

УДК 621.9.048.4

doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-74-78

# Сравнительная оценка электроэрозионной стойкости материалов в жидкой и газообразной средах

**А.Ф. Бойко<sup>1</sup>, И.Б. Ставицкий<sup>2</sup>**<sup>1</sup> БГТУ им. В.Г. Шухова<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Comparative Evaluation of the Electrical Erosion Resistance of Materials in Liquid and Gaseous Media

**A.F. Boyko<sup>1</sup>, I.B. Stavitskiy<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

Изложены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа изменения электроэрозионной стойкости материалов при электроэрозионной обработке в жидкой и газообразной рабочих средах. На основе экспериментальных данных получены математические модели зависимости электроэрозионной стойкости от теплофизических свойств материалов для условий обеих сред. Установлено, что при замене жидкой межэлектродной среды на газообразную, что наблюдается при электроэрозионной обработке глубоких полостей и отверстий, многократно изменяется степень влияния теплоемкости, плотности, теплопроводности и температуры плавления материала на его электроэрозионную стойкость.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, износ электрода-инструмента, электроэрозионная стойкость материала

The results of experimental studies and a comparative analysis of changes in the electroerosive resistance of materials during electroerosive machining in liquid and gaseous working media are represented. Based on experimental data, the mathematical models of the dependence of electroerosive resistance on the thermophysical properties of materials for the conditions of both media were obtained. It is established that when replacing the liquid interelectrode medium with a gaseous one, which is observed during electroerosion stitching of deep cavities and holes, the degree of influence of the heat capacity, density, thermal conductivity and board temperature of the material on its electrical erosion resistance changes reiteratedly.

**Keywords:** EDM, tool electrode wear, material EDM resistance

Известно [1–5], что при электроэрозионной обработке (ЭЭО) глубоких отверстий, в том числе малого диаметра, износ стержневого электрода-инструмента (ЭИ) существенно возрастает на глубине более 20...30 диаметров отверстия. Это связано с трудностью поступления рабочей жидкости в торцевой межэлектродный промежуток (МЭП) и, как следствие, с увеличе-

нием доли разрядных импульсов, протекающих в газообразной межэлектродной среде, а не в жидкости.

Цель работы — установление различия многофакторных связей износа ЭИ в жидкой и газообразной рабочих средах, принятие эффективных решений по его снижению, и, соответственно, по повышению точности ЭЭО.

Существует несколько способов оценки электроэрозионной стойкости (ЭЭС) материала [3–11]: по коэффициенту обрабатываемости материала, критерию Палатника, с помощью решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала и др. Каждый из способов имеет преимущества и недостатки.

В работе [11] получена математическая модель зависимости ЭЭС материала  $C_э$  от его теплофизических свойств при ЭЭО в жидкой среде

$$C_э = 4,7897 \cdot 10^{-45} c^{17,0515} \rho^{-16,2127} \lambda^{23,6616} t_{пл}^{5,9267}, \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  — теплопроводность материала, Вт/(м·К);  $t_{пл}$  — температура плавления материала, °С.

Зависимость (1) установлена при ЭЭО в керосине группы материалов (молибдена, железа, никеля, латуни, цинка) с использованием электрических импульсов длительностью  $t_{и} = 10^{-4}$  с и энергией  $W_{и} = 2,31$  Дж.

Для оценки ЭЭС материалов в газообразной среде использованы экспериментальные данные работ [12, 13], где изложены результаты исследований размеров единичных лунок на вольфрам, молибдене, железе, цинке и никеле, полученные при воздействии на эти материалы электрических разрядов, проходящих в воздушной среде при электроискровом упрочнении.

Среднестатистическая энергия электрических импульсов, созданных с помощью РС-генератора импульсов, составляла 1 Дж. Для оценки ЭЭС материалов использована методика, аналогичная изложенной в работе [11]:

$$C_э = \frac{W_{и}}{V_{л}}, \quad (2)$$

где  $W_{и}$  — энергия электрического импульса, Дж;  $V_{л}$  — объем получаемой лунки, мм<sup>3</sup>.

