

УДК 621.9.047  
DOI: 10.12737/21422

**Х.М. Рахимьянов**, д.т.н.,  
**И.А. Леонтьев**, инженер,  
**С.И. Василевская**, аспирант  
(Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20)  
E-mail: kharis51@mail.ru; leontev@corp.nstu.ru

## **Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра**

*Показаны перспективы совмещения процессов электрохимического растворения и электроэрозионного удаления обрабатываемого материала при прошивке отверстий малого диаметра. Представлена схема формирования высоковольтных импульсов для управления параметрами комбинированной обработки. Показано, что введение электроэрозионной составляющей в процесс обработки позволило увеличить скорость прошивки отверстия более чем в 10 раз. Установлены ограничения в обеспечении точности формируемого отверстия, связанные с нестабильностью величины межэлектродного зазора.*

**Ключевые слова:** электрохимический процесс; электроэрозионный процесс; микрообработка; комбинированная обработка; анод; катод-инструмент; межэлектродный зазор.

**Kh. M. Rakhimyanov**, D.Eng.,  
**I.A. Leontiev**, Engineer,  
**S.I. Vasilevskaya**, Post graduate student  
(Novosibirsk State technical University,  
20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073)

## **Technological prospects in combination of electro-erosion and electro-chemical processes in pinholes working**

*The prospects are shown in the combination of the processes of electro-chemical dilution and electro-erosion removal of material worked at pinholes broaching with a fixed cathode-tool. The procedure of high-voltage pulses formation for the parameter control of integrated working is presented. The source ensuring the formation of high-voltage pulses with voltage up to 400 V, duration of 4 mcs and a period from 12 to 50mcs is developed. The experimental plant has been developed for the integrated electro-erosion and electro-chemical broaching of pinholes at electrolyte supply under pressure through a fixed cathode-tool. It is shown that the introduction of an electro-erosion constituent in the course of working increased a broaching rate more than 10 times. The creation of channels of discharge on a gas-vapor jacket in a spark gap allows realizing current densities from 50...100 a/cm<sup>2</sup> at the primary moment and up to 10...15 a/cm<sup>2</sup> by the end of working. The limitations were established to ensure the accuracy of a hole formed and connected with the instability of the value of a spark gap. There is offered a way to increase a hole accuracy at the expense of the use of the working procedure with the stabilization of the value of a spark gap.*

**Keywords:** electro-chemical process; electro-erosion process; microprocessing; combined working; anode; cathode-tool; spark gap.

В современном приборо- и машиностроении актуальным является решение задач по созданию средств технического и технологи-

ческого оснащения для изготовления деталей, геометрические размеры обрабатываемых поверхностей которых составляют доли милли-

метра. Подобные объекты получили название микроизделий, а процесс их изготовления – микрообработки [1].

В основу микрообработки зачастую заложены электрофизические технологии, поскольку, использование традиционных методов механической обработки в данном случае либо невозможно, либо связано с определенными трудозатратами [2].

Значительные успехи в микрообработке связаны с использованием электрохимической размерной обработки (ЭХРО), основанной на анодном растворении токопроводящих материалов [3]. Несмотря на достигнутые результаты в ЭХРО подобного рода изделий, существуют определенные ограничения, связанные, в первую очередь, с невысокой производительностью процесса.

В работе [4] представлены технологические возможности электрохимической обработки отверстий малого диаметра (менее 1 мм) неподвижным катодом-инструментом с прокачкой электролита через него. Авторами установлено, что при использовании струйной подачи электролита в межэлектродный зазор, когда струя, по сути, является формообразующим инструментом, наиболее эффективной представляется технологическая схема обработки с горизонтальным расположением катода-инструмента.

Выявленные закономерности формообразования отверстия свидетельствуют о снижении производительности по мере увеличения его глубины. В процессе обработки наблюдается постепенное уменьшение плотности тока, что объясняется ростом омического сопротивления столба электролита по мере увеличения межэлектродного зазора. Данный факт является характерным для ЭХРО с неподвижным катодом-инструментом.

