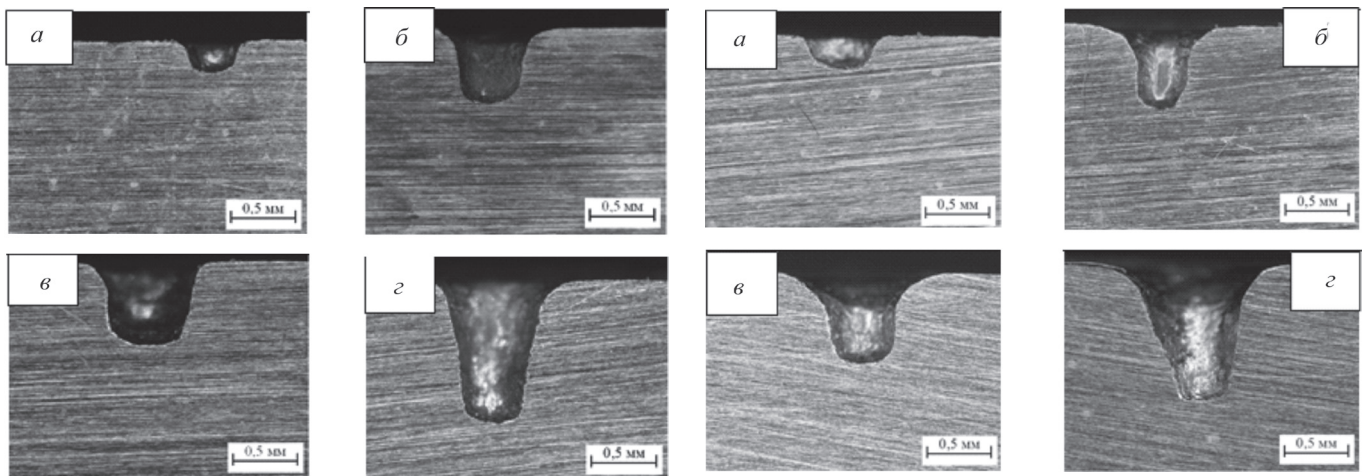


Рис. 9. Поперечные сечения отверстий:

$P = 0,55$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; а –  $U = 5$  В;  $t = 3$  мин; б –  $U = 15$  В;  $t = 5$  мин; в –  $U = 20$  В;  $t = 5$  мин; г –  $U = 20$  В;  $t = 10$  мин

Рис. 10. Поперечные сечения отверстий:

$P = 0,8$  МПа;  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26/0,46$  мм; а –  $U = 5$  В;  $t = 3$  мин; б –  $U = 15$  В;  $t = 5$  мин; в –  $U = 20$  В;  $t = 5$  мин; г –  $U = 20$  В;  $t = 10$  мин

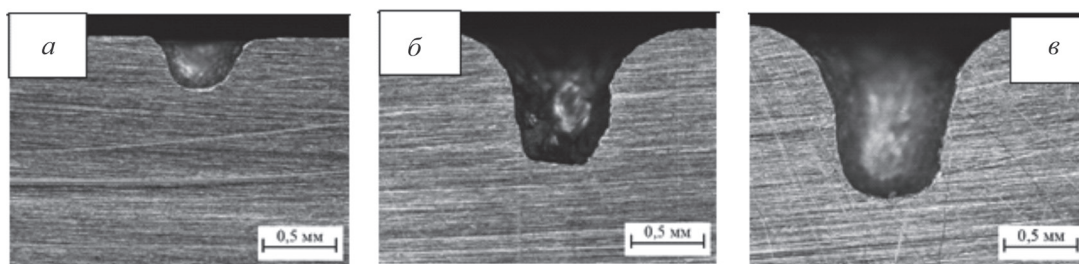


Рис. 11. Поперечные сечения отверстий при обработке катодом-инструментом

$\varnothing_{\text{кат}} = 0,39/0,64$  мм:

а –  $U = 5$  В;  $P = 0,3$  МПа;  $t = 5$  мин; б –  $U = 20$  В;  $P = 0,55$  МПа;  $t = 10$  мин; в –  $U = 20$  В;  $P = 0,8$  МПа;  $t = 10$  мин