Согласно формуле (2), ЭЭС  $C_э$  численно равна энергии электрического импульса (или серии импульсов), необходимой для удаления 1 мм<sup>3</sup> материала ЭИ при ЭЭО в жидкой или газообразной среде.

Для нахождения эмпирической зависимости ЭЭС  $C_э$  от теплофизических свойств исследуемых материалов использована математическая модель, приведенная в работах [1, 11]:

$$C_э = k_{пр} c^m \rho^{n_1} \lambda^{n_2} t_{пл}^{n_3}, \quad (3)$$

где  $k_{пр}$  — коэффициент пропорциональности;  $n_1, \dots, n_3$  — искомые показатели степени.

Для определения коэффициента пропорциональности и показателей степени в формуле (3) воспользуемся экспериментальными данными работ [12, 13], где приведены объемы лунок  $V_{л}$ , полученные на указанных материалах при энергии импульса  $W_{и} = 1$  Дж. Результаты расчета ЭЭС  $C_э$  по формуле (2) приведены в табл. 1, а необходимые для составления пяти уравнений с пятью неизвестными теплофизические свойства исследуемых материалов [14] — в табл. 2.

Логарифмируя уравнение (3), приводим его к линейному виду

$$\ln C_э = \ln k_{пр} + n_1 \ln c + n_2 \ln \rho + n_3 \ln \lambda + n_4 \ln t_{пл}. \quad (4)$$

Подставляя данные из табл. 1 и 2 в уравнение (4), получаем систему линейных уравнений с неизвестными  $k_{пр}, n_1, n_2, n_3, n_4$ :

$$\begin{cases} \ln 45,85053 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 134 + n_2 \ln 19200 + \\ \quad + n_3 \ln 163 + n_4 \ln 3410; \\ \ln 40,0 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 247 + n_2 \ln 10300 + \\ \quad + n_3 \ln 140 + n_4 \ln 2622; \\ \ln 7,51880 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 440 + n_2 \ln 7870 + \\ \quad + n_3 \ln 87 + n_4 \ln 1539; \\ \ln 5,00375 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 440 + n_2 \ln 8750 + \\ \quad + n_3 \ln 93 + n_4 \ln 1453; \\ \ln 43,42718 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 381 + n_2 \ln 7100 + \\ \quad + n_3 \ln 112,8 + n_4 \ln 419,4. \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5), находим искомые параметры

$$\begin{aligned} k_{пр} &= 1,3975 \cdot 10^{27}; \quad n_1 = -4,29797; \\ n_2 &= -4,1733; \quad n_3 = 0,574; \quad n_4 = 0,0747. \end{aligned}$$

После подстановки найденных параметров в уравнение (4) и потенцирования, получаем искомое уравнение

$$C_э = 1,3975 \cdot 10^{27} c^{-4,298} \rho^{-4,1733} \lambda^{0,574} t_{пл}^{0,0747}. \quad (6)$$

Таблица 1

Экспериментальные значения ЭЭС различных материалов при ЭЭО в воздушной среде с энергией импульса  $W_{и} = 1$  Дж

Материал	$V_{л}$ , мм <sup>3</sup>	$C_э$ , Дж/мм <sup>3</sup>
Вольфрам	0,02181	45,85053
Молибден	0,02500	40,00000
Железо	0,13300	7,51880
Никель	0,19985	5,00375
Цинк	0,29178	3,42718

Таблица 2

**Теплофизические свойства  
исследуемых материалов**

Материал	$c$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$t_{пл}$ , °С
Вольфрам	134	19200	163,0	3410,0
Молибден	247	10300	140,0	2622,0
Железо	440	7870	87,0	1539,0
Никель	440	8750	93,0	1453,0
Цинк	381	7100	112,8	419,4

Сравнение уравнений (6) и (1) для вычисления ЭЭС материалов в газообразной и жидкой средах позволяет заключить следующее.