Повышение достигнутого уровня плотности тока для увеличения производительности в рамках, действующих при ЭХРО электродных процессов, не представляется возможным. Решение задачи интенсификации анодного растворения в настоящее время осуществляется при использовании ряда способов, основными из которых являются: тепловой, гидравлический, лазерный [5, 6].

Интенсификация ЭХРО при использовании отмеченных способов реализуется за счет определенных механизмов активации анодного растворения обрабатываемого материала, а порой, и их совокупности. Повышение производительности обработки также возможно при введении дополнительных к электрохимиче-

скому растворению процессов удаления материала. Так электроалмазная обработка представляет собой комбинирование процессов анодного растворения материала и механического резания [7].

В настоящей работе изучаются возможности комбинирования электрохимических и электроэрозионных процессов при обработке отверстий малого диаметра в меди неподвижным катодом-инструментом в условиях струйной подачи электролита в межэлектродный зазор.

Не смотря на разную природу комбинируемых процессов – анодного растворения обрабатываемого материала в токопроводящей среде (электролите) и удаления материала за счет энергии электроэрозионных разрядов, при пробое диэлектрической среды существует возможность их объединения в одной обработке. Это обусловлено кинетикой развития электродных процессов при ЭХРО, связанной с тем, что в процессе электролиза межэлектродный зазор заполняется газообразными продуктами реакций, увеличивающих его омическое сопротивление.

Образование в межэлектродном зазоре парогазовой оболочки препятствует анодному растворению обрабатываемого материала. Электрический пробой парогазовой оболочки для организации канала проводимости требует приложения импульсного напряжения. Таким образом, если к электродам электрохимической ячейки помимо низковольтного постоянного напряжения приложить высоковольтное импульсное напряжение, достаточное для пробоя парогазовой оболочки в межэлектродном зазоре, в последнем реализуются два процесса – анодное растворение с образованием парогазовой оболочки и ее электрический пробой с формированием канала проводимости.

Возможна схема обработки, исключаящая постоянное напряжение на электродах. В этом случае начальная фаза высоковольтного импульса, когда увеличение напряжения сопровождается ростом тока в соответствии с законом Ома, определяет развитие стадии электрохимического процесса.

По мере заполнения межэлектродного зазора газообразными продуктами реакций с увеличением его омического сопротивления происходит замедление анодного растворения. При достижении значения напряжения в импульсе, при котором происходит пробой газобразной среды (ее ионизация), что обеспечивает формирование устойчивого канала разря-

да в толще электролита от катода до анода. Последнее характеризует действие второй стадии в обработке – электроэрозионной.

Для экспериментальной реализации комбинированной обработки был разработан источник высоковольтных импульсов, представленный на рис. 1. Источник содержит высоковольтную часть, включающую трансформатор Тр1–ЛАТР, разделительный повышающий

(220v/380v) трансформатор ТР2, мостовой выпрямитель VD1 с фильтрующим конденсатором C1, ограничительное сопротивление R1, накопительно-разрядный конденсатор C2, тиристор VD2, а также задающий генератор открывающих тиристор импульсов – G1. Трансформатор Тр2 обеспечивает гальваническую развязку сетевого напряжения и нагрузки.