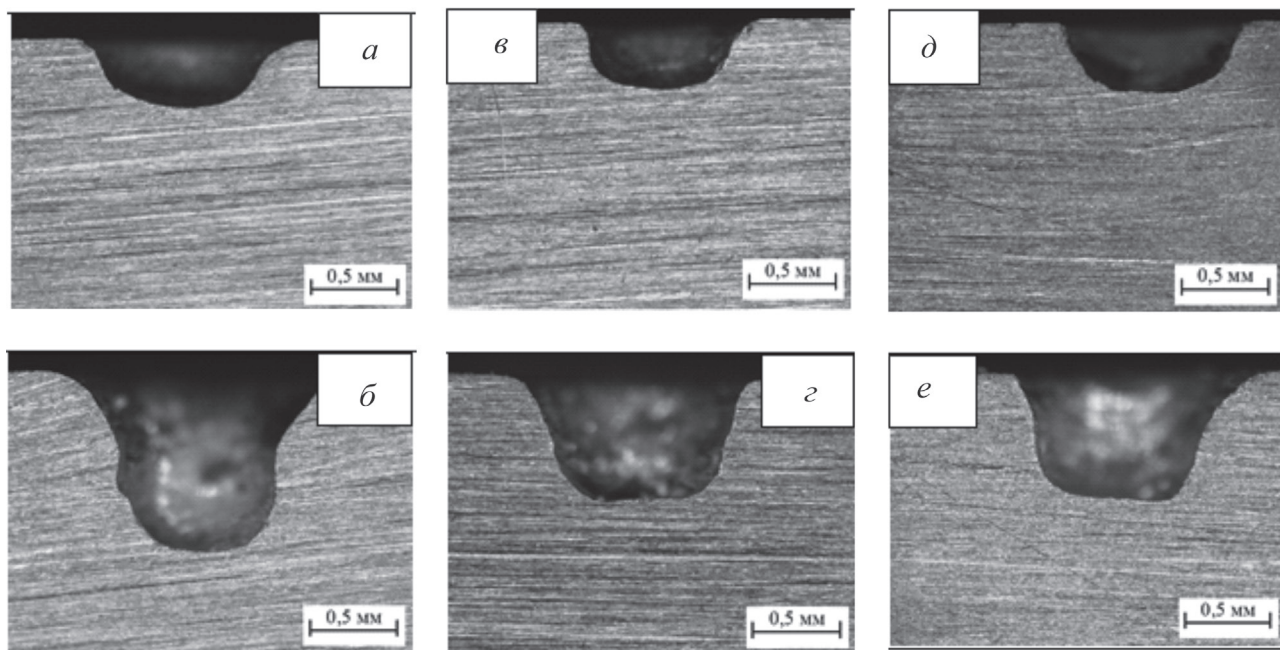


Рис. 12. Поперечные сечения отверстий при обработке катодом-инструментом  $\varnothing_{\text{кат}} = 0,55/0,8$  мм:  
 а –  $U = 5$  В;  $P = 0,3$  МПа;  $t = 5$  мин; б –  $U = 20$  В;  $P = 0,3$  МПа;  $t = 10$  мин; в –  $U = 5$  В;  $P = 0,55$  МПа;  $t = 5$  мин;  
 г –  $U = 20$  В;  $P = 0,55$  МПа;  $t = 5$  мин; д –  $U = 5$  В;  $P = 0,8$  МПа;  $t = 5$  мин; е –  $U = 20$  В;  $P = 0,8$  МПа;  $t = 5$  мин

## Выводы

Анализ полученных результатов позволил определить технологические возможности прошивки отверстий при использовании ЭХО неподвижным катодом-инструментом. Установлено, что плотности тока, реализуемые в обработке, составляющие в первоначальный момент обработки от 5 до 20 А/см<sup>2</sup> в зависимости от напряжения снижаются по мере формирования отверстия до 1,5...2,5 А/см<sup>2</sup> (при  $U = 5$  В) и до 6...7 А/см<sup>2</sup> (при  $U = 20$  В). Снижение плотности тока по мере углубления отверстия не позволяет поддерживать постоянной скорость обработки.

ЭХО по схеме стационарного катода-инструмента приводит к значительной потере точности получаемого отверстия за счет формирования конусности. Для устранения данного недостатка необходимо осуществлять стабилизацию межэлектродного зазора, используя так называемую схему нестационарного катода-инструмента [1]. Это позволит не только повысить точность прошивки, но и увеличить в определенной степени производительность процесса. Для дальнейшего совершенствования технологии ЭХО-отверстия в части повышения производительности потребуется поиск путей увеличения плотностей тока за счет ее комбинирования с другими электрофизическими процессами.