- в случае замены жидкой рабочей среды на газообразную при ЭЭО удельная теплоемкость  $c$  начинает отрицательно влиять на ЭЭС материалов (меняется знак ее показателя степени);

- изменение физических процессов ЭЭО при замене жидкой межэлектродной среды на газообразную приводит к возможному снижению ЭЭС молибдена в 7 раз, железа и никеля — в 30 раз, цинка — в 6–7 раз; очевидно, что эта закономерность распространяется и на другие материалы;

- существенный износ ЭИ при ЭЭО глубоких полостей и отверстий наблюдается не только вследствие ухудшения эвакуации продуктов эрозии и возникновения дополнительных аномаль-

ных электрических разрядов, но и из-за замены жидкой рабочей среды на газообразную.

## Выводы

1. Как показали проведенные эксперименты и полученные математические зависимости, многократно изменяется степень влияния теплоемкости, плотности, теплопроводности и температуры плавления материала на его ЭЭС, что вызывает существенный износ ЭИ.

2. При ЭЭО глубоких полостей и отверстий стержневым ЭИ без прокачки рабочей жидкости ее самообновление в торцевом МЭП оказывается недостаточным, а доля разрядных электрических импульсов в газообразной среде становится преобладающей. Поэтому при ЭЭО глубоких полостей и отверстий необходима искусственная интенсификация процесса обновления рабочей жидкости в МЭП: вибрация и вращение ЭИ, постоянная или импульсная прокачка рабочей жидкости через полый ЭИ, осевая релаксация положения ЭИ, планетарное относительное движение ЭИ и электрода-детали и т. д.

3. При ЭЭО глубоких полостей и отверстий следует назначать такие режимы ЭЭО, которые не приведут к полному вытеснению рабочей жидкости из МЭП образующимися в результате электрических разрядов газами.

## Литература

- [1] Бойко А.Ф. *Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий*. Москва, Инфра-М, 2019. 298 с.
- [2] Ставицкий И.Б. Расчет параметров подачи рабочей жидкости через трубчатый электрод-инструмент при электроэрозионном прошивании отверстий малого диаметра. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 11. URL: <http://engineering-science.ru/doc/850013.html>
- [3] Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. *Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
- [4] Debin S. Effect of dielectric medium on electrode wear in micro-electrical discharge milling. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, no. 1, pp. 83–88.
- [5] Janmanee P., Muttamara A. A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode. *ITJEMAST*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 471–481.
- [6] Yusoff A.R., Ghazalli Z., Hussain H.C. Determining optimum EDM parameters in drilling a small hole by Taguchi method. *Int. J. Manuf. Technol. Manag.*, 2009, vol. 17, no. 4, doi: <http://doi.org/10.1504/ijmtm.2009.023952>
- [7] Попилов Л.Я. *Основы электротехнологии и новые ее разновидности*. Ленинград, Машиностроение, 1971. 213 с.
- [8] Ставицкий И.Б. Определение рациональных режимов электроэрозионной обработки на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение»*, 2011, с. 164–171.

- [9] Оглезнев Н.Д. Исследование износостойкости электродов-инструментов из композиционных материалов для электроэрозионной обработки. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2014, т. 16, № 3, с. 54–69.
- [10] Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *IJMER*, 2013, vol. 3, pp. 1263–1267.
- [11] Бойко А.Ф., Ставицкий И.Б. Критерий оценки электроэрозионной стойкости материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 42–46, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-42-46>
- [12] Попилов Л.Я. *Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов*. Ленинград, Машиностроение, 1971. 544 с.
- [13] Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д. Закономерности эрозии катода и анода при электроискровом упрочнении. *Электронная обработка материалов*, 1969, № 1, с. 25–29.
- [14] Кухлинг Х. *Справочник по физике*. Москва, Мир, 1982. 519 с.

## References

- [1] Boyko A.F. *Effektivnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya elektroerozionnoy proshivki pretzionnykh mikrootverstiy* [Effective technology and equipment for electrocorrosion perforation of precision microholes]. Moscow, Infra-M Publ., 2019. 298 p. (In Russ.).
- [2] Stavitskiy I.B. Calculating the fluid supply parameters through the tubular electrode in electrodischarge sinking of small diameter holes. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 11. URL: <http://engineering-science.ru/doc/850013.html>
- [3] Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electrocorrosion processing of electrocorrosion technique parts]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 437 p. (In Russ.).
- [4] Debin S. Effect of dielectric medium on electrode wear in micro-electrical discharge milling. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, no. 1, pp. 83–88. (In Russ.).
- [5] Janmanee P., Muttamaraa A. A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode. *ITJEMAST*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 471–481.
- [6] Yusoff A.R., Ghazalli Z., Hussain H.C. Determining optimum EDM parameters in drilling a small hole by Taguchi method. *Int. J. Manuf. Technol. Manag.*, 2009, vol. 17, no. 4, doi: <http://doi.org/10.1504/ijmtm.2009.023952>
- [7] Popilov L.Ya. *Osnovy elektrotekhnologii i novye ee raznovidnosti* [Basics of electrotechnics and its new types]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 213 p. (In Russ.).
- [8] Stavitskiy I.B. Finding optimum regimes of electrical discharge machining based on solving thermal task on phase boundary displacement. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana*, spec. iss. «Energetic and transport machine building», 2011, pp. 164–171. (In Russ.).
- [9] Ogleznev N.D. Study erosion resistance electrode tool from composite materials for electrical discharge machining. *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2014, vol. 16, no. 3, pp. 54–69. (In Russ.).
- [10] Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *IJMER*, 2013, vol. 3, pp. 1263–1267. (In Russ.).
- [11] Boyko A.F., Stavitskiy I.B. Criterion for Evaluating the Electrical Erosion Resistance of Materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 8, pp. 42–46, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-42-46> (in Russ.).
- [12] Popilov L.Ya. *Spravochnik po elektricheskim i ul'trazvukovym metodam obrabotki materialov* [Handbook on electrical and ultrasound methods of material treatment]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 544 p. (In Russ.).
- [13] Samsonov G.V., Verkhoturov A.D. Laws of cathode and anode erosion at electrosark hardening. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1969, no. 1, pp. 25–29. (In Russ.).
- [14] Kuchling H. *Taschenbuch der Physik*. Leipzig, Carl Hanser, 1980. 711 p. (Russ. ed.: *Spravochnik po fizike*. Moscow, Mir Publ., 1982. 519 p.)

## Информация об авторах

**БОЙКО Анатолий Федорович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, Белгород, Российская Федерация, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: boyko\_1947@bk.ru).

**СТАВИЦКИЙ Иван Борисович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vats59@mail.ru).

## Information about the authors

**BOYKO Anatoliy Fedorovich** — Doctor of Science, Professor of Engineering technology Department. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov (308012, Belgorod, Russian Federation, Kostyukova street, Bldg. 46, e-mail: boyko\_1947@bk.ru).

**STAVITSKIY Ivan Borisovich** — Ph.D. in Engineering Science, Associate professor of «Instrumental equipment and technologies» Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vats59@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бойко А.Ф., Ставицкий И.Б. Сравнительная оценка электроэрозионной стойкости материалов в жидкой и газообразной средах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 74–78, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-74-78

### Please cite this article in English as:

Boyko A.F., Stavitskiy I.B. Comparative Evaluation of the Electrical Erosion Resistance of Materials in Liquid and Gaseous Media. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 10, pp. 74–78, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-74-78



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям монографию

### «Оборудование для лазерной обработки»

**Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров**

В монографии рассмотрены инженерно-физические основы построения и функционирования технологических лазеров, применяемых в машиностроении. Даны классификация и описание принципов работы твердотельных и газовых лазеров, их характеристики, показаны особенности эксплуатации, современное состояние и перспективы развития. Большое внимание уделено оптическим системам технологических лазеров. Представлено оборудование для промышленной реализации основных процессов лазерной обработки, в том числе аддитивных лазерных технологий. Описаны методы и средства измерения параметров лазерного излучения.

Изложены вопросы лазерной безопасности и охраны труда.

Для инженерно-технических работников, занимающихся использованием технологических лазеров, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>