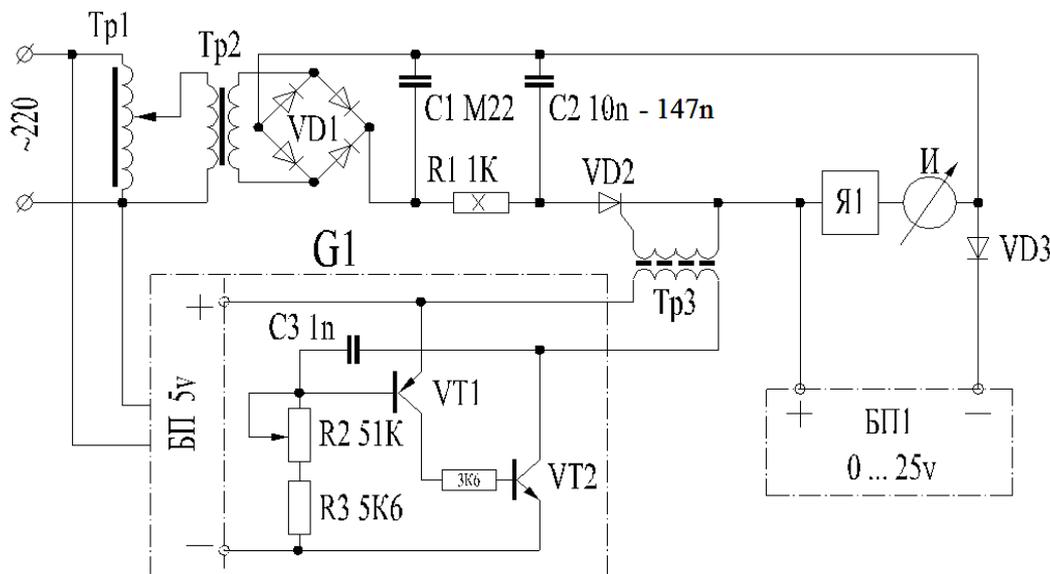


Рис. 1. Источник высоковольтных импульсов

Высоковольтные импульсы на нагрузку – электрохимическую ячейку «Я1» подаются с накопительно-разрядного конденсатора C2 через тиристор VD2 при открытии его короткими импульсами задающего генератора G1 через импульсный трансформатор Тр3.

Также на ячейку подается постоянное напряжение с регулируемого источника технологического тока БП1 с защитным диодом VD3.

Задающий генератор G1 выполнен по схеме релаксационного генератора на аналоге однопереходного транзистора. Последний выполнен на высокочастотных транзисторах разной проводимости VT1 – КТ361 и VT2 – КТ904. Нагрузкой генератора служит импульсный трансформатор Тр3, через который подаются открывающие импульсы на тиристор VD2. Питание задающего генератора осуществляется от стабилизированного пятивольтового блока питания БП5v.

Параметры высоковольтных импульсов, подаваемых на электрохимическую ячейку, определяются как высоковольтной частью источника, так и задающим генератором. Задающим генератором устанавливается длина

управляющих импульсов и период их следования. Длина управляющих импульсов определяется емкостью конденсатора C3 задающего генератора, а период – переменным сопротивлением R2 (сопротивление R3 – ограничительное). При подаче напряжения на задающий генератор начинает заряжаться конденсатор C3 через сопротивления R2 и R3. При достижении напряжения на конденсаторе равного напряжению пробоя однопереходного транзистора, последний лавинообразно открывается и в трансформаторе Тр3 формируется короткий импульс, определяемый длительностью разряда конденсатора C3, который через импульсный трансформатор Тр3 передается на управляющий электрод тиристора VD2.

Высокочастотная часть источника определяет мощность подаваемых на ячейку импульсов, которая зависит от величины подаваемого на накопительно-разрядный конденсатор C2 напряжения (задается с помощью ЛАТРа и от величины емкости конденсатора C2). При подаче напряжения на накопительно-разрядный конденсатор C2 он заряжается, а при открытии тиристора VD2 импульсом задающего генератора конденсатор разряжается на элек-

трохимическую ячейку. Ток в ячейке измеряется миллиамперметром И.

При выбранном значении емкости конденсатора С3 равной 1 нФ длительность управляющих импульсов ( $t_{\text{и}}$ ) составляет 4 мкс, а сопротивлением R2 период повторения (Т) регулируется в диапазоне от 12 до 50 мкс.

Высокое напряжение на конденсаторе С1 для зарядки накопительно-разрядного конденсатора С2 при выбранном трансформаторе Tr2 (220v/380v) может достигать 530 В, но не должно быть более 85...90 % рабочего напряжения конденсаторов С1 и С2.

