

УДК 621.9.048.4

doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-42-46

# Критерий оценки электроэрозионной стойкости материалов

**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

## Criterion for Evaluating the Electrical Erosion Resistance of Materials

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

Изложена методика получения критерия электроэрозионной стойкости материалов, которые применяют для изготовления электродов, используемых при электроэрозионной обработке. Выявлено, что оценка электроэрозионной стойкости материалов по критерию Палатника является неточной. Показано, что электроэрозионная стойкость находится в обратной зависимости от плотности материала. Установлено, что наибольшее влияние на электроэрозионную стойкость оказывает не температура плавления, а теплопроводность материала. Дальнейшие исследования будут направлены на получение универсальной высокоточной математической модели критерия электроэрозионной стойкости материала по его теплофизическим характеристикам.

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

The article describes a method for obtaining a criterion for the electrical erosion resistance of materials used for the manufacture of electrodes for electric erosion machining. The assessment of the electrical erosion resistance of materials according to the Palatnik criterion was found to be inaccurate. It is shown that the electrical erosion resistance is inversely related to the material density and that the material thermal conductivity and not its melting temperature exerts the greatest effect on it. Further research will be aimed at obtaining a universal high-precision mathematical model of the criterion for the material electrical erosion resistance according to its thermophysical characteristics.

**Keywords:** electrical erosion machining, tool electrode wear, electrical erosion resistance

Важным технологическим показателем электроэрозионной обработки является износ электрода-инструмента (ЭИ), который оказывает негативное влияние на ее точность, а следовательно, и на качество обрабатываемых деталей. На износ ЭИ влияют многие факторы: режим обработки, рабочая жидкость, материалы ЭИ и заготовки, условия эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка и др.

При прочих равных условиях износ ЭИ во многом зависит от материала, из которого он изготовлен. Поэтому при выборе материала ЭИ учитывают его важнейшую характеристику — электроэрозионную стойкость (ЭЭС). Известно несколько способов оценки ЭЭС материала [1–14]: по коэффициенту обрабатываемости материала, критерию Палатника, путем решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала и др. Каждый из

этих способов имеет свои преимущества и недостатки.

Цель работы — получение зависимости, позволяющей легко и оперативно оценивать ЭЭС материалов, не прибегая к сложным математическим вычислениям, и обладающей более высокой точностью, чем, например, критерий Палатника.

Экспериментально ЭЭС материала удобно оценить с помощью критерия

$$C_э = \frac{W_и}{V_л}, \text{ Дж/мм}^3, \quad (1)$$

где  $W_и$  — энергия электрического импульса, Дж;  $V_л$  — объем лунки, полученной от воздействия электрического импульса энергией  $W_и$ , мм<sup>3</sup>.

Согласно формуле (1),  $C_э$  численно равна энергии электрического импульса или серии импульсов, необходимых для удаления единицы объема материала в процессе электроэрозионной обработки. Таким образом, чем больше требуется энергии импульса или серии импульсов для удаления единицы объема материала, тем выше его ЭЭС.

Этот критерий позволяет экспериментально определить ЭЭС различных материалов, но при прогнозировании  $C_э$  новых материалов часто возникает необходимость в его теоретической оценке без проведения экспериментов. Для этого можно воспользоваться теплофизическими характеристиками материала.

Известен простой способ оценки ЭЭС материала по критерию фазовых превращений Палатника [1, 5, 7]

$$\Pi = c\rho\lambda t_{пл}^2, \quad (2)$$

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.

Считается, что чем больше критерий Палатника, тем выше ЭЭС материала. Однако числовое значение критерия  $\Pi$ , являясь относительным общезначимым показателем, можно использовать только для приблизительной оценки ЭЭС и, как показала практика, не всегда верной.

Недостатком математической модели с использованием критерия Палатника является отсутствие экспериментального подтверждения степени влияния каждой его составляющей на ЭЭС. В формуле (2) теплофизические величины

$c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  даны в первой степени, а  $t_{пл}$  — во второй.

Гораздо больший научный и практический интерес представляет установление более точной зависимости ЭЭС материалов от их теплофизических свойств с помощью более сложной степенной функции

$$C_э = k_{пр} c^{n_1} \rho^{n_2} \lambda^{n_3} t_{пл}^{n_4}, \quad (3)$$

где  $k_{пр}$  — коэффициент пропорциональности;  $n_1, \dots, n_4$  — искомые показатели степени.

В новой предлагаемой модели (3) подтвержден факт влияния теплофизических свойств  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $t_{пл}$  материала на ЭЭС, причем степень их влияния более точно оценивается значениями  $n_1, n_2, n_3, n_4$ , а характер (прямая или обратная зависимость) — их знаками. Так как параметры  $k_{пр}, n_1, n_2, n_3, n_4$  определяют по экспериментальным данным, эта модель расчета критерия ЭЭС является более точной.