## Список литературы

1. Мороз И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.
2. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: fundamentals of electrochemical shaping // Russian Journal of Electrochemistry. – 2004. – Vol. 40, iss. 12. – P. 1230–1265. – doi: 10.1007/s11175-005-0002-6.
3. Митрюшин Е.А., Саушкин С.Б., Саушкин Б.П. Пути развития и перспективы применения технологий электрохимической размерной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 12. – С. 40–45.
4. Высокоскоростное анодное растворение жаропрочных хромоникелевых сплавов, содержащих вольфрам и рений. 1. Хлоридные растворы / А.И. Дикусар, Б.П. Саушкин, И.А. Иваненков, С.А. Силкин, С.П. Ющенко // Электронная обработка материалов. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 4–15.
5. Lohrengel M.M. Pulsed electrochemical machining of iron in NaNO<sub>3</sub>: fundamentals and new aspects // Materials and Manufacturing Processes. – 2005. – Vol. 20, iss. 1. – P. 1–8.
6. Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micro-machining // Russian Journal of Electrochemistry. – 2008. – Vol. 44, N 8. – P. 926–930. – doi: 10.1134/S1023193508080077.
7. Электрохимическая размерная обработка сложнопрофильных отверстий малой глубины в де-

талях из хромоникелевых сплавов в хлоридных растворах / И.В. Яковец, В.Г. Звонкий, В.В. Коблов, А.И. Дикусар // Металлообработка. – 2006. – № 2. – С. 22–25.

8. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов НГТУ. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.

9. Кабанов Б.Н., Давыдов А.Д., Кащеев В.Д. О взаимосвязи между особенностями анодного растворения металлов и точностью электрохимической размерной обработки // Размерная электрохимическая обработка деталей машин: материалы IV всесоюзной конференции. – Тула, 1975. – Ч. 1: Основы теории процесса. – С. 10–14.

10. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4. – С. 22–26.

11. Амирханова Н.А., Галиев В.Э., Устюжанина С.В. Особенности высокоскоростного растворения железохромоникелевого сплава ХН35ВТЮ применительно к электрохимической обработке // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 5 (50). – С. 132–136.

12. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, М.И. Никитенко, А.Н. Моисеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 3–5.

13. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Особенности анодного растворения спла-

ва ЖС 6 в условиях электроалмазной обработки // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева и др.; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2015. – С. 131–135.

14. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 58–65. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65.

15. Burov V.G., Yanpolskiy V.V., Rakhimyanov K. Kh. Technological aspects of forming the surface microrelief of low-wear coatings after electro-diamond grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126, N 1. – P. 012018. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012018.

16. Вевецева 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, 2011. – С. 9–10.

17. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). – Л.: Машиностроение, 1977. – 152 с.

18. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.

## OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 12–20

### Technological capabilities of the holes electrochemical machining using fixed cathode-tool

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kharis51@mail.ru

Vasilevskaya S.I., Ph.D. student, e-mail: Svetlana.vasilevskaya.87@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

#### Abstract

The technological possibilities of electrochemical dimensional machining of copper using fixed cathode-instrument are considered. The cathode is hollow to supply the electrolyte into the processing area. It is proposed to use the scheme with a horizontal position of the cathode, which permitted to use the electrolyte stream as the forming tool. The dependence of the needled depth change in time that indicates a decrease in processing speed with increasing electrode gap is obtained. This fact is confirmed by decrease in current density during processing, and can be explained by the increase in the ohmic resistance of electrolyte flow with the increase of the electrode gap. It is

found that increasing technological voltage on the electrodes leads to the increase of treatment depth and the diameter of the inlet hole. Changing the overpressure of the jet from 0.3 to 0.8 MPa had no significant influence on processing productivity and on the regularities of the hole formation. It is shown that the increase in diameter of the cathode-tool is accompanied by a growth in both the depth of processing and the diameter of the inlet hole. The possibilities for further improvement of the electrochemical machining of a small-diameter holes to increase the productivity of the process and improve the accuracy parameters. Electrochemical machining scheme with fixed cathode-tool results in a significant loss of accuracy of the hole by cone forming. To eliminate this disadvantage it is necessary to stabilize the electrode gap using a so-called scheme of non-stationary cathode-tool. It allows us to improve the accuracy of the needling and also to increase to some extent the productivity of the process. Further improving of Electrochemical machining of holes in terms of increasing productivity requires finding ways to current density increasing by combining with other electro-physical processes.