Форма высоковольтных импульсов на нагрузке (электрохимической ячейке «Я1») зависит от величины напряжения на конденсаторе С2 и его емкости (рис. 2).

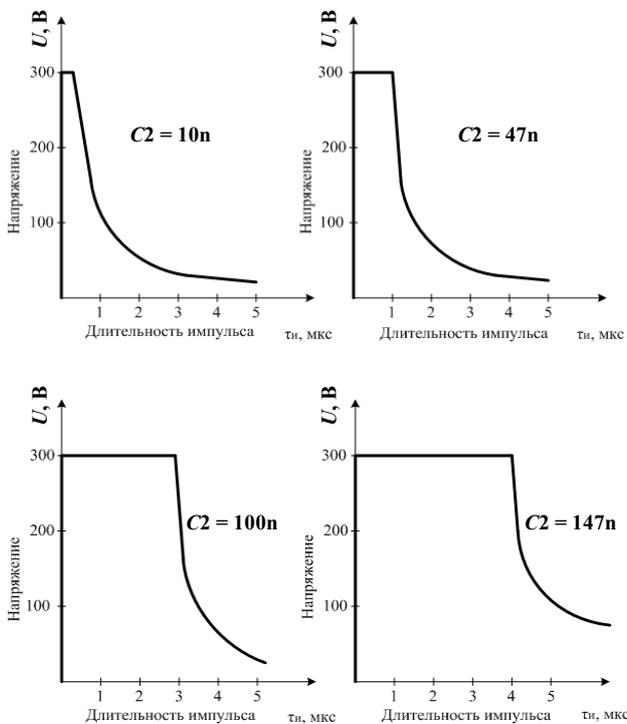


Рис. 2. Форма высоковольтных импульсов при различных значениях емкости накопительно-разрядного конденсатора С2

На рис. 3, 4 представлены структурная схема и внешний вид экспериментальной установки для комбинированной обработки отверстий малого диаметра. Фотография электродной системы электрохимической ячейки показана на рис. 5.

Обработка осуществляется в электрохимической ячейке 6, в которой установлен образец 2 для прошивки в нем отверстия, закрепленный в эбонитовой оправке 1. Полый электрод-инструмент 3 установлен в электрохими-

ческой ячейке с возможностью регулировки межэлектродного зазора  $\Delta$ . Подача электролита в зону обработки осуществляется через полый электрод-инструмент 3 с помощью шарбаллона 4. Давление электролита регулируется компрессором 5. Излишки электролита из электрохимической ячейки 6 сливаются в бак 7.

Обрабатываемый образец 2 и электрод-инструмент 3, являющиеся анодом и катодом, соответственно, подсоединяются к источникам высоковольтных импульсов 8 и технологического тока 9. Контроль процесса осуществляется с помощью миллиамперметра 10 и осциллографа 11.

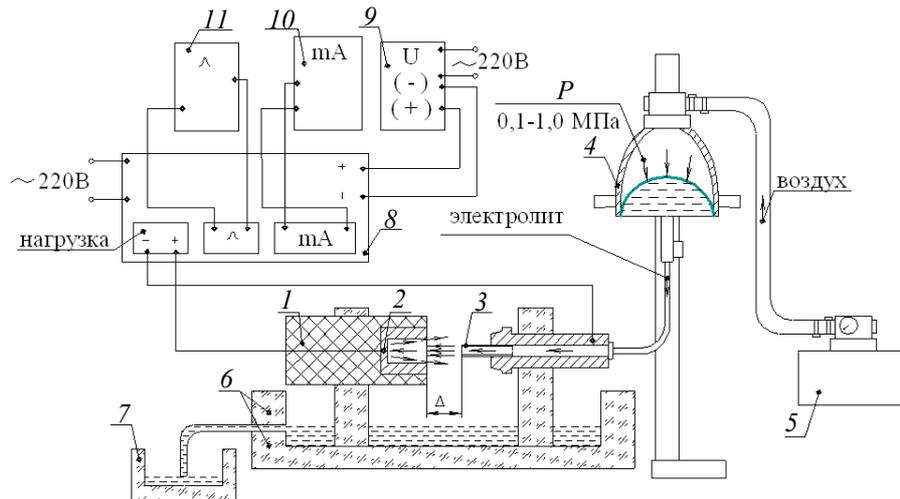
Экспериментальные исследования по прошивке отверстий проводились на образцах, выполненных из меди марки М1 (ГОСТ 859–2001). В качестве электролита использовался 5 %-ный водный раствор NaCl, выбор которого обоснован по результатам предварительных экспериментов [8, 9]. Результаты экспериментальных исследований по прошивке отверстий в меди полым электродом-инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров  $\Phi_{\text{кат}} = 0,26...0,46$  мм представлены на рис. 6.

