

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ В МЕДИ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ВОДНЫХ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРАХ

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

Поступила 6 марта 2017  
Рецензирование 10 апреля 2017  
Принята к печати 10 мая 2017

**Рахимьянов Х.М.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: x.rahimyanov@corp.nstu.ru

Рассмотрены вопросы назначения величины межэлектродного промежутка (МЭП) при электрохимической размерной обработке (ЭХРО) отверстий малого диаметра в хлоридных растворах обработки меди полым катодом – инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметра 0,26 / 0,46 мм. Установлено, что при прошивке отверстий на малых межэлектродных промежутках (0,05...0,1 мм) с давлением струи электролита  $P = 0,3$  МПа не обеспечивается точность копирования инструмента. Это объясняется тем, что ЭХРО меди в хлоридных растворах сопровождается образованием на поверхности труднорастворимой соли  $\text{CuCl}$ , препятствующей электрохимическому растворению металла под торцом катода-инструмента. Точность копирования инструмента на обрабатываемой поверхности достигается при увеличении МЭП до 0,2 мм. Однако увеличение МЭП приводит к снижению локализации процесса анодного растворения и, следовательно, к уменьшению скорости прошивки отверстия. Показано, что повышение давления струи электролита до 0,8 МПа при величине МЭП от 0,05 до 0,1 мм гарантирует точность формообразования отверстия. Отмечено, что повышение давления струи электролита интенсифицирует процесс депассивации анодной поверхности, что обеспечивает возможность обработки при малом значении МЭП с высокой степенью локализации процесса. Установлено, что при величинах МЭП, равных 0,3 мм при  $P = 0,3$  МПа и 0,1 мм при  $P = 0,8$  МПа, возможна реализация схемы электрохимической прошивки с непрерывной стабилизацией МЭП за счет перемещения одного из электродов.

**Ключевые слова:** электрохимическая размерная обработка, катод-инструмент, анодное растворение, электролит, межэлектродный промежуток, струя электролита, труднорастворимая соль, депассивация, механизм формообразования отверстий.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-6-16

## Введение

В настоящее время наблюдается тенденция по внедрению электрофизических методов обработки в технологические процессы производства в различных отраслях промышленности. Это связано со значительным ростом потребления высокопрочных материалов, обработка ко-

торых с использованием традиционных методов резанием затруднена, а порой и невозможна. При этом растет количество технологических задач, связанных с обработкой сложнопрофильных деталей, формообразованием различного рода полостей, решение которых невозможно без использования электрофизических технологий. К таким задачам следует отнести и микрообра-

ботку, когда размеры обрабатываемых поверхностей составляют доли миллиметра [1–7]. В этой области значительный объем работ связан с формообразованием полостей и отверстий как сквозных, так и глухих, в том числе и глубоких, когда длина отверстия многократно превышает его диаметр. Для решения этих задач широко используется ЭХРО, реализуемая по различным технологическим схемам [8–11]. Механизмы электрохимического растворения различных классов материалов от легированных до порошковых и твердосплавных подробно рассмотрены в работах [12–15]. Дальнейшее развитие электрохимических технологий связано с поиском путей интенсификации процесса [16, 17] и повышения точности обработки [18].

Для обработки отверстий и полостей наибольшее распространение получила электрохимическая прошивка полым катодом-инструментом с подачей электролита через центральное отверстие [19–22]. Практика электрохимической обработки глухих отверстий полым катодом-инструментом свидетельствует об образовании на дне отверстия характерного выступа, размеры которого зависят от диаметра отверстия ( $d_{\text{отв}}$ ) в катод, через которое подается электролит в зону обработки (рис. 1). Так при  $d_{\text{отв}} = 3$  мм высота выступа составляет  $t = 0,1 \dots 0,2$  мм, которая возрастает до  $t = 6 \dots 7$  мм при увеличении центрального отверстия до 30 мм [19].

Образование выступа на дне отверстия связано с замедлением процесса растворения обрабатываемого материала по мере удаления от внутренней стенки катода к его центру. Наиболее

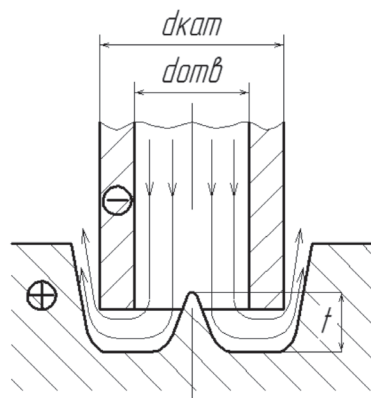


Рис. 1. Схема формирования выступа на дне отверстия при ЭХРО полым катодом-инструментом