### Keywords

electrochemical machining, anode, cathode-tool, anodic dissolution, electrolyte, current density

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20

### References

1. Moroz I.I. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 279 p.
2. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: fundamentals of electrochemical shaping. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004. vol. 40, iss. 12, pp. 1230–1265. doi: 10.1007/s11175-005-0002-6
3. Mitryushin E.A., Saushkin S.B., Saushkin B.P. Puti razvitiya i perspektivy primeneniya tekhnologii elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki [Ways of development and prospects of application electrochemical dimensional processing technologies]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening technologies and coatings*, 2009, no. 12, pp. 40–45.
4. Dikusar A.I., Ivanenkov I.A., Saushkin B.P., Silkin S.A., Yushchenko S.P. Vysokoskorostnoe anodnoe rastvorenie zharoprochnykh khromonikelevykh splavov, sodержashchikh vol'fram i renii. 1. Khlordnye rastvory [High-speed anode dissolution of heat-resistant chrome-nickel alloys containing tungsten and rhenium. 1. Chloride solutions]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 4–15. (In Russian)
5. Lohrengel M.M. Pulsed electrochemical machining of iron in  $\text{NaNO}_3$ : fundamentals and new aspects. *Materials and Manufacturing Processes*, 2005, vol. 20, iss. 1. pp. 1–8. doi: 10.1081/AMP-200041591
6. Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micro-machining. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2008, vol. 44, iss. 8, pp. 926–930. doi: 10.1134/S1023193508080077
7. Jakovets I.V., Zvonkyj V.G., Koblov V.V., Dikusar A.I. Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka slozhnoprofil'nykh otverstii maloi glubiny v detalyakh iz khromonikelevykh splavov v khlordnykh rastvorakh [Electrochemical dimensional processing (ECDP) of complicated-profile apertures of small depth in details from chromel alloys in chloride solutions]. *Metalloobrabotka – Metal processing*, 2006, no. 2, pp. 22–25.
8. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolsky V.V. Anodnoe rastvorenie bystrorezhushchei stali R6M5 i ee sostavlyayushchikh v vodnykh rastvorakh [Anode dissolution of high-speed steel R6M5 and its components in water solutions]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 4 (34), pp. 141–147.
9. Kabanov B.N., Davydov A.D., Kashcheev V.D. [On the relationship between the characteristics of the anodic dissolution of metals and precision electrochemical machining]. *Materialy IV vsesoyuznoi konferentsii “Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin”. Ch. I. Osnovy teorii protsessa* [Proceedings of the IV All-Union Conference “Dimensional Electrochemical Machining of Machine Parts”. Pt. 1. Basic Theory of the Process]. Tula, 1975, pp. 10–14. (In Russian)
10. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolsky V.V., Moiseenko A.N. Razmernaya obrabotka detalei s pokrytiami iz nanostrukturirovannykh poroshkovykh materialov [Dimensional processing of details with coverings from nano powder materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4, pp. 22–26.
11. Amirkhanova N.A., Galiyev V.E., Ustyuzhanina S.V. Osobennosti vysokoskorostnogo rastvoreniya zhelezokhromonikelevogo splava  $\text{KhN}35\text{VTYu}$  primenitel'no k elektrokhimicheskoi obrabotke [Features of high-speed dis-



solution of iron–chromium–nickel alloy XH35BTIO at electrochemical machining]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2012, vol. 16, no. 5 (50), pp. 132–136.

12. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V., Nikitenko M.I., Moiseenko A.N. Elektrokhimicheskoe rastvorenie pokrytii iz poroshkovykh materialov [Electrochemical dissolution of coatings from powder materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 2, pp. 3–5.

13. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. [Features of anode dissolution of the alloy of ЖС 6 in the conditions of electrodiamond processing]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash–2015): VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik trudov [Innovations in mechanical engineering: VII International scientific and practical conference: Materials]*. Kemerovo, 2015, pp. 131–135. (In Russian)

14. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. Stepen' lokalizatsii protsessa pri intensivatsii odnogo rastvoreniya medi [The degree of the process localization at the intensification of anodic dissolution of copper]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 3 (68), pp. 58–65. doi: 10.17212/1994-6309-2015-3-58-65

15. Burov V.G., Yanpolskiy V.V., Rakhimyanov K.Kh. Technological aspects of forming the surface microrelief of low-wear coatings after electro-diamond grinding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, no. 1, p. 012018. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012018

16. Venevtseva S.N., Belousov I.A. [Mikroelektrokhimicheskaya processing materials using nanosecond pulse voltage technology]. *Sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennaya elektrotekhnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)" [Proceedings of the scientific-technical conference "Modern electro-technology industry in Russia (youth innovation)"]*, Tula, 7 October 2011, pp. 9–10. (In Russian)

17. Levinson E.M. *Otverstiya malykh razmerov (metody polucheniya) [Small size holes (production methods)]*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 152 p.

18. Freiman L.I., Makarov V.A., Bryskin I.E. *Potentsiostaticheskie metody v korrozionnykh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoi zashchite [Potentiostatic methods in studies of corrosion and electrochemical protection]*. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 240 p.

#### Article history:

Received 4 March 2016

Revised 5 April 2016

Accepted 15 May 2016