Полученные результаты свидетельствуют об относительно равномерном увеличении глубины прошивки от времени обработки в исследованном диапазоне. Можно отметить влияние на производительность как параметров электрохимического процесса ( $U_{\text{техн}}$ ), так и электроэрозионного ( $U_{\text{имп}}$ ).

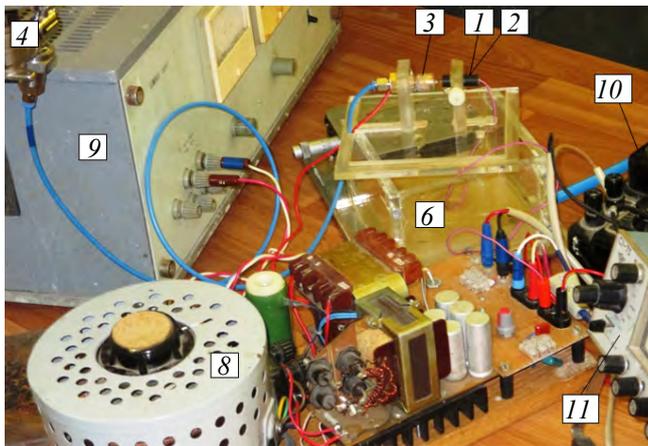
На рис. 7 представлены фотографии входных отверстий и поперечных сечений образцов, полученных при различных энергетических параметрах комбинированной обработки.

Как и при электрохимической прошивке [4] наблюдается появление конусности и расширение отверстия на входе с увеличением глубины, что является характерным для обработки неподвижным электродом-инструментом.

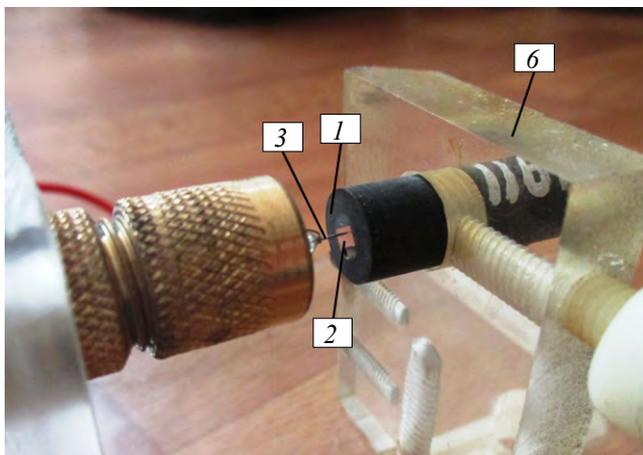
Для описания размеченного графа сравнение полученных результатов по комбинированной обработке отверстий малого диаметра с данными по размерной электрохимической обработке [4, 10] при одних и тех же условиях (обрабатываемый материал, состав электролита, давление струи, размеры электрода-инструмента, величина межэлектродного зазора, технологические режимы электрохимического процесса) свидетельствует о том, что совмещение электрохимического и электроэрозионного процессов в одной обработке обеспечивает повышение производительности больше чем на порядок.



