

04.1

Зависимость скорости удаления диэлектриков от формы катода

© А.А. Зарипов, Х.Б. Ашууров

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Узбекистана,
Ташкент, Узбекистан
E-mail: zaripov@iplt.uz

Поступило в Редакцию 11 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 10 февраля 2022 г.

Принято к публикации 21 февраля 2022 г.

Предложена оптимальная форма торца катода для электроэрозионной обработки диэлектриков, обеспечивающая повышенную скорость удаления диэлектриков без изменения физических и технических параметров разряда. Установлено, что скорость съема материала при использовании катода с коническим торцом в 5 раз выше, чем при применении цилиндрического, что является следствием „естественного“ наложения кавитации и ультразвука на импульсные разряды.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, скорость удаления материалов (MRR), катод, электролит, импульсный разряд.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52365.19076

Сегодня существуют отрасли, которые невозможно представить без использования электроэрозионной обработки (ЭЭО) материалов, например аэрокосмическая отрасль [1–3], изготовление пресс-форм [4], инфраструктура [5], биомедицина [6,7] и т.д. В промышленных масштабах ЭЭО используется для обработки керамики и композитов [8], большинство из которых представляет собой диэлектрики. Как и во всех методах обработки, первичным показателем является скорость удаления материала (material removal rate, MRR). Поэтому зависимость MRR от различных электрических и неэлектрических параметров в ЭЭО композитов и керамики изучена достаточно подробно [9,10].

Несмотря на столь обширное изучение процесса, без выяснения влияния формы катода на MRR понимание природы процессов не было бы полным. Влиянию формы катода на MRR посвящено множество работ. Например, Флано и др. считают, что при ЭЭО конечная деталь в основном зависит от износа электрода (т.е. изменения формы) и ширины зазора, но никакой конкретной формы катода предложено не было [11]. Плаза и др., используя микро-ЭЭО, обнаружили, что спиральный электрод из CuW для прошивки отверстий с высоким соотношением сторон является лучшим вариантом [12]. Урсо и др. считают, что трубчатый электрод наиболее эффективен для обработки титановых и магниевых заготовок [13], а Пеллисер и др. сделали вывод, что квадратные и прямоугольные электроды обеспечивают лучший радиальный и осевой износ [14]. Однако, как видно из работ [13,14], оптимальная форма катода определена только для обработки металлов. Бэссони и др. исследовали влияние формы катода на MRR с помощью одиночного разряда [15]. Они определили, что круглый катод имеет максимальный MRR, затем следуют квадратные, треугольные, ромбовидные и фасонные электроды. Но полученные результаты, связанные с изучением влияния

одиночного разряда, нельзя считать репрезентативными для промышленных процессов, поскольку загрязнение межэлектродного промежутка (из-за большого количества разрядов) в промышленных процессах приводит к повторной обработке, что в итоге ухудшает MRR. Сяхович и др. установили, что оптимальной формой торца катода является конусообразная [16], но это противоречит результатам работ [12–14].

Журиным был смоделирован процесс влияния формы катода на MRR [17], а Чжон и др. [18] предложили имитационную модель электроэрозионной прошивки с цилиндрическим катодом, которая считается лучшей для прогнозирования формы прошиваемого отверстия. В работах по моделированию [17,18] также не учитываются процессы, связанные с использованием диэлектрических образцов.

Как видно из приведенного выше анализа, несмотря на усилия исследователей, роль формы торца катода в MRR не была выявлена. Цель настоящей работы состоит в экспериментальном выявлении влияния формы торца катода на MRR диэлектриков.

Для ЭЭО диэлектриков в электролитах было разработано усовершенствованное электроэрозионное устройство с релаксационным генератором, следящей компенсирующей системой в виде плавающей головки с коническим или цилиндрическим катодом и держателем-демпфера [19,20]. Образец с помощью держателя-демпфера прижимается к кончику анода и помещается в ванну, заполненную электролитом (NaOH или KOH). Между электролитом и катодом создается разность потенциалов. Выходное напряжение установки регулируется в диапазоне 0–400 V, а максимальный ток доходит до 10 A. Объектом исследования является стекло (в качестве композита [21,22]) со следующим химическим составом: SiO₂ — 68.4 wt.%, CaO — 8.5 wt.%, Na₂O —

9.4 wt.%, K_2O — 7.1 wt.%, Al_2O_3 — 3.9 wt.%, B_2O_3 — 2.7 wt.%

Вначале при прошивке диэлектриков в качестве электрода-инструмента (ЭИ) использовался вольфрамовый катод с цилиндрическим торцом (рис. 1, *a*).