Рассмотрим методику получения критерия ЭЭС  $C_э$  согласно выражению (3) для ограниченной группы материалов — молибдена, железа, никеля, латуни и цинка. Для этого используем экспериментальные данные, полученные в работе [5], где изложены результаты исследований электроэрозионной обработки указанных материалов с применением керосина в качестве рабочей жидкости и электрических импульсов длительностью  $10^{-4}$  с и энергией  $W_и = 2,31$  Дж.

Экспериментальные значения ЭЭС определим по формуле

$$C_э = \frac{W_и n}{1000}, \quad (4)$$

где  $n$  — число импульсов с энергией  $W_и = 2,31$  Дж для удаления с анода 1 см<sup>3</sup> исследуемого материала.

Результаты расчета по формуле (4) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Экспериментальные значения ЭЭС различных материалов при электроэрозионной обработке**

Материал	Число импульсов с энергией $W_и = 2,31$ Дж для удаления 1 см <sup>3</sup> материала с анода	ЭЭС, Дж/мм <sup>3</sup>
Молибден	125 580	290,0
Железо	102 270	236,2
Никель	63 210	146,0
Латунь	41 580	96,0
Цинк	9786	22,6

Таблица 2

## Теплофизические свойства исследуемых материалов

Материал	Удельная теплоемкость, $c$ , Дж/(кг·К)	Плотность материала, $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Температура плавления, $t_{пл}$ , °С
Молибден	247	10,30	140,0	2622,0
Железо	440	7,83	87,0	1539,0
Никель	440	8,75	93,0	1453,0
Латунь	383	8,50	111,0	920,0
Цинк	381	7,10	112,8	419,4

Теплофизические свойства исследуемых материалов приведены в табл. 2 [15].

Логарифмируя уравнение (3), приводим его к линейному виду

$$\ln C_3 = \ln k_{пр} + n_1 \ln c + n_2 \ln \rho + n_3 \ln \lambda + n_4 \ln t_{пл}. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (5) данные из табл. 1 и 2, получаем систему линейных уравнений с неизвестными параметрами  $k_{пр}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln 290 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 247 + n_2 \ln 10\,300 + \\ \quad + n_3 \ln 140 + n_4 \ln 2622; \\ \ln 236,2 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 440 + n_2 \ln 7830 + \\ \quad + n_3 \ln 87 + n_4 \ln 1539; \\ \ln 146 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 440 + n_2 \ln 8750 + \\ \quad + n_3 \ln 93 + n_4 \ln 1453; \\ \ln 96 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 383 + n_2 \ln 8500 + \\ \quad + n_3 \ln 111 + n_4 \ln 920; \\ \ln 22,6 = \ln k_{пр} + n_1 \ln 381 + n_2 \ln 7100 + \\ \quad + n_3 \ln 112,8 + n_4 \ln 419,4. \end{array} \right. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (6), находим значения параметров:

$$k_{пр} = 4,7897 \cdot 10^{-45}; \quad n_1 = 17,0515; \quad n_2 = -16,2127; \\ n_3 = 23,6616; \quad n_4 = 5,9267.$$

После подстановки этих коэффициентов в уравнение (5) и потенцирования, получаем искомое уравнение

$$C_3 = 4,7897 \cdot 10^{-45} c^{17,0515} \rho^{-16,2127} \lambda^{23,6616} t_{пл}^{5,9267}. \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) позволяет сделать важные для теории и практики электроэрозионной обработки материалов заключения:

- эмпирическая зависимость (7) ЭЭС материалов от их теплофизических свойств обладает более высокой точностью, чем критерий Палатника (2), так как она базируется на экспериментальных данных;

латника (2), так как она базируется на экспериментальных данных;

- зависимость (7) отличается от критерия Палатника (2) тем, что рассчитанная по ней ЭЭС находится не в прямой, а в обратной зависимости от плотности материала  $\rho$  (показатель степени при  $\rho$  отрицателен,  $n_2 = -16,2127$ ); это подтверждает применение в практике электроэрозионной обработки инструментов из материалов с малой плотностью — композиционных медно-графитовых, медно-вольфрамовых и других, обладающих высокой эрозионной стойкостью;

- в отличие от критерия Палатника (2) в полученной формуле (7) на ЭЭС в наибольшей степени влияет теплопроводность  $\lambda$  ( $n_3 = 23,6616$ ), а в наименьшей — температура плавления  $t_{пл}$  ( $n_4 = 5,9267$ );

- для получения более универсальной и точной модели ЭЭС необходимо расширить диапазон исследуемых материалов, а следовательно, провести большое количество экспериментов с существенным увеличением объема вычислений; число уравнений системы (6) равно числу исследуемых материалов, поэтому оно будет существенно превышать число искомых коэффициентов, что потребует применения современных вычислительных компьютерных технологий.