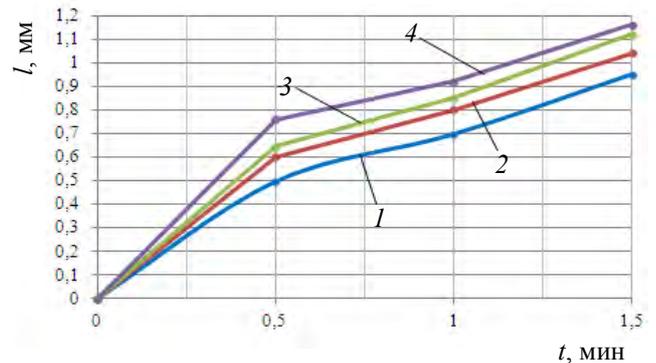
**Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки для комбинированной прошивки малых отверстий:** 1 – оправка; 2 – образец-анод; 3 – инструмент-катод; 4 – шар-баллон; 5 – компрессор; 6 – электрохимическая ячейка; 7 – сливной бак; 8 – источник высоковольтных импульсов; 9 – источник технологического тока; 10 – миллиамперметр; 11 – осциллограф



**Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки для комбинированной прошивки малых отверстий (компрессор 5 и сливной бак 7 на фотографии не показаны)**



**Рис. 5. Фотография электродной системы электрохимической ячейки для прошивки отверстий**



**Рис. 6. Зависимость глубины прошивки отверстия от времени обработки**

( $P = 0,3$  МПа;  $\tau_{\text{и}} = 4$  мкс;  $T = 27,5$  мкс):

1 –  $U_{\text{техн}} = 5$  В;  $U_{\text{имп}} = 300$  В; 2 –  $U_{\text{техн}} = 5$  В;

$U_{\text{имп}} = 400$  В; 3 –  $U_{\text{техн}} = 20$  В;  $U_{\text{имп}} = 300$  В;

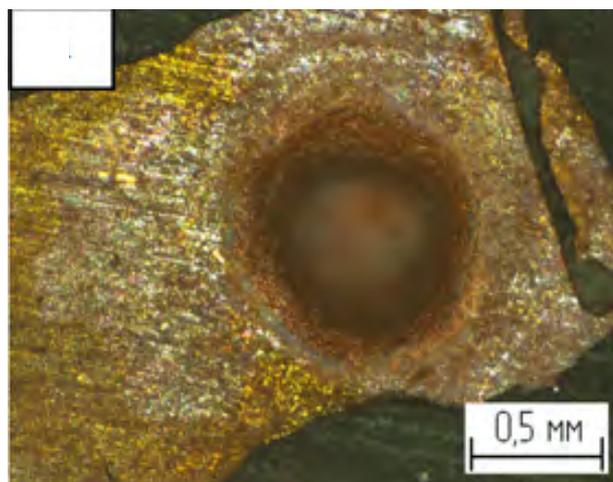
4 –  $U_{\text{техн}} = 20$  В;  $U_{\text{имп}} = 400$  В

Если на электрохимическую прошивку отверстия на глубину 0,4 мм при напряжении  $U_{\text{техн}} = 5$  В необходимо затратить 10 мин, то введение в обработку электроэрозионной составляющей обеспечило прошивку отверстия на глубину от 0,6 до 0,76 мм за 30 с.

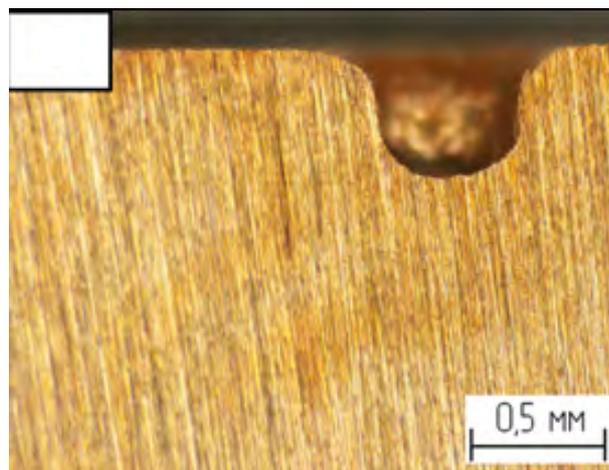
Скорость любого электрофизического процесса обработки материалов в основном определяется значением плотности мощности, реализуемой в зоне обработки. Если при электрохимической прошивке неподвижным катодом-инструментом в межэлектродном зазоре первоначальное значение плотности тока составляло  $5 \dots 15$  А/см<sup>2</sup>, которое по мере увеличения глубины обработки снижалось до  $2 \dots 3$  А/см<sup>2</sup>,