В ходе экспериментов опущенная в электролит рабочая часть электрода заострилась и стала острой как конус (рис. 1, *b*), и процесс удаления материала значительно ускорился. Основываясь на этих наблюдениях, мы решили использовать катод с заостренным концом, чтобы сравнить результаты со случаем цилиндрической формы торца ЭИ. Влияние формы торца катода на скорость съема продемонстрировано на рис. 2, где показаны результаты для зависимости MRR от подводимой мощности при использовании вольфрамовых катодов цилиндрической и конической формы торцов в 6% водных растворах электролитов NaOH, KOH.

Как видно из рис. 2, зависимость MRR от входной мощности во всех случаях имеет возрастающий характер. Здесь хорошо видна существенная разница между показателями производительности двух разных форм торцов катода. Кривые, относящиеся к конической форме торца катода, расположены выше, чем кривые, описывающие цилиндрическую форму торца катода. Например, при 36 W при использовании конической формы торца катода в водных растворах электролитов NaOH, KOH величина MRR составляет 1.3 и 1.35 $mm^3 \cdot s^{-1}$ соответственно, а при цилиндрическом торце она примерно в 5–6 раз меньше и составляет 0.21 и 0.22 $mm^3 \cdot s^{-1}$. Аналогичная картина наблюдается при мощности 70 W (заметим, что повышение мощности выше 70 W привело к мгновенному прошиванию 1 mm образца, время съема которого физически не смогли зафиксировать): значение MRR на коническом торце составляет 4.5 и 4.65 $mm^3 \cdot s^{-1}$, а на цилиндрическом — 0.75 и 0.8 $mm^3 \cdot s^{-1}$ соответственно. Возникает вопрос: как объяснить влияние формы катода на скорость удаления при неизменно одинаковой подводимой мощности? Например, Опиок и др. связывают это явление с улучшенным удалением продуктов эрозии с обрабатываемой зоны [23]. Действительно, пиролиз жидкого диэлектрика и накопление газообразных продуктов могут привести к остановке процесса обработки в случае металлов. Лю и др. сообщают, что при микро-ЭЭО продукты эрозии образуются в верхней части отверстия, что вызывает повторные (вторичные)

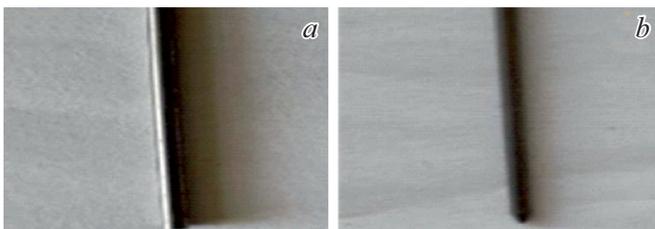


Рис. 1. Вольфрамовый катод с цилиндрическим (*a*) и коническим (*b*) торцом.

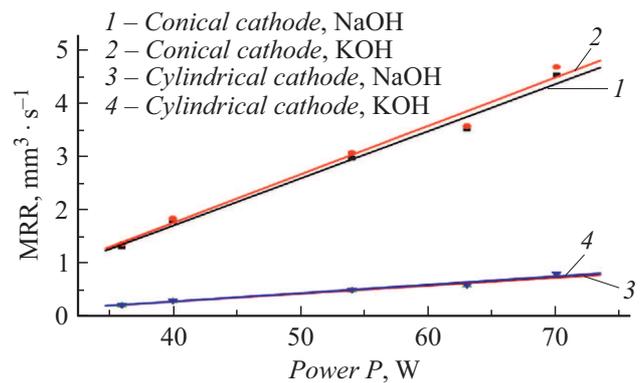


Рис. 2. Зависимость MRR диэлектрика от мощности в электролитах NaOH, KOH при использовании катода с коническим и цилиндрическим торцом.

разряды, и, как следствие, уменьшается MRR [24]. Как видно из обоих выводов, увеличение скорости съема связано с эффективным удалением продуктов эрозии с рабочей зоны. Эти предположения, высказанные в отношении металлов, не подходят для диэлектриков. В металлах скопления продуктов эрозии вблизи рабочей зоны приводят к повторным разрядам; соответственно, это явление ведет к снижению MRR. Однако при обработке диэлектриков за счет прерывания разряда между пленкой электролита на поверхности образца и вращающимся ЭИ возникает частота прерывания дуги килогерцевого диапазона, которая стимулирует соударение микрочастиц (образовавшихся продуктов эрозии), они в свою очередь совместно с импульсными разрядами участвуют в процессах обработки [25]. А увеличение MRR является следствием лучшего разветвления парогазового слоя вокруг конического катода, который создает кавитацию [26]. В результате возможность полноценного наложения кавитации и ультразвука на импульсные разряды в случае конического торца катода увеличивает MRR в 5 раз по сравнению со случаем катода цилиндрической формы.