интенсивное растворение наблюдается на участках торцевой поверхности катода, так как значение МЭП здесь минимально и, как правило, составляет десятые доли миллиметра, в то время как расстояние от внутренней стенки катода при минимальном значении диаметра отверстия, равном 2...3 мм, варьируется в диапазоне 1,0...1,5 мм. Эта разница в значении межэлектродного промежутка на различных участках обрабатываемого отверстия и объясняет наличие градиента в скорости анодного растворения в зоне обработки и соответствующее формообразование отверстия. Снижение высоты выступа обеспечивается уменьшением диаметра отверстия до 2...3 мм, но при этом возникает опасность нарушения нормального течения электролита в МЭП при соотношении  $d_{\text{кат}} / d_{\text{отв}} > 3$ . В этом случае на отдельных участках МЭП возникают разрывы потока электролита, что приводит к возникновению так называемых «сухих зон». На данных участках электрохимическое растворение металла существенно замедляется, что приводит к образованию неровностей, при соприкосновении катода-инструмента с которыми возникают токи короткого замыкания и происходит нарушение процесса обработки. В связи с этим в технологическом процессе получения глухих отверстий необходимо введение дополнительной операции механического удаления образующегося при ЭХРО выступа.

Данный механизм формообразования отверстий авторами [19] рассматривается для условий ЭХРО, когда диаметр отверстия в катод-инструменте на порядок превышает величину МЭП, что и определяет образование характерного выступа на дне отверстия. Обработка малых отверстий с диаметром до 1,0 мм предполагает, что диаметр отверстия для подачи электролита в катод-инструменте будет сопоставим с величиной МЭП. Значительное снижение величины МЭП от минимальных значений, используемых в практике ЭХРО и составляющих 0,1...0,2 мм, не предполагается возможным. Так, авторы [19] отмечают: установление величины МЭП менее 0,03 мм может привести к появлению облитерации, что вызовет прекращение движения электролита в МЭП. В связи с этим возникает вопрос о механизме формообразования отверстий малого диаметра, когда величина МЭП является сопоставимой с диаметром отверстия в катод.

Настоящая статья посвящена изучению механизма формирования отверстий малого диаметра при ЭХРО.

### Методика экспериментального исследования

Технологические эксперименты по прошивке отверстий с использованием электрохимической размерной обработки проводились на специально разработанной и изготовленной установке, схема которой представлена на рис. 2. Установка обеспечивает ЭХРО как в условиях неподвижных электродов [23], так и при стабилизации величины МЭП за счет перемещения анодного узла без вращения катода-инструмента. Стабилизация может осуществляться как при периодическом его перемещении, так и при непрерывной подаче. Установка оснащена источником технологического тока, системой регистрации рабочего тока, а также пневмосистемой для создания избыточного давления  $P$  для подачи электролита в зону обработки. В качестве материала образца 8, закрепленного в электроизолирующей оправке 7, использовалась медь марки М1 (ГОСТ 859–2001). Полым катодом-инструментом 3 служила медицинская игла с соотношением внутреннего и наружного диаметра 0,26/0,46 мм.

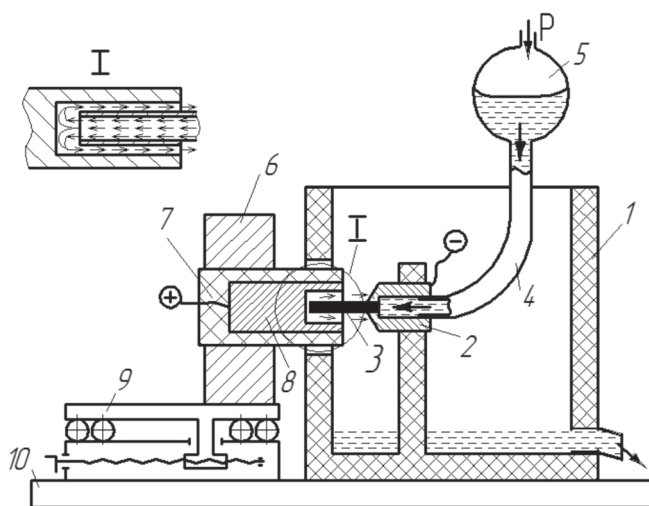


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для ЭХРО-отверстий:

1 – корпус электрохимической ячейки; 2 – катодный узел; 3 – катод-инструмент; 4 – магистраль подачи электролита; 5 – шар-баллон с электролитом; 6 – анодный узел; 7 – изоляционная оправка для образца; 8 – образец-анод; 9 – направляющие с механизмом перемещения анодного узла; 10 – основание

Катод-инструмент 3 закреплен в катодном узле 2, к которому подведена магистраль подачи электролита 4. Для создания давления магистрали использовался шар-баллон, обеспечивающий подачу электролита в зону обработки с давлением в диапазоне 0...1,0 МПа. Для электрохимической прошивки отверстий применялись 5 %-е водные растворы нейтральных солей NaCl (ГОСТ 4233–77) и KCl (ГОСТ 4234–77) [24]. Для оценки результатов электрохимической обработки использовался измерительный микроскоп Nikon MM-400.

При назначении параметров технологических режимов электрохимической прошивки малых отверстий руководствовались известными, используемыми на практике решениями. Так, значение технологического напряжения составило 10 В, а при выборе минимальной величины межэлектродного зазора, равной 0,05 мм, исходили из рассмотренных выше ограничений, определяющих гидродинамические условия при движении электролита. Для выявления кинетики формообразования отверстия при ЭХРО результаты оценивали через 4, 20 с и 1 мин после начала обработки.

Выбор минимальной величины МЭП объясняется стремлением к достижению максимально возможной локализации процесса электрохимического растворения. С этих же позиций при выборе составов электролитов предпочтение было отдано хлоридным растворам. Так, раствор нейтральной соли NaCl при ЭХРО меди обладает высоким (98 %) выходом металла по току, его независимостью от концентрации раствора и рабочей плотности тока, а также высокой удельной электропроводностью.

### Результаты и обсуждение

Из представленных выше рассуждений о механизме формообразования отверстий при ЭХРО возникает предположение о возможности получения отверстия без образования характерного выступа в условиях, когда диаметр отверстия в катод-инструменте сопоставим с величиной МЭП. Однако анализ результатов электрохимического растворения меди в 5 %-м растворе NaCl как на начальной стадии процесса (после 4 с обработки), так и после 20 с не только не подтверждает высказанных предположений

по улучшению формообразования, но и свидетельствует об иной кинетике развития процесса (рис. 3), отличающейся от рассмотренной выше (см. рис. 1).

Кинетика формообразования отверстия на начальной стадии обработки представлена на рис. 4.

Вопреки традиционному для ЭХРО механизму анодного растворения, когда его скорость максимальна в зоне активной торцевой поверхности катода-инструмента, где величина МЭП минимальна, в данном случае область раство-

рения обрабатываемого материала в начальный момент времени находилась за пределами катода-инструмента. Зона обработки II (рис. 4) представляет собой кольцо с наружным диаметром  $\sim 0,8$  мм, в то время как диаметр катода составляет 0,46 мм. В зоне II видны следы электрохимического растворения, характерные при сепарации потока электролита на отдельные струи с образованием так называемых «сухих зон». Появление струйности связано с разворотом потока электролита, вытекающего из отверстия катода-

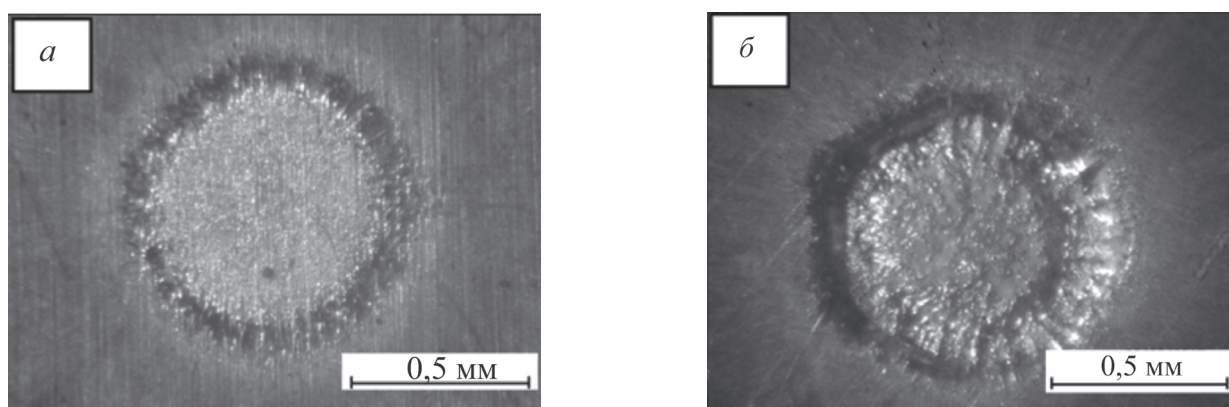


Рис. 3. Фото поверхности образца после 4 с (а) и 20 с (б) электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 %-м растворе NaCl:

$P = 0,3$  МПа;  $\Delta = 0,05$  мм

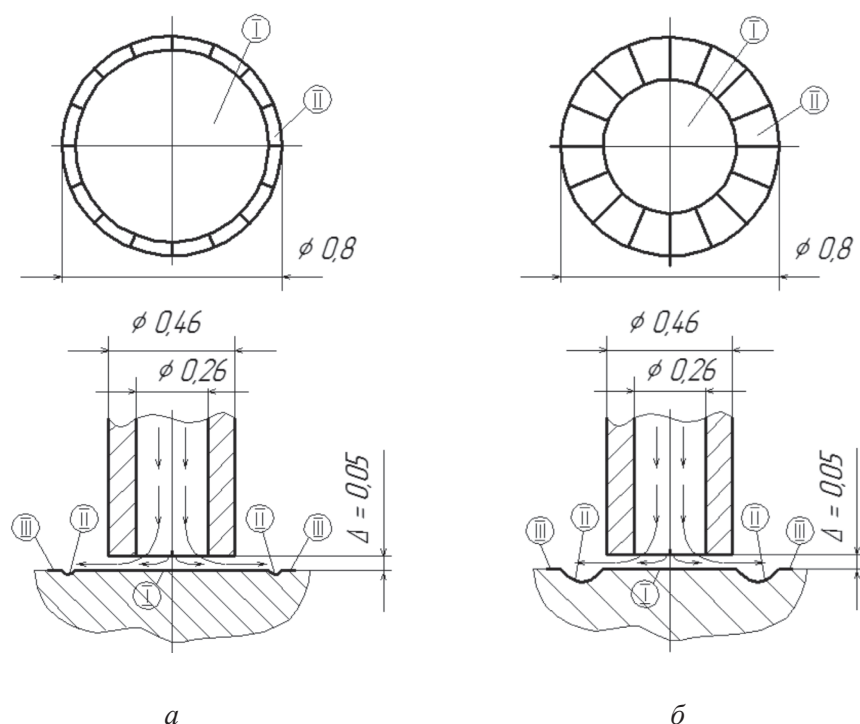


Рис. 4. Кинетика формообразования отверстия в меди на начальной стадии ЭХРО в 5 %-м NaCl:

$P = 0,3$  МПа;  $\Delta = 0,05$  мм: а – после 4 с обработки; б – после 20 с обработки



инструмента, на входе в МЭП малой величины. Внутри кольца, представляющего зону II, находится зона I, морфология поверхности которой отличается от исходной микрогеометрии. На поверхности III, расположенной с внешней стороны кольца II и имеющей более светлую окраску, чем исходная поверхность, видны следы слабого электрохимического травления.

Подобная кинетика формообразования отверстий при ЭХРО меди в данном электролите, вероятно, объясняется тем, что при малом (0,05 мм) МЭП в начальный момент времени под катодом имеет место интенсивное анодное растворение материала с образованием окислов меди на поверхности. Высокая анионная активность хлора приводит к замещению им кислорода в оксиде, в результате чего на поверхности образуется труднорастворимая соль  $\text{CuCl}$ , вызывающая полную пассивацию обрабатываемого материала [25, 26].

Очевидно, при такой интенсивности процесса пассивации устранить данные ограничения за счет движущегося потока электролита невозможно. И только на определенном расстоянии от катода, в зоне II, где интенсивность образования  $\text{CuCl}$  была ниже, происходил процесс депассивации, обеспечивающий анодное растворение материала. Увеличение времени обработки до 20 с приводит к расширению зоны анодного растворения в сторону центра отверстия. Дальнейшее продолжение обработки (~1 мин) сопровождается образованием характерного выступа в центре отверстия. Формообразование отверстия при ЭХРО на МЭП, равном 0,05 мм, при подобном развитии процесса анодного растворения не может быть приемлемым по двум причинам. Первая – не обеспечивается точность копирования катода-инструмента, когда при его наружном диаметре, равном 0,46 мм, диаметр входного отверстия ~0,8 мм. Вторая – невозможность стабилизации величины МЭП на уровне первоначальной настройки, так как до определенного момента времени (~1 мин) перемещение электродов приведет к их короткому замыканию и нарушению процесса обработки.

Увеличение МЭП до 0,1 мм в целом не изменяет кинетику формообразования, лишь приближает зону анодного растворения к катоду-инструменту и сокращает ее диаметр до 0,65 мм (рис. 5). На фото поперечного сечения образ-

ца (рис. 6) видно формирование характерного выступа в центре отверстия через ~1 мин обработки.

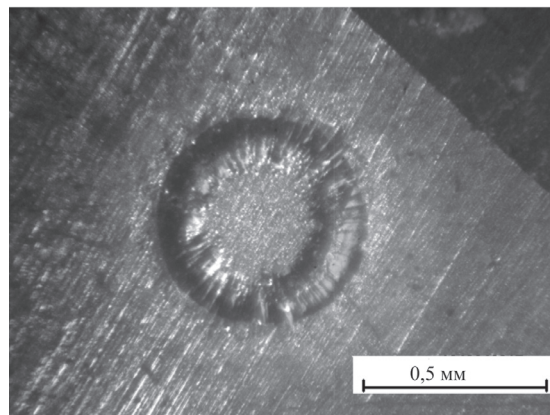


Рис. 5. Фото поверхности образца после 20 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 %-м  $\text{NaCl}$ :  
 $P = 0,3 \text{ МПа}$ ;  $\Delta = 0,1 \text{ мм}$

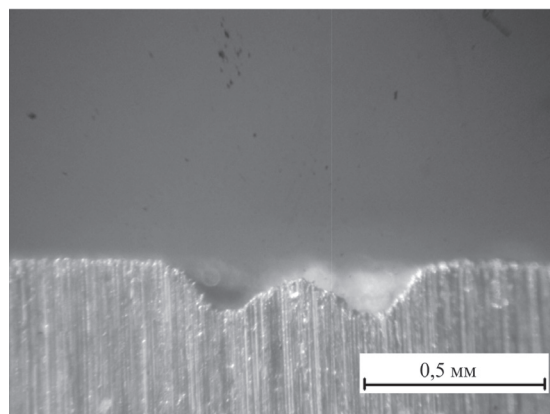


Рис. 6. Геометрия поперечного сечения отверстия после 1 мин электрохимической прошивки в 5 %-м  $\text{NaCl}$ :  
 $P = 0,3 \text{ МПа}$ ;  $\Delta = 0,1 \text{ мм}$

Несмотря на то что при ЭХРО на МЭП, равном 0,1 мм, кинетика формообразования изменяется в лучшую сторону, точность копирования катода-инструмента не обеспечивается и непрерывная стабилизация МЭП в процессе обработки на уровне 0,1 мм невозможна.

Развитие кинетики формообразования в классическом представлении, когда зона анодного растворения находится под активной торцевой поверхностью катода-инструмента, наблюдается при электрохимической прошивке на МЭП, равном 0,2 мм (рис. 7).

Такой характер формообразования можно объяснить выравниванием интенсивностей про-

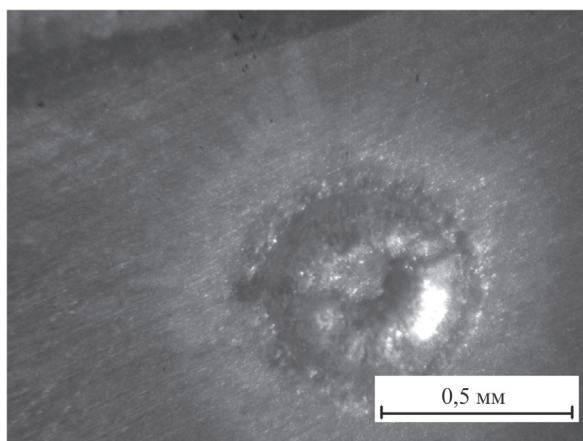


Рис. 7. Фото поверхности образца после 20 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 %-м NaCl:  
 $P = 0,3$  МПа;  $\Delta = 0,2$  мм

цессов образования пассивационных структур и их депассивацией в межэлектродном промежутке. В этом случае обеспечивается точность копирования формы катода-инструмента и возможность стабилизации МЭП на уровне 0,2 мм, хотя и остается опасность короткого замыкания электродов из-за наличия небольшого выступа в центре отверстия.

При дальнейшем увеличении МЭП до 0,3...0,4 мм формообразование отверстия начинается с центра катода без образования характерного выступа (рис. 8). Соответствующее данным параметрам обработки сочетание процессов пассивации анодной поверхности и ее устранения создает условия для интенсивного анодного растворения в центре катода, где давление струи электролита максимально.

Осуществление ЭХРО отверстия при стабилизации величины МЭП на уровне 0,3...0,4 мм обеспечит копирование формы катода-инструмента без образования выступа на дне отверстия. Естественно, что увеличение МЭП приведет к снижению скорости анодного растворения и, следовательно, уменьшению производительности обработки.

Таким образом, кинетика формообразования главным образом зависит от скорости развития двух процессов – пассивации анодной поверхности и ее депассивации. Изменение величины МЭП определяет скорость пассивационных процессов, о чем свидетельствуют результаты, представленные выше. Интенсивность депассивационных процессов связана с гидродинамическими параметрами струи электролита, в первую очередь ее давлением. Это подтверждают результаты эксперимента, представленные на рис. 9 и 10.

Увеличение давления струи электролита до 0,8 МПа при ЭХРО на МЭП, равном 0,05 мм, обеспечивает формообразование отверстия после 4 с прошивки (рис. 9), подобное обработке после 20 с при давлении 0,3 МПа и МЭП, равном 0,1 мм (см. рис. 5). При этом увеличение давления на меньшем зазоре улучшает точность копирования катода-инструмента; так, входной диаметр отверстия составляет 0,55 мм (см. рис. 9) против 0,65 (см. рис. 5). Образование характерного выступа в отверстии при повышенном давлении происходит после 20 с обработки (рис. 10), тогда как при ЭХРО при давлении 0,3 МПа на это потребовалось около 1 мин (см. рис. 6).

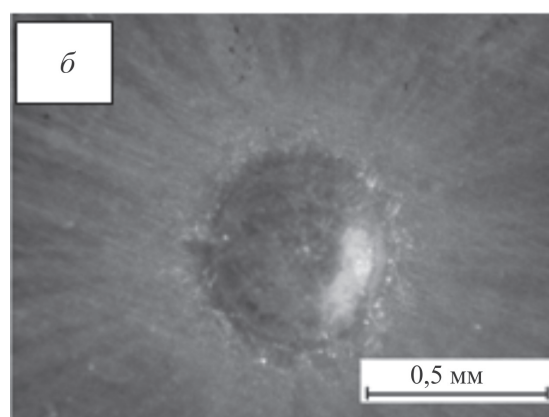
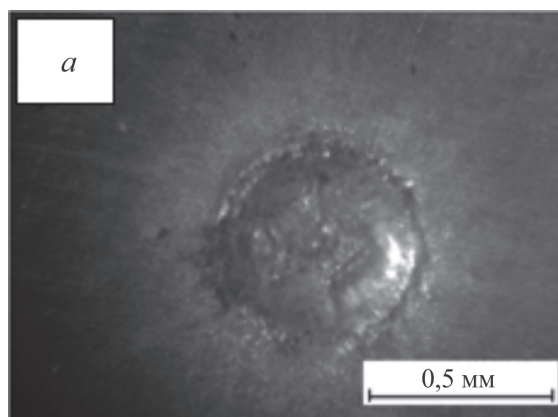


Рис. 8. Внешний вид отверстия в меди после 20 с электрохимической прошивки в 5 %-м NaCl при  $P = 0,3$  МПа:  
 $a - \Delta = 0,3$  мм;  $b - \Delta = 0,4$  мм

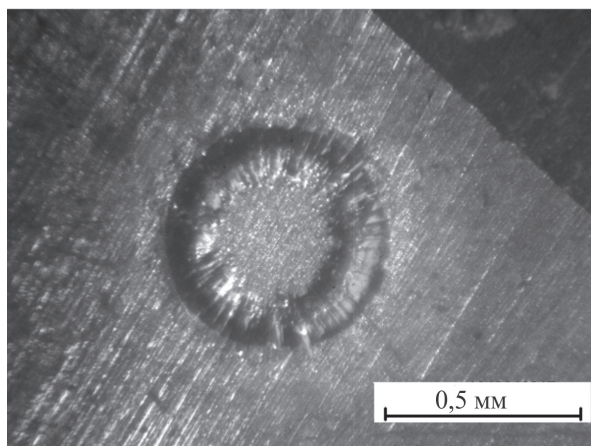


Рис. 9. Фото поверхности образца после 4 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 % NaCl:

$P = 0,8 \text{ МПа}$ ;  $\Delta = 0,05 \text{ мм}$

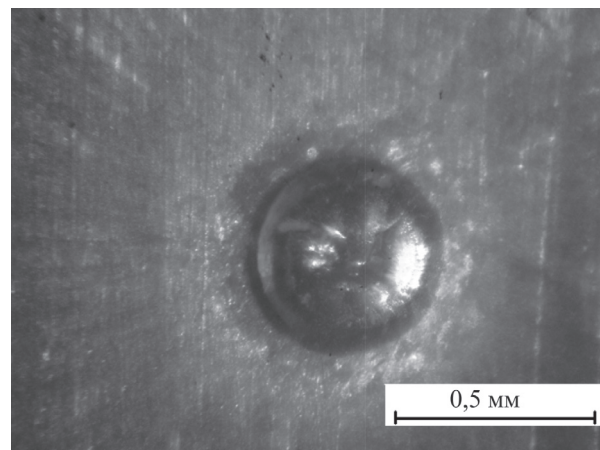


Рис. 11. Внешний вид отверстия в меди после 20 с электрохимической прошивки в 5 %-м NaCl:

$P = 0,8 \text{ МПа}$ ;  $\Delta = 0,1 \text{ мм}$

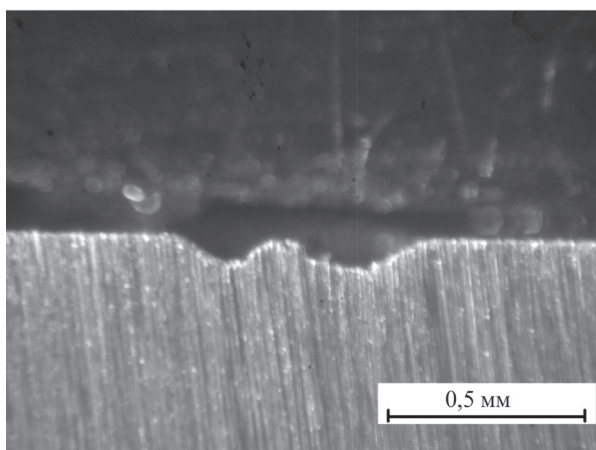


Рис. 10. Геометрия поперечного сечения отверстия после 20 с электрохимической прошивки в 5 % NaCl:

$P = 0,8 \text{ МПа}$ ;  $\Delta = 0,05 \text{ мм}$

Увеличение величины МЭП до 0,1 мм при  $P = 0,8 \text{ МПа}$  обеспечивает максимальную точность копирования катода-инструмента без образования характерного выступа на дне отверстия (рис. 11).

Таким образом, увеличение давления струи электролита существенно изменило кинетику формообразования отверстия. Электрохимическая прошивка со стабилизацией МЭП становится возможной при малых его значениях (0,05...0,1 мм), что обеспечивает как точность копирования формы катода-инструмента, так и высокую скорость анодного растворения. Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что главным ограничением в про-

цессе формообразования отверстий в меди при электрохимической прошивке в растворе NaCl является возникновение пассивационных ограничений вследствие образования труднорастворимой соли CuCl. Подтверждением являются результаты по ЭХРО с использованием другого хлоридного раствора – KCl. Характер и кинетика формообразования отверстий в растворах NaCl и KCl аналогичны.

## Выводы

Экспериментально подтверждено, что электрохимическая размерная обработка в хлоридных растворах при давлении струи электролита 0,3 МПа для прошивки отверстия в меди полым катодом-инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,26 / 0,46 мм на малых межэлектродных промежутках (0,05...0,1 мм) не обеспечивает точности копирования инструмента и исключает возможность стабилизации величины МЭП на установленном уровне. Смещение зоны электрохимического растворения за контуры катода-инструмента объясняется пассивацией анодной поверхности под его торцом вследствие образования труднорастворимой соли CuCl. Обеспечение точности копирования инструмента на обрабатываемой поверхности достигается при обработке с МЭП, равном 0,2 мм. При этом в центре отверстия формируется характерный для данной схемы ЭХРО-выступ. Увеличение МЭП до 0,3...0,4 мм сопровождается анодным растворением под торцом катода-инструмента, при этом выступа на дне отверстия





не образуется. Это обеспечивает возможность обработки отверстия с непрерывной стабилизацией МЭП за счет перемещения одного из электродов со скоростью анодного растворения. Увеличение МЭП приводит к снижению локализации процесса анодного растворения и, следовательно, к уменьшению скорости прошивки отверстия.

Показано, что повышение локализации процесса электрохимического растворения на МЭП, равном 0,05...0,1 мм, при обеспечении точности формообразования возможно при увеличении давления струи электролита до 0,8 МПа. Повышение давления струи интенсифицирует процессы депассивации анодной поверхности даже при высокой скорости образования труднорастворимой соли CuCl, что является закономерным при обработке на малых МЭП.

### Список литературы

1. Вeneвцева 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 (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 319–322.
4. Research on micro ECM using micro array electrode / Y. Li, X. Ma, G. Liu, M. Hu, F. Yi // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 335–340.
5. Ma X., Li Y. Research on micro electrode fabrication based on ECM // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 331–334.
6. Micro electrochemical machining and its influencing factors / X. Li, L. Zhao, X. Wang, Z. Wang // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 385–388.
7. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes / K.P. Rajurkar, G. Levy, A. Malshe, M.M. Sundaram, J. McGeough, X. Hu, R. Resnick, A. DeSilva // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 55, iss. 2. – P. 643–666. – doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.002.
8. Мороз И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.
9. Де Барр А.Е., Оливер Д.А. Электрохимическая обработка. – М.: Машиностроение, 1973. – 184 с.
10. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов / А.И. Дикусар, Г.Р. Энгельгардт, В.И. Петренко, Ю.Н. Петров. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 206 с.
11. Зайдман Г.Н., Петров Ю.Н. Формообразование при электрохимической размерной обработке металлов / под ред. А.И. Дикусара. – Кишинев: Штиинца, 1990. – 205 с.
12. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 4 (34). – С. 141–147.
13. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, Д.Б. Красильников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 3–7.
14. 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.
15. Электрохимическое растворение стали 110Г13Л / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, А.А. Марфеев, А.Ю. Конев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 40–41.
16. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Оценка механизмов активации процесса электрохимической размерной обработки нержавеющей стали // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 19–21.
17. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // Механика XXI века. – 2015. – № 14. – С. 112–115.
18. Zaitsev A.N., Idrisov T.R. Aspects of improving of electrochemical machining accuracy // Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai, 2010. – P. 341–345.
19. Байсунов И.А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высшая школа, 1981. – 152 с.
20. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 346 с.



21. Размерная электрическая обработка металлов / Б.А. Артамонов, А.Л. Бишницкий, Ю.С. Волков, А.В. Глазков. – М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.
22. Черепанов Ю.П., Семецкий Б.И. Электрохимическая обработка в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1972. – 117 с.
23. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом-инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 12–20. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-12-20.
24. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.
25. Анодное окисление меди, серебра и свинца в растворах хлоридов / В.К. Алтухов, Е.С. Воронцов, И.К. Маршаков, Т.Н. Клепинина // Защита металлов. – 1978. – Т. 14, № 4. – С. 474–480.
26. Грушевская С.Н. Кинетика анодного растворения Cu, Au-сплавов в условиях образования труднорастворимых соединений Cu (I): дис. ... канд. хим. наук: 02.00.05 / Воронежский государственный университет. – Воронеж, 2000. – 200 с.

## OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 6–16

### Features of small holes formation in copper by electrochemical machining in water chloride solutions

**Rakhimyanov Kh.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

**Vasilevskaya S.I.**, Assistant, e-mail: vasilevskaya@corp.nstu.ru

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

#### Abstract

The problems of the interelectrode gap value assignment at the electrochemical dimensional machining of small holes in copper in chloride solutions with using a hollow cathode- tool with an internal diameter 0,26 mm and external diameter 0,46 mm are considered. It is established that when obtaining holes at small interelectrode gaps (0,05...0,1 mm) with electrolyte jet pressure  $P = 0,3$  MPa, the accuracy of copying the tool is not ensured. This is explained by the fact that the electrochemical dimensional machining of copper in chloride solutions is accompanied by the formation of a hardly soluble CuCl salt on the surface, which prevents electrochemical dissolution of the metal under the cathode-tool end. The accuracy of copying the tool on the machined surface is achieved by increasing the interelectrode gap to 0.2 mm. However, an increase in the interelectrode gap leads to a decrease in the localization of the anodic dissolution process, and, consequently, to a decrease in the rate of hole formation. It is shown that an increase in the pressure of the electrolyte jet to 0,8 MPa at a value of the interelectrode gap from 0,05 to 0,1 mm ensures the accuracy of the hole formation. It is noted that increasing the electrolyte jet pressure intensifies the process of depassivation of the anodic surface, which makes the processing possible at a small value of the interelectrode gap with a high degree of localization of the process. It is established that at interelectrode gap equal to 0,3 mm at  $P = 0,3$  MPa and equal to 0,1 mm at  $P = 0,8$  MPa, it is possible to realize the scheme of electrochemical machining of holes with continuous stabilization of the interelectrode gap due to the displacement of one of the electrodes.