то комбинирование электрохимического растворения с электроэрозионным разрушением материала позволило увеличить параметры

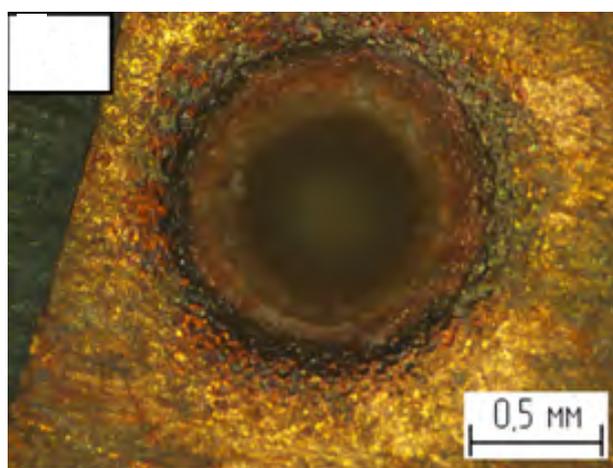
процесса до  $50...100 \text{ А/см}^2$  на начальной стадии, до  $10...15 \text{ А/см}^2$  при достижении глубины обработки  $0,5...1,2 \text{ мм}$ .



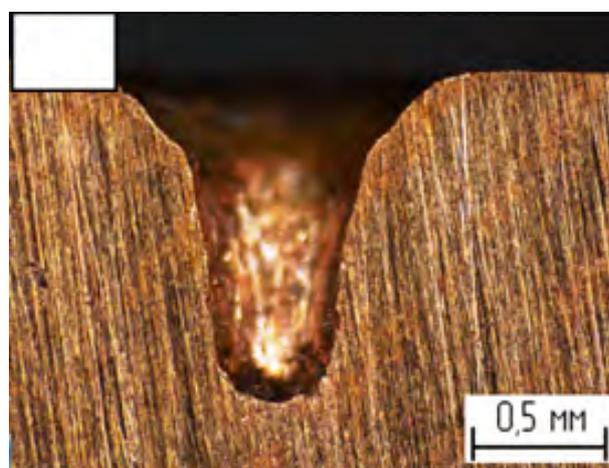
а)



б)



в)



г)

**Рис. 7. Вид входного отверстия (а, в) и поперечного сечения образца (б, г):**

а, б –  $U_{\text{техн}} = 5 \text{ В}$ ;  $U_{\text{имп}} = 300$ ;  $t = 0,5 \text{ мин}$ ;

в, г –  $U_{\text{техн}} = 20 \text{ В}$ ;  $U_{\text{имп}} = 400 \text{ В}$ ;  $t = 1,5 \text{ мин}$

### Выводы

Введение высоковольтных импульсов амплитудой  $300...400 \text{ В}$ , длительностью до  $4 \text{ мкс}$  и периодом их следования до  $27,5 \text{ мкс}$  при электрохимическом растворении меди позволило реализовать в межэлектродном зазоре комбинацию электрохимических и электроэрозионных процессов.

Создание каналов разряда на парогазовой оболочке в межэлектродном зазоре позволило реализовать плотности тока от  $50...100 \text{ А/см}^2$  в первоначальный момент и до  $10...15 \text{ А/см}^2$  в конце обработки, что привело к увеличению скорости процесса прошивки отверстий до 10 раз и более.

