

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-5-9

**А. Ю. ПОПОВ
В. А. ПРОКОФЬЕВ**Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТРУБЧАТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В статье рассмотрены факторы, влияющие на точность электроэрозионной обработки. Главным образом исследуется процесс образования конгломератов шлама, возникающих в результате обработки. На основе литературного анализа сопоставлена теоретическая и реальная схема электроэрозионной обработки. В результате проведенных экспериментов было выявлено, что в процессе изготовления глубоких отверстий электрод отклоняется от своей оси вследствие дестабилизации инструмента из-за не жесткости электрода и налипания шлама, образующегося в зоне обработки. Отклонение электрода от оси вращения приводит к неравномерному давлению со стороны жидкости, вымывающей шлам, что ведет к неравномерному износу на боковой стороне электрода. В ходе исследования были собраны и изучены образцы электроэрозионного шлама. Выявлена прямая зависимость между глубиной обработки и величиной отклонения: чем больше глубина обработки, тем больше величина отклонения, которая приводит к искажению формы сечения отверстия и образованию конуса вместо цилиндра. Для повышения точности обработки глубоких отверстий необходимо минимизировать отклонение электрода от оси вращения и защитить боковую поверхность электрода от воздействия тока.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, точность обработки отверстия, шлам, супердрель, обработка глубоких отверстий, трубчатый электрод-инструмент, конгломераты шлама.

Введение. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) на практике сегодня — это изменение размеров изделий из токопроводящего материала, создание отверстий различного диаметра и формы, извлечение сломанного инструмента и крепежа из узлов и деталей, шлифовка, резка, а также получение фасонных полостей, упрочнение поверхности и т.д. [1]. Многие подобные технологические проблемы не представляется возможным решить механическими методами обработки, в то время как электроэрозионные методы обработки могут быть эффективны

для получения глубоких отверстий, пазов различной формы, получение фасонных поверхностей и т.д.

Теория. В современном машиностроении широкое применение находят материалы с повышенными механическими свойствами. При изготовлении деталей и машин из труднообрабатываемых материалов получение глубоких отверстий является весьма трудоемкой операцией [2]. Применение электроэрозионной обработки зачастую становится незаменимым при решении подобных технологических проблем [3]. Главным конкурентом ЭЭО явля-

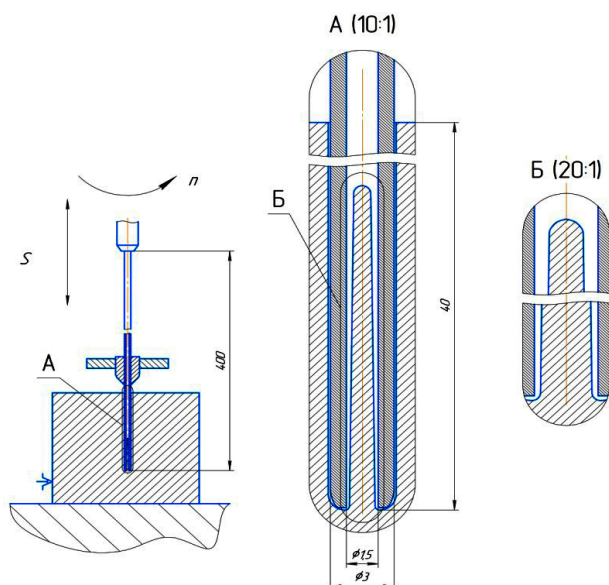


Рис. 1. Теоретическая схема обработки отверстий малого диаметра

ется метод сверления ружейными сверлами, однако такой метод позволяет получать отверстия меньшей глубины ($L/D < 100$), в то время как возможности электроэрозионной обработки позволяют получать отверстия глубиной до ($L/D < 300$).

Реальная схема обработки отличается от теоретической. В теоретически правильной схеме электрод в форме трубки должен работать только торцом (рис. 1), но в реальных условиях, когда начинается изгиб трубки, возникают силы, удерживающие и отжимающие электрод от оси отверстия. Когда отжимающие силы увеличиваются, в работу вступает боковая сторона электрода. Удерживает электрод в оси отверстия давление жидкости, протекающей между наружной поверхностью стенки электрода и стенкой отверстия детали. Стенка трубчатого инструмента прожигается, вследствие чего поток жидкости становится неконтролируемым и не вымывает шлам из зоны обработки, что приводит к подклиниванию и прекращению образования отверстия [4].

В теоретической схеме сила электрического тока максимальная за счет небольшой площади воздействия (площадь торца электрода и отверстия без учета отверстия в электроде).

В реальной схеме сила тока минимальна по причине увеличения площади воздействия электрического тока (т.к. к работе присоединяется боковая поверхность инструмента, увеличивающая суммарную площадь контакта). Вследствие чего происходит интенсивный износ боковой поверхности инструмента, что ведет к нестабильному зазору между инструментом и обрабатываемым отверстием, зоны разноименного давления создают соответствующие зоны скорости течения рабочей жидкости. Отклонение электрода от оси отверстия влечет за собой образование зон повышенного и пониженного давления, что вносит дестабилизацию в процесс обработки, уменьшается эффективность и качество обработки (рис. 2). Учитывая низкую жесткость трубчатого электрода-инструмента, данная дестабилизация обратно пропорциональна сечению электрода-инструмента [5].

При электроэрозионной обработке отверстий инструментом трубчатой формы возникают две

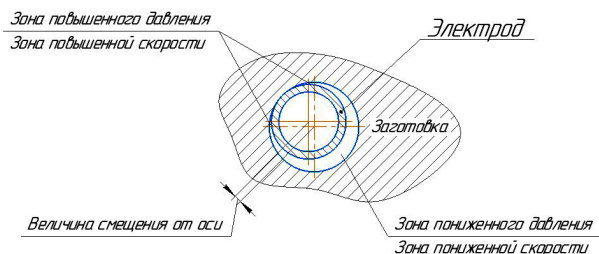


Рис. 2. Реальная схема обработки отверстий малого диаметра



Рис. 3. Образование конусности в глухом отверстии

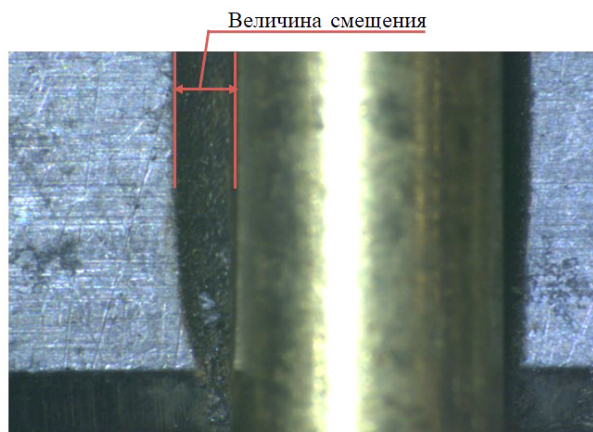


Рис. 4. Образование конусности на выходе из сквозного отверстия

причины отклонения электрода-инструмента от оси его вращения.

Первая причина кроется в низкой жесткости трубки и погрешностях базирования, которые приводят к отклонениям электрода от оси. Трубка легко деформируется и получает биение на рабочем торце. Это затрудняет равномерное обтекание ее жидкостью с частицами шлама. При обработке глубоких отверстий в зоне стесненного пространства происходит активное скопление продуктов эрозии, что приводит к возникновению вторичных структур на поверхностях электродов, увеличивающих отклонение трубки от оси вращения [6].

Вторая причина заключается в образовании конгломератов из частиц, которые, частично слипаясь друг с другом, подклинивают электрод в отверстии и смещают его от первоначальной оси. В результате этого электрод начинает работать боковой

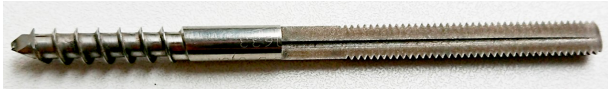


Рис. 5. Конусное глухое отверстие в детали

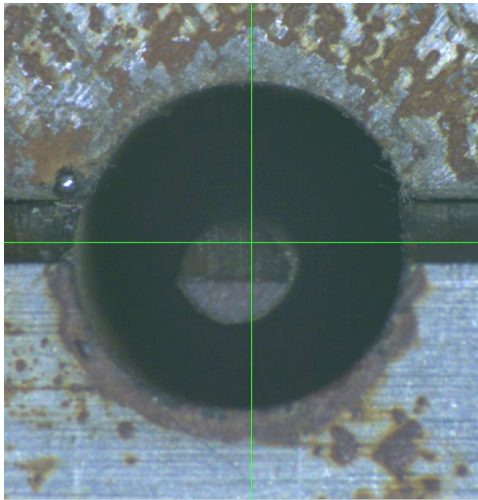


Рис. 6. Овальность получаемого отверстия

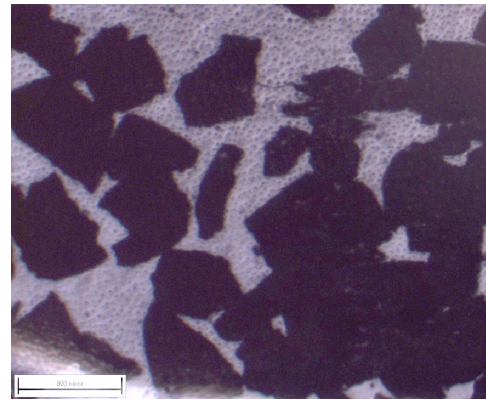
стороной, а не торцом, что приводит к утончению и полному износу стенки электрода (рис. 3). Это связано с тем, что воздействие происходит с двух сторон — торец и боковая поверхность, из-за чего электрод приобретает форму конуса, процесс получения отверстия практически прекращается (рис. 4, рис. 5). При обработке происходит увеличение диаметра электрода вследствие осаждения на его поверхности частиц уже обработанного металла, которые не успевают эвакуироваться из зоны обработки. Соответственно, увеличение диаметра электрода-инструмента ведет к увеличению диаметра обработанного отверстия [3].

В процессе электроэрозионной обработки материал обрабатываемой заготовки подвергается воздействию электрических импульсов. Под действием высоких температур происходит фазовый переход обрабатываемого материала из твердого состояния в парообразное. Пары металла при взаимодействии с рабочей жидкостью, заполняющей межэлектродное пространство, твердеют и формируют электроэрозионный шлам [7].

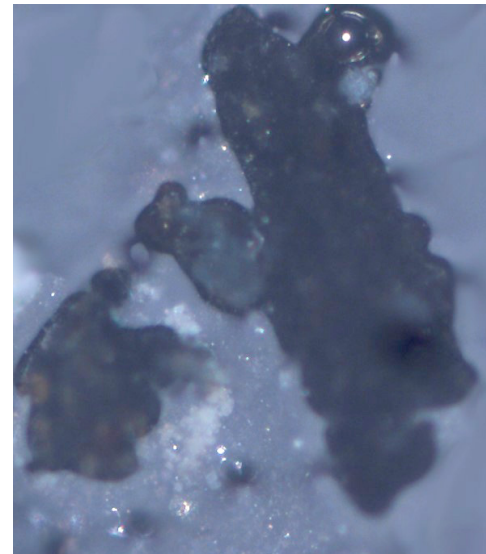
При минимальной мощности импульса размер единичной частицы минимален [2, 8]. Происходит интенсивная конгломерация мелких частиц, затрудняющая удаление продуктов эрозии из зоны обработки. Конгломераты, полученные при режимах с меньшей мощностью (чистовые режимы), крупнее и состоят из большего числа мелких частиц, чем при режимах с большой мощностью [9]. Зависимость режимных параметров электроэрозионной обработки на формирование конгломератов до конца не изучена [2, 8, 10].

Перемещение электроэрозионного шлама в зоне обработки зависит от процесса формирования и перемещения газовых пузырей (образующихся в результате высокой контактной температуры в зоне обработки) [10].

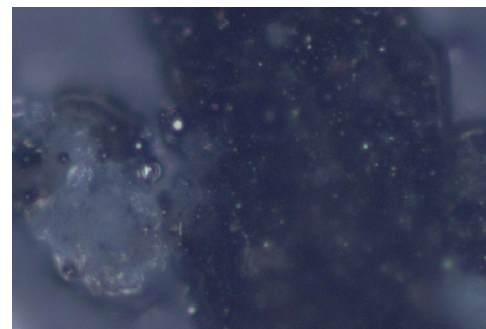
Из-за описанных выше факторов вытекает следующая проблема — отклонение формы (овальность и цилиндричность) отверстия, что негативно



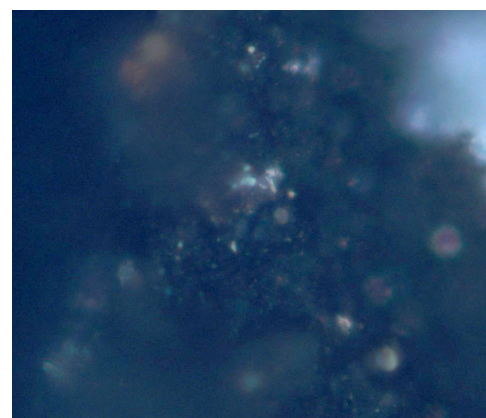
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Конгломераты шлама, полученного в процессе ЭЭО: а) 1,25 ×; б) 30 ×; в) 50 ×; г) 100 ×

:отражается на точности и качестве получаемых отверстий (рис. 6).

Известны способы улучшения эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны за счет вибрации электродного инструмента (амплитуда ~ 0,1 мм, частота 50 Гц), релаксации электродного инструмента (амплитуда 1–2 мм, частота 0,5–1 Гц) или за счет прокачки рабочей жидкости через электрод-инструмент. Использование только этих способов не позволяет решить задачу повышения производительности перфорации глубоких отверстий одновременно несколькими электродами [7, 11, 12].

Результаты экспериментов. В ходе работы были собраны и исследованы образцы продуктов, возникающих в процессе электроэрозионной обработки. Данные образцы были рассмотрены при различном увеличении. Измерение производилось на микроскопе Carl Zeiss AxioObserver. A1m. Электрод-инструмент изготовлен из латунного сплава, выполненный в виде одноканальной трубки наружным диаметром 3 мм. Для экспериментов использовали высокоскоростной электроэрозионный станок для выполнения мелких отверстий D720. Режимные параметры обработки: частота импульсов 55 Гц, значение рабочего тока 6 А, скорость 9 мм/мин, диэлектрическая жидкость — дистиллированная вода.

Сначала были рассмотрены частицы при наименьшем увеличении (1,25 ×) микроскопа с целью определить диапазон габаритных размеров слипшихся частиц (конгломератов). Полученный снимок представлен на рис. 7а. На снимке можно увидеть, что размеры образованных конгломератов находятся в диапазоне от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров.

При дальнейшем рассмотрении частиц с большей кратностью увеличения (30 ×) видно скопление более мелких слипшихся частиц размером от 60 мкм до 480 мкм, имеющие различное происхождение (относящиеся к электроду-инструменту или к заготовке) (рис. 7б).

Следующий снимок сделан с кратностью увеличения микроскопа (50 ×). На нём можно увидеть структуру — более мелкие частицы, из которых состоит крупное зерно (конгломерат). Размер самых крупных частиц достигает до 40 мкм, а самых мелких — от нескольких микрометров. Снимок изображен на рис. 7в. На данном снимке видно разнородную морфологию конгломерата.

Снимок с максимальной кратностью увеличения 100 × представлен на рис. 7г. Размер мелких частиц находится в диапазоне от 1 до 4 мкм. Также на снимке можно заметить, что пространство между частицами конгломерата заполнено.

Обсуждение экспериментов. При анализе частиц шлама под микроскопом с различным увеличением, было установлено, что электроэрозионный шлам неоднороден. По своей структуре он состоит из частиц различного размера и формы, слипшихся в конгломераты. Сами конгломераты сформированы из частиц обрабатываемого материала и частиц электрода.

Относительно большие (до нескольких миллиметров) габаритные размеры конгломератов в зоне затрудненной эвакуации (особенно в зоне обработки глубоких отверстий) являются одной из главных проблем электроэрозионной обработки.

Выводы. На основе проведенного анализа, исследования и экспериментов предлагаются следующие варианты по повышению точности обработки

глубоких отверстий электроэрозионной обработкой вращающимся трубчатым электродом:

1. Контролировать расход рабочей жидкости, для очищения зоны обработки от шлама и уменьшения перепада давления, вызывающего дополнительное воздействие, способствующее отклонению инструмента от оси его вращения.

2. Целесообразно применять износостойкие изолирующие покрытия на наружной поверхности электрода в целях увеличения точности получаемого отверстия.

Библиографический список

1. Владыкин А. В., Макаров В. Ф. Эффективность электроэрозионного сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов // Технология машиностроения 2011. № 5. С. 13–17.
2. Zhang Z., Zhang Y., Ming W. A review on magnetic field assisted electrical discharge machining // Journal of Materials Processing Technology. 2021. Vol. 64 (13). P. 694–722. DOI: 10.1016/j.jmatpro.2021.01.054.
3. Левинсон Е. М., Лев В. С. Электроэрозионная обработка: справочное пособие по электротехнологии. Ленинград: Лениздат, 1972. 328 с.
4. Schumacher B. M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed // J. Matl. Proc. Tech. 2004. № 149. P. 376–381. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.060.
5. Rajamanickama S., Prasannab J. Multi Objective Optimization during Small Hole Electrical Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V using TOPSIS // ScienceDirect. 2019. Vol. 18. P. 3109–3115. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.184.
6. Cetin S., Okada A., Uno Y. Effect of debris distribution on wall concavity in deep-hole EDM // JSME International Journal Series C. 2004. № 47. P. 553.
7. Саушкин Б. П. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей. Москва: Дрофа, 2002. 655 с.
8. Ганцев Р. X. Оптимизация управления параметрами разрядных импульсов в процессе электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 10, № 2 (27). С. 42–47.
9. Сафонов И. И., Дорошкина Н. Н. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя. Кишинев: Stiinta, 1999. 472 с.
10. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Москва: Машиностроение, 1982. 400 с.
11. Оглезнев Н. Д., Абляз Т. Р. Влияние режимов электроэрозионной обработки на точность получения отверстий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4-2. С. 396–398.
12. Jianga Y., Zhao W., Xi X. A study on pulse control for small-hole electrical discharge machining // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212 (7). P. 3109–3115.

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4871-2344

ORCID: 0000-0002-7703-9283

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

Адрес для переписки: popov_a_u@list.ru

ПРОКОФЬЕВ Владимир Андреевич, инженер-конструктор 2-й категории научно-технического управления по разработке комплексов АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск.

SPIN-код: 3976-3404

AuthorID (РИНЦ): 1110099

ORCID: 0000-0001-7270-673X

Адрес для переписки: vladimirprokofev1999@mail.ru

Для цитирования

Попов А. Ю., Прокофьев В. А. Повышение точности обработки глубоких отверстий электроэрозионной обработкой вращающимся трубчатым электродом // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-5-9.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022 г.

© А. Ю. Попов, В. А. Прокофьев