#### Keywords

electrochemical machining, cathode – tool, anodic dissolution, electrolyte, interelectrode gap, electrolyte stream, hardly soluble salt, depassivation, the mechanism of formation of holes.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-6-16

## References

1. Venevtseva S.N., Belousov I.A. [Microelectrochemical processing of materials using nanosecond process voltage pulses]. *Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Sovremennaya elektrotekhnologiya 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. [Microelectrochemical treatment for very small gaps]. *Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Sovremennaya elektrotekhnologiya 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 (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 319–322.
4. Li Y., Ma X., Liu G., Hu M., Yi F. Research on micro ECM using micro array electrode. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 335–340.
5. Ma X., Li Y. Research on micro electrode fabrication based on ECM. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 331–334.
6. Li X., Zhao L., Wang X., Wang Z. Micro electrochemical machining and its influencing factors. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 385–388.
7. Rajurkar K.P., Levy G., Malshe A., Sundaram M.M., McGeough J., Hu X., Resnick R., DeSilva A. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2006, vol. 55, iss. 2, pp. 643–666. doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.002.
8. Moroz I.I. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 279 p.
9. De Barr A.E., Oliver D.A. *Electrochemical machining*. London, Macdonald, 1968 (Russ. ed.: De Barr A.E., Oliver D.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 184 p.).
10. Dikuser A.I., Engel'gardt G.R., Petrenko V.I., Petrov Yu.N. *Elektrodnye protsessy i protsessy perenos pri elektrokhimicheskoi razmernoj obrabotke metallov* [Electrode processes and transport processes in the electrochemical dimensional processing of metals]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1983. 206 p.
11. Zaidman G.N., Petrov Yu.N. *Formoobrazovanie pri elektrokhimicheskoi razmernoj obrabotke metallov* [Molding in electrochemical dimensional processing of metals]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1990. 205 p.
12. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskii 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.
13. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolskii V.V., Krasilnikov D.B. *Elektrokhimicheskaya obrabotka bezvol'framovykh tverdykh splavov* [Electrochemical processing of tungsten carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp. 3–7.
14. 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.
15. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V., Marfelev A.A., Konev A.Y. *Elektrokhimicheskoe rastvorenie stali 110G13L* [Electrochemical dissolution of steel 110G13L]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3, pp. 40–41.
16. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Gaar N.P. Otsenka mekhanizmov aktivatsii protsessa elektrokhimicheskoi razmernoj obrabotki nerzhavayushchei stali [Evaluation of mechanisms of activation of electrochemical dimensional machining of stainless steel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3, pp. 19–21.
17. 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.
18. Zaitsev A.N., Idrisov T.R. Aspects of improving of electrochemical machining accuracy. *Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*, Shanghai, 2010, pp. 341–345.

19. Baisupov I.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical treatment of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 152 p.
20. Sedykin F.V. *Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin* [Dimensional electrochemical processing machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 346 p.
21. Artamonov B.A., Bishnitskii A.L., Volkov Yu.S., Glazkov A.V. *Razmernaya elektricheskaya obrabotka metallov* [Dimensional electrical processing of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 336 p.
22. Cherepanov Yu.P., Sametskii B.I. *Elektrokhimicheskaya obrabotka v mashinostroenii* [Electrochemical machining in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 117 p.
23. Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I. Tekhnologicheskie vozmozhnosti elektrokhimicheskoi obrabotki otverstii nepodvizhnym katodom-instrumentom [Technological capabilities of the holes electrochemical machining 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.
24. Rakhimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Vasilevskaya S.I. [Research electrolytes, providing precision electrochemical machining of copper M1]. *Innovatsii v mashinostroenii – osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii: materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Innovations in Mechanical Engineering Based on Technological Development of Russia”]. Barnaul, 2014, pt. 2, pp. 100–104. (In Russian).
25. Altukhov B.K., Vorontsov E.S., Marshakov I.K., Klepinina T.N. Anodnoe okislenie medi, serebra i svintsa v rastvorakh khloridov [Anodic oxidation of copper, silver and lead in solutions of chlorides]. *Zashchita metallov = Protection of metals*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 474–480.
26. Grushevskaya S.N. *Kinetika anodnogo rastvoreniya Cu, Au – splavov v usloviyakh obrazovaniya trudnorastvorimyykh soedinenii Cu (I)*. Diss. kand. khim. nauk [Kinetics of anodic dissolution of Cu, Au – alloys under conditions of formation of hardly soluble Cu (I). PhD chem. sci. diss.]. Voronezh, 2000. 200 p.

#### Article history

Received 06 March 2017

Revised 10 April 2017

Accepted 10 May 2017