Таким образом, выявлено влияние формы торца катода на скорость удаления диэлектрических материалов. Применение конической формы торца катода при обработке диэлектриков и композитов с использованием электроэрозии в электролитах NaOH и KOH более продуктивно, чем других форм торца. В частности, было определено, что скорость съема материала при использовании конического конца катода в 5 раз выше, чем при применении цилиндрического. Сделано предположение, что возможность разветвления парогазового слоя вблизи конического катода обеспечивает лучшее кавитационное схлопывание пузырьков, а также, что „естественное“ наложение кавитации и ультразвука на импульсные разряды при использовании катода с коническим концом приводит к увеличению производительности. В целом мы подтвердили преимущество конического катода над цилиндрическим при обработке

композитов. Предложенная форма торца катода обеспечивает повышенную скорость удаления диэлектриков без изменения физических и технических параметров разряда.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F.N. Leão, *Optimization of EDM fast hole drilling for aerospace applications*, Ph. D. thesis (University of Nottingham, UK, 2007).
- [2] I. Ayesta, B. Izquierdo, J.A. Sanchez, J.M. Ramos, S. Plaza, I. Pombo, N. Ortega, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, **37**, 273 (2016). DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.003
- [3] J. Binner, M. Porter, B. Baker, J. Zou, V. Venkatachalam, V.R. Diaz, T.S. Murthy, *Int. Mater. Rev.*, **65** (7), 389 (2020). DOI: 10.1080/09506608.2019.1652006
- [4] Y. Wang, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1744** (2), 022098 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1744/2/022098
- [5] H. Gangarao, *Infrastructure applications of fiber-reinforced polymer composites* (William Andrew Publ., 2017), p. 675–695.
- [6] G.S. Mann, L.P. Singh, P. Kumar, S. Singh, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **33** (8), 1145 (2020). DOI: 10.1177/0892705718816354
- [7] E. Boccardi, F.E. Ciraldo, A.R. Boccaccini, *MRS Bull.*, **42** (3), 226 (2017). DOI: 10.1557/mrs.2017.28
- [8] N.M. Abbas, D.G. Solomon, M.F. Bahari, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **47** (7-8), 1214 (2007). DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026
- [9] S. Mohanty, B.C. Routara, *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, **13** (2), 3518 (2016). DOI: 10.15282/ijame.13.2.2016.18.0290
- [10] A. Bilal, M.P. Jahan, D. Talamona, A. Perveen, *Micromachines*, **10** (1), 10 (2019). DOI: 10.3390/mi10010010
- [11] O. Flaño, I. Ayesta, B. Izquierdo, J.A. Sánchez, J.M. Ramos, *Procedia CIRP*, **68**, 405 (2018). DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.103
- [12] S. Plaza, J.A. Sanchez, E. Perez, R. Gil, B. Izquierdo, N. Ortega, I. Pombo, *Precision Eng.*, **38** (4), 821 (2014). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.010
- [13] G. D'Urso, C. Merla, *Precision Eng.*, **38** (4), 903 (2014). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.05.007
- [14] N. Pellicer, J. Ciurana, J. Delgado, *J. Intell. Manuf.*, **22** (4), 575 (2011). DOI: 10.1007/s10845-009-0320-8
- [15] E. Bassoli, L. Denti, A. Gatto, L. Iuliano, *J. Adv. Manuf. Technol.*, **86** (5), 2329 (2016). DOI: 10.1007/s00170-016-8339-4
- [16] П.В. Сяхович, в сб. *Инженерно-педагогическое образование в XXI веке* (БНТУ, Минск, 2017), ч. 1, с. 207.
- [17] А.В. Журин, *Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке*, автореф. канд. дис. (Тул. гос. ун-т, Тула, 2005).
- [18] Y.H. Jeong, B.K. Min, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **47** (12-13), 1817 (2007). DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.04.011
- [19] А.А. Зарипов, *Процессы при электроэрозионной обработке диэлектриков*, автореф. докт. дис. (Ин-т ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, 2019).
- [20] E.T. Abdugarimov, A.S. Mirkarimov, A.A. Zaripov, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **43** (2), 77 (2007). DOI: 10.3103/S1068375507020019
- [21] Heriyanto, F. Pahlevani, V. Sahajwalla, *J. Clean. Product.*, **227**, 119 (2019). DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.152
- [22] J.L. Thomason, *Composites A*, **127**, 105619 (2019). DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105619
- [23] Н.Э. Опиок, Ю.В. Витько, Ж.А. Мрочек, Ю.И. Суша, в сб. *Современные технологии и образование. Международный науч.-практ. конф.* (БНТУ, Минск, 2020), ч. 1, с. 60.
- [24] Q. Liu, Q. Zhang, G. Zhu, K. Wang, J. Zhang, C. Dong, *Mater. Manuf. Process.*, **31** (4), 391 (2016). DOI: 10.1080/10426914.2015.1059448
- [25] А.А. Зарипов, Х.Б. Ашуров, *Электрон. обраб. материалов*, **50** (2), 105 (2014).
- [26] А.А. Зарипов, К.В. Ашуров, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **47** (3), 197 (2011). DOI: 10.3103/S1068375511030021