Снижение плотности тока и замедление

скорости обработки по мере увеличения глубины прошивки связано с ростом величины межэлектродного зазора при использовании схемы обработки с неподвижным катодом–инструментом. Искажение геометрии на входе отверстия также вызвано нестабильностью величины межэлектродного зазора. Повышение точности формообразования требует введения в схему обработки системы стабилизации межэлектродного зазора.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веневцева, С.Н., Белоусов, И.А. Микроэлектрохимическая обработка материалов с применением наносекундных импульсов технологического напряжения // Со-

временная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации); сб. трудов науч.- техн. конф. Тула, 7 октября 2011 г. – Тула: ТулГУ, 2011. С. 9 – 10.

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

3. Мороз, И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.

4. Рахимьянов, 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.

5. Рахимьянов, Х.М., Журавлев, А.И., Гаа, Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2. – С. 135–144.

6. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) / IFOST. Novosibirsk – Tomsk, Russia, June 23 – 29: Proceedings of the third international forum on strategic technologies. Novosibirsk. NSTU – 2008. P. 106–107.

7. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Рахимьянов, К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 32–33.

8. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Василевская, С.И. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: матер. VI междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.

9. 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.

10. Смоленцев, В.П., Шаров, Ю.В., Коптев, И.Т. Многоэлектродная обработка каналов в фильтрах тепловых двигателей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №8(50). – С. 22–27.

technological voltage // *Modern Electro-Technology in Industry of Russia (youth innovations): Proceedings of the Scientific-Eng. Conf., Tula, October7, 2011* – Tula: TulSU, 2011. pp. 9 – 10.

2. Levinson, E.M. *Pinholes (Manufacturing methods)*. – L.: Mechanical Engineering, 1977. – pp.152.

3. Moroz, I.I. *Electrochemical Dimensions Working of Metals*. – М.: “Mechanical Engineering”, 2009. – pp. 279.

4. Rakhimyanov, H.M., Vasilevskaya, S.I. Technological potentialities of pinholes electrochemical working with fixed cathode-tool // *Metal Working (Techniques, Equipment, Toolware)*. – 2016. – № 2. – pp. 12–20. – Doi:10.17212/1994 – 6309–2016–2–12–20.

5. Rakhimyanov, H.M., Zhuravlyov, A.I., Gaar, N.P. Plant for researches of electrochemical processes under conditions of laser activation of electrochemical dimensions working // *Scientific Bulletin of NSTU*. – 2010. – № 2. – pp. 135–144.

6. Rakhimyanov H.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) / IFOST. Novosibirsk – Tomsk, Russia, June 23 – 29: Proceedings of the third international forum on strategic technologies. Novosibirsk. NSTU – 2008. P. 106–107.

7. Rakhimyanov, H.M., Krasilnikov, B.A., Rakhimyanov, K.H. Shaping accuracy at electro-diamond grooving in amorphous and nano-crystalline alloys // *Metal Working (Techniques, Equipment, Toolware)*. – 2006. – № 2. – pp. 32–33.

8. Rakhimyanov, H.M., Krasilnikov, B.A., Vasilevskaya, S.I. Investigations of electrolytes ensuring accuracy of electrochemical working of M1 copper // *Innovations in Mechanical Engineering - Basis of Russia Technological Development: Proceedings of the VI-th Inter. Scientific-Tech. Conf. – Barnaul, 2014*. – Part. 2. – pp. 100–104.

9. Rakhimyanov, H.M., Krasilnikov, B.A., Vasilevskaya, S.I. Degree of process localization at intensification of copper anode dilution // *Metal Working (Techniques, Equipment, Toolware)*. – 2015. – № 3 (68). – pp. 58–65. – Doi: 10.17212/1994 – 6309 –2015–3–58 –65.

10. Smolentsev, V.P., Sharov, Yu.V., Koptev, I.T. Multi-electrode working of channels in filters of warm engines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №8(50). – pp. 22–27.

## REFERENCES

1. Venevtsova, S.N., Belousov, I.A. Microelectro-chemical processing of materials with use of nano-second pulses of

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев