Влияние формы катода на скорость удаления при электроэрозионной обработке диэлектриков

А.А. Зарипов*, Х.Б. Ашуров

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125 Ташкент, Узбекистан

Получена 20.12.2021

* Corresponding author: e-mail: zaripov@iplt.uz, Phone: +99 897 448 5015, Fax: +99 871 999 999

Повышение скорости съема материала и качества электроэрозионной обработки расширяет возможности полномасштабного применения диэлектрика в промышленности. Однако существующие работы недостаточно раскрывают зависимость скорости удаления от формы катодного торца, которая осуществляется в усовершенствованной установке, адаптированной для электроэрозии диэлектриков. Установлено, что скорость удаления материала при использовании конического торца катода в 3 раза выше, чем цилиндрического, и это является следствием «направленной» кавитации и наложения на него ультразвуковых и импульсных разрядов. В данной статье предлагается улучшенная форма катодного торца, обеспечивающая повышенную скорость удаления диэлектриков без изменения каких-либо физических параметров разряда.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка (ЭЭО), скорость удаления материалов (MRR), конический и цилиндрический катоды, электролиты, пузырьки, импульсный разряд, кавитация.

The increase in material removal rates and the quality of electrical discharge machining expands the possibilities of full-scale application of dielectric in industry. However, in the existing works, the dependence of the removal rate on the shape of the cathode end is insufficiently disclosed, which is carried out in an improved installation adapted for the electroerosion of dielectrics. It was found that the rate of material removal at using the conical end of the cathode is 3 times higher than on the cylindrical one, and this is a consequence of "directed" cavitation and the imposition of ultrasonic and pulse discharges on it. This article proposes a better shape for the cathode end, providing an increased rate of removal of dielectrics without changing any physical parameters of the discharge.

Keywords: electrical discharge machining (EDM), material removal rate (MRR), conical and cylindrical cathodes, electrolytes, bubbles, pulse discharge, cavitation.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v23i3.268

I. Введение

Несмотря на то, что электроэрозионная обработка ((ЭЭО), т.е. изменение объема и формы образца под воздействием электрических разрядов, лишь недавно начала применяться для обработки диэлектрических материалов, во многих отраслях современной индустрии она успешно применяется в промышленных масштабах [1-5]. В промышленности производительность и качество являются основными показателями того или иного метода обработки. Однако влияние формы катодного торца на производительность (которая в большинстве случаев определяется скоростью съема материала (MRR), т.е. удаленный объем делится на время съема) изучено недостаточно, по сравнению с другими электрическими и неэлектрическими параметрами процесса ЭЭО диэлектриков [6].

Работ, связанных с влиянием формы катода на MRR при ЭЭО диэлектриков в электролитах, немного. В работе [7] изучается износ электрода (по сути, изменение формы электрода). Считается, что в этом случае конечная деталь в основном зависит от износа электрода и ширины зазора. Однако в [7] конкретная форма катода не предлагалась. Есть еще работы, в которых спиральный электрод из CuW считается лучшим для прошивки отверстий с высоким соотношением сторон [8], также есть работы, в которых предпочтение отдается трубчатому электроду [9]. Однако в [10] авторы сделали выбор вовсе в пользу квадратных и прямоугольных электродов. Расхождение между этими авторами [8-10] усугубляется работой [11], в которой влияние формы катода на MRR исследовали с помощью одиночного разряда, и было определено, что круглый катод имеет максимальное MRR, за которым следуют квадратные, треугольные, ромбические и фигурные электроды. Но в этом случае эффект однократного разряда нельзя рассматривать как репрезентативный для промышленных процессов, так как засорение межэлектродного промежутка продуктами эрозии приводит к повторной обработке, что в конечном итоге ухудшает MRR. В [12] считают, что оптимальная форма катодного торца – коническая, но это противоречит всем предыдущим результатам.

Существующие теоретические работы и методы расчета формы (профиля) электрода-инструмента (ЭИ) основываются либо на эмпирических зависимостях, либо на упрощенных частных моделях процесса. Это снижает эффективность электроэрозионной обработки, особенно, если речь идет о поверхностях сложного профиля. Например, авторами [13] была предложена модель, описывающая изменение размеров проволочного ЭИ, позволяющая определять величину формирующейся погрешности поверхности реза с учетом режимов обработки и характеристик рабочей части проволочного ЭИ. Однако и в этой теоретической работе не была предложена конкретная форма торца катода.

Как видно из краткого анализа, несмотря на усилия ученых, роль формы торца катода в MRR не выявлена. В данной работе мы решили экспериментально определить влияние формы торца катода на MRR диэлектриков.

II. Описание объекта и методов исследования

Для обработки диэлектрика с химическим составом 68.4% SiO_2; 8.5% CaO; 9% Na_2O; 7.1% K_2O; 3.9% Al_2O_3; 2.7% B_2O_3 усовершенствовано электроэрозионное устройство на основе релаксационного генератора с демпфирующим механизмом. Схематическое изображение процесса диэлектрической обработки в водном растворе электролита NaCl показано на рис. 1.

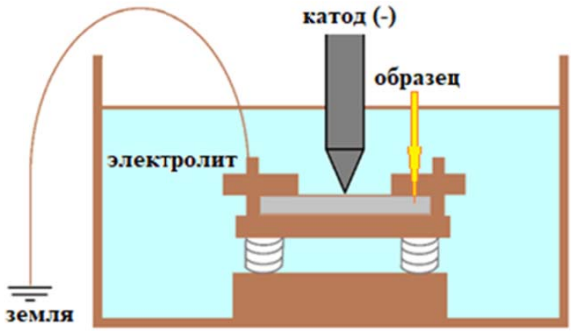


Рисунок 1. Схематическое изображение электроэрозии диэлектриков.

В качестве электродов-инструментов (катодов) были использованы вольфрамовые стержни с коническим или цилиндрическим торцом. Пластины с образцами толщиной 1 мм закрепляли держателями и помещали в ванну с электролитом. К катоду прилагали отрицательный потенциал, а к электролиту – положительный. Выходное напряжение можно регулировать в диапазоне 0–400 В, а максимальный ток до 10 А.

Напряжение в межэлектродном промежутке плавно увеличивали до достижения желаемого режима, чтобы резкая подача не приводила к растрескиванию образца. А частота импульсов регулировалась конденсаторами релаксационного генератора. Требуемая емкость конденсатора (которая определяет частотную характеристику системы) устанавливается перед подачей питания. Демпфирующий механизм под образцом также служит для предотвращения растрескивания.

III. Анализ результатов

В электроэрозии, помимо формы катода, важен выбор материала катода (ЭИ). Выбор наиболее подходящего материала катода зависит от поставленной задачи. В данном случае мы исходили с точки зрения расхода ЭИ. Зависимость расхода ЭИ от материала, из которого он изготовлен, для наиболее часто используемых в электроэрозии материалов показана на рис. 2.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

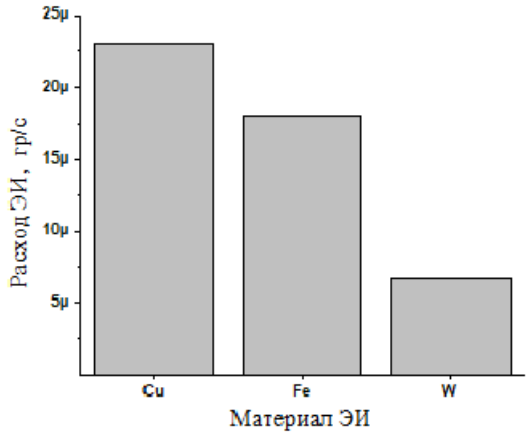


Рисунок 2. Зависимость расхода ЭИ от материала, из которого изготовлен катод.

Медные, стальные и вольфрамовые катоды расходуются примерно с 23, 18 и 8 мкг соответственно. У вольфрамового катода самый низкий расход материала, он обладает хорошей твердостью. Поэтому в дальнейшем в экспериментах по прошивке диэлектриков мы использовали именно вольфрамовые ЭИ. Но какой бы твердостью не обладал материал катода проблема изнашивания ЭИ остается. Контроль износа электродов – основная проблема для достижения хорошей точности и размера обработки.

Поэтому форма и изнашивание ЭИ имеют важное значение при обработке деталей. Значимость формы и изнашивания зависит от поставленной задачи. Если необходимо контролировать точность и хорошую шероховатость, то требования к форме и износу ЭИ очень высокие. Если пренебречь качественными параметрами, но нужна высокая скорость обработки, то требования к форме катода будут другие. Н-р, при электроэрозионной обработке канавок электроды квадратной и прямоугольной формы обеспечивают лучшую производительность, высокую точность, хорошую шероховатость и стабильность обработки [14]. А электроды с заостренными поверхностями крайне неэффективны в этом случае, так как края электродов сильно изнашиваются, и точность быстро уходит из-под контроля. Поскольку в нашем случае стоит задача повысить скорость удаления материала в зависимости от формы катода, будем сравнивать результаты, связанные со сплошной и заостренной формами поверхности ЭИ.

Обычно для прошивки диэлектриков в электролитах используются катоды с цилиндрическим концом (рис. 3а), так как электроды круглого поперечного сечения меньше изнашиваются (затем следует квадрат, треугольник, ромб и фасонные электроды) [15]. Кроме того, у электродов круглого поперечного сечения нет уязвимых острых углов на искрящемся наконечнике. В ходе экспериментов было замечено, что рабочая часть торца катода заостряется (рис. 3б) и становится похожей на конус. При этом скорость прошивки значительно увеличивается.



Рисунок 3. Вольфрамовый катод: *a*) с цилиндрическим торцом, *b*) с коническим торцом.

Исследования, связанные с влиянием формы катода на MRR, наряду с параметрами разрядов, шероховатостью и точностью обработки, являются немаловажными. Во многих работах исследовались в основном электроды четырех различных форм с постоянной площадью поперечного сечения. Например, методом электроэрозии можно получить фасонные отверстия, т.е. отверстия сложного профиля, но трудно добиться высокой точности. Эти сложные геометрические формы получают электродами с квадратной, круглой, прямоугольной поверхностями поперечного сечения, которые удаляют материалы с разной эффективностью. Следует отметить, что нет реального комплексного решения оптимальных параметров. Повышение одного параметра приводит к понижению другой физической величины процесса обработки. Как правило, повышение скорости съема приводит к понижению шероховатости и точности обработки, и наоборот. Например, в работе [15] авторы заявляют, что для электродов круглой формы MRR будет максимальным (затем следует квадрат, треугольник, ромб и фасонные электроды).

Также следует отметить, что влияние формы электрода на шероховатость поверхности незначительно. Тем не менее, электрод круглой формы

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

обеспечивает более гладкую поверхность (затем следует квадрат, треугольник, ромб и фасонные электроды). Поэтому в экспериментах мы решили использовать катоды круглого поперечного сечения, т.е. ЭИ с заостренным (коническим) и цилиндрическим торцом.

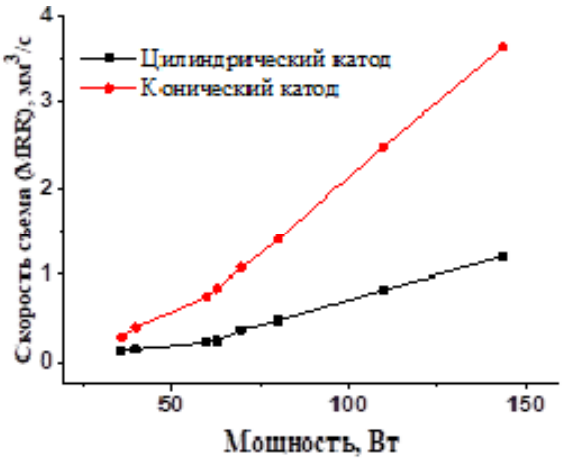


Рисунок 4. Зависимость MRR диэлектрика от мощности в водном электролите NaCl.

Как хорошо видно из рис. 4, зависимость MRR от входной мощности во всех случаях имеет нарастающий характер, и имеется существенная разница между рабочими показателями двух разных форм катодного торца. Кривые, относящиеся к цилиндрической форме торца катода, показывают меньшую скорость съема, чем кривые, полученные с конической формой торца катода. Например, при 36 Вт при использовании катода с торцом конической формы в водных растворах электролитов NaCl величина MRR составляет 0.27 мм^{3}с$^{-1}$, а при использовании катода с цилиндрическим торцом примерно в 3 раза меньше и составляет 0.11 мм^{3}с$^{-1}$. Аналогичная картина наблюдается при мощности 144 Вт: значение MRR на коническом торце составляет 3.65 мм^{3}с$^{-1}$, а на цилиндрическом 1.21 мм^{3}с$^{-1}$. Тут наглядное преимущество у катода конусной (заостренной) формы, но, как выше упоминали, в этом случае параметры качества (точность и шероховатость) уходят из-под контроля. Однако существуют методы, когда контроль качества осуществляется не за счет устойчивости геометрической формы (угла и радиуса кромки) электрода, а регулированием и комбинированием электрических параметров, тем самым изменяя характер износа наконечника электрода во время обработки [16]. Такой автоматический метод поддержки формы электрода повышает точность электроэрозионной обработки, не влияя на скорость удаления материалов. Но следует отметить, что с изменением размера и структуры обрабатываемой поверхности материала меняются и оптимальные параметры контроля качества.

Как объяснить влияние формы катода на скорость съема материала, полученную в экспериментах (см. рис. 4). Вначале рассмотрим и проанализируем работы авторов [17, 18], которые считают, что смывание продуктов эрозии с обрабатываемого участка повышает MRR. Но на самом деле это работает только в случае металлов, потому что пиролиз жидкого диэлектрика и накопление газообразных продуктов могут привести к остановке процесса обработки. Однако для диэлектриков образование и накопление эродированных частиц в рабочей зоне, наоборот, ускоряет процесс удаления. Это связано с ультразвуковой частотой прерывания разряда между пленкой электролита и вращающимся катодом, что приводит к его наложению на импульсные разряды [15]. Увеличение MRR, в свою очередь, связано с более направленным ударом по образцу, образованным схлопыванием парогазового слоя вокруг конического катода, по сравнению с цилиндрическим. Эта «направленная» кавитация (образование пузырьков с последующим схлопыванием, приводящим к высвобождению большего количества энергии) из-за полномасштабного наложения ультразвука и импульсных разрядов, увеличивает MRR в 3 раза.

IV. Заключение

Таким образом, выявлено влияние формы катодного торца на скорость удаления диэлектрика. Коническая форма катодного торца более производительна и в 3 раза превосходит цилиндрическую форму при обработке диэлектрика электроэрозией в электролите NaCl. Установлено, что возможность развертывания парогазового слоя и более направленное схлопывание парогазового слоя вокруг конического катода создает «направленную» кавитацию и обеспечивает лучшее кавитационное схлопывание пузырьков. Доказано, что полномасштабное наложение кавитации и ультразвука на импульсные разряды при использовании катода с коническим торцом приводит к увеличению производительности.

В целом, показано превосходство коничес-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

кого катода над цилиндрическим при электроэрозионной обработке диэлектрика. Предложенная коническая форма катодного торца обеспечивает повышенную скорость удаления диэлектрика без изменения физических параметров разряда.

Метаданные

Influence of the cathode shape on the dielectric removal rate during electrical discharge machining

A.A. Zaripov, H.B. Ashurov

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli str. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

The increase in material removal rates and the quality of electrical discharge machining expands the possibilities of full-scale application of dielectric in industry. However, in the existing works, the dependence of the removal rate on the shape of the cathode end is insufficiently disclosed, which is carried out in an improved installation adapted for the electroerosion of dielectrics. It was found that the rate of material removal at using the conical end of the cathode is 3 times higher than on the cylindrical one, and this is a consequence of "directed" cavitation and the imposition of ultrasonic and pulse discharges on it. This article proposes a better shape for the cathode end, providing an increased rate of removal of dielectrics without changing any physical parameters of the discharge.

Keywords: electrical discharge machining (EDM), material removal rate (MRR), conical cathode, cylindrical cathode, electrolytes, bubbles, pulse discharge, cavitation.

Литература (References)

[1] F.N. Leão. Optimization of EDM fast hole drilling for aerospace applications. (PhD Thesis, 2007).
[2] Y. Wang. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing **1744,** No.2, 022098 (2021).
[3] Rao H Ganga. Infrastructure applications of fiber-reinforced polymer composites. Applied Plastics Engineering (William Andrew Publishing, 2017).
[4] E. Boccardi, F.E. Ciraldo, A.R. Boccaccini. MRS Bulletin **42**, No.3, 226 (2017).
[5] N.M. Abbas, D.G. Solomon, M.F. Bahari. International Journal of Machine Tools and Manufacture **47**, No.7-8, 1214 (2007).
[6] A. Bilal, M.P. Jahan, D. Talamona, A. Perveen. Micromachines **10**, No.1, 10 (2019).
[7] O. Flaño, I. Ayesta, B. Izquierdo, J. A. Sánchez, & J.M. Ramos. Procedia CIRP **68**, 405 (2018).
[8] S. Plaza, J.A. Sanchez, E. Perez, R. Gil, B. Izquierdo, N. Ortega, I. Pombo. Precision Engineering **38**, No.4, 821 (2014).
[9] G. D'Urso, C. Merla. Workpiece and electrode influence on micro-EDM drilling performance. Precision Engineering **38**, No. 4, 903-914 (2014).
[10] N. Pellicer, J. Ciurana. Journal of Intelligent Manufacturing **22**, No.4, 575 (2011).
[11] E. Bassoli, L. Denti, A. Gatto, L. Iuliano. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **86**, No.5, 2329 (2016).
[12] P.V. Syakhovich. In Materials of XIII Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Минск, 2017).
[13] A.V. Jurin. Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i electrodov-instrumentov pri electroerozionnoy obrabotke (Avtoreferat, Tula, 2005).
[14] N. Pellicer, J. Ciurana, and T. Ozel. Materials and Manufacturing Processes **24**, 1282 (2009).
[15] Yuchao Jiaa, Guanxin Chia, Wentong Lia, Zhenlong Wanga, Lijuan Cuia, Procedia CIRP 95, 408 (2020).
[16] N.Je. Opiok, Ju.V. Vit'ko, Zh.A. Mrochek, Ju.I. Susha. Vlijanie formy tortsa elektroda-instrumenta na skorost' proshivki skvoznyh otverstiy pri elektroerozionnoj obrabotke (Minsk, BNTU, 2020).
[17] Q. Liu, Q. Zhang, G. Zhu, K. Wang, J. Zhang, C. Dong. Materials and Manufacturing Processes **31,** No.4, 391 (2016).
[18] A.A. Zaripov, H.B. Ashurov. Electronnaya obrabotka materialov **50**, No.2, 105 (2014).

Электроэрозиявий материал емириш тезлигига катод шаклининг таъсири

А.А. Зарипов, Х.Б. Ашуров

ЎзР ФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли, 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

Материал емириш тезлиги ва электроэрозиявий ишлов бериш сифатининг ошиши диэлектрик-ларни саноатда кенг миқёсда қўлланиш имкониятини яратади. Лекин мавжуд ишлар диэлектрикларнинг электроэрозияси учун мос-лаштирилган ва такомиллаштирилган қурилмада амалга оширилувчи емириш тезлигининг катод учи шаклига боғлиқлигини етарли даражада очиб беролмаган. Конуссимон учли катоддан фойдаланганда цилиндирсимон катодга нисбатан материал емириш тезлигининг 3 баравар ошиши аниқланган ва бу "йўналтирилган" кавитация ультратовуш ҳамда импульс разрядларининг устма-уст таъсирлари натижасидир. Бу мақолада разряднинг ҳеч қандай параметрларини ўзгартирмасдан, диэлектрикларни юқори тезликда емирилишини таъминловчи катод учининг энг мақбул шакли таклиф қилинган.

Калит сўзлар: электроэрозиявий ишлов, емириш тезлиги, конуссимон учли катод, цилиндрсимон катод, электролит, пуфакча, импульсли разряд, кавитация

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.