## Выводы

1. Получена зависимость (7), обеспечивающая легкую и оперативную оценку ЭЭС материалов без сложных математических вычислений. Однако, несмотря на более высокую точность, эта зависимость по сравнению с критерием Палатника позволяет лишь оценивать ЭЭС материалов, так как не учитывает динамику теплового потока, а влияние длитель-

ности импульсов на ЭЭС учтено лишь через теплопроводность материала.

2. Для еще более точной оценки ЭЭС материалов необходимо использовать более сложные методики, например основанные на реше-

нии тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала. Однако в настоящее время такие методики находятся в стадии разработки и требуют проведения дополнительных исследований.

## Литература

- [1] Попилов Л.Я. *Основы электротехнологии и новые ее разновидности*. Ленинград, Машиностроение, 1971. 213 с.
- [2] Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. *Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
- [3] Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. *Физические основы электроэрозионной обработки*. Москва, Машиностроение, 1977. 43 с.
- [4] 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, 2011, спец. вып. Энергетическое и транспортное машиностроение*, с. 67–74.
- [5] Попилов Л.Я. *Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов*. Ленинград, Машиностроение, 1971. 544 с.
- [6] Немилев Е.Ф. *Справочник по электроэрозионной обработке материалов*. Ленинград, Машиностроение, 1989. 162 с.
- [7] Аренков А.Б. *Основы электрофизических методов обработки*. Ленинград, Машиностроение, 1967. 372 с.
- [8] Смоленцев В.П., ред. *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов*. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента. Москва, Высшая школа, 1983. 208 с.
- [9] Съянов С.Ю. Технологическое управление износом электрода-инструмента и производительностью процесса при электроэрозионной обработке. *Научные технологии в машиностроении*, 2015, № 5, с. 12–16.
- [10] Ставицкий И.Б., Шевченко А.С. Определение параметров импульсов электроэрозионной обработки титана на основе решения тепловой задачи Стефана. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 3, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1599>
- [11] Оглезнев Н.Д. Исследование износостойкости электродов-инструментов из композиционных материалов для электроэрозионной обработки. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2014, т. 16, № 3, с. 54–69.
- [12] Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *IJMER*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 1263–1267.
- [13] Gupta S.C. *The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis*. JAI Press, 2003. 404 p.
- [14] Tahmasebi Pour Gh., Tahmasebi Pour Y., Ghoreishi M. Thermal model of the electro-spark nanomachining process. *IJMMM*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 56–59, doi: <http://dx.doi.org/10.7763/IJMMM.2014.V2.99>
- [15] Кухлинг Х. *Справочник по физике*. Москва, Мир, 1982. 519 с.

## References

- [1] Popilov L.Ya. *Osnovy elektrotekhnologii i novye ee raznovidnosti* [Fundamentals of electro-technics and its new forms]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 213 p. (In Russ.).
- [2] Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electric erosion machining of aerospace engineering items]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 437 p. (In Russ.).
- [3] Zolotykh B.N., Mel'der R.R. *Fizicheskie osnovy elektroerozionnoy obrabotki* [Physical foundations of electric erosion machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 43 p. (In Russ.).
- [4] Stavitskiy I.B. Optimization of electrical discharge machining process for titanium alloy BT14 based on the solution of the heat task of moving the boundary of the phase conversion of

- material. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana*, 2011, spec. iss. Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie [Energetic and transport machine building], pp. 67–74. (In Russ.).
- [5] Popilov L.Ya. *Spravochnik po elektricheskim i ul'trazvukovym metodam obrabotki materialov* [Handbook on electrical and ultrasound methods of metal treatment]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 544 p. (In Russ.).
- [6] Nemilov E.F. *Spravochnik po elektroerozionnoy obrabotke materialov* [Handbook on electric erosion material machining]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989. 162 p. (In Russ.).
- [7] Arenkov A.B. *Osnovy elektrofizicheskikh metodov obrabotki* [Basics of electrophysical machining methods]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1967. 372 p. (In Russ.).
- [8] Smolentsev V.P., ed. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov*. T. 1. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta [Electrophysical and electrochemical methods of material machining. Vol. 1. Material treatment by tools]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 208 p. (In Russ.).
- [9] S"yanov S.Yu. Technological management of wear of the electrode-tool and the performance of the process in electroerosion machining. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2015, no. 5, pp. 12–16. (In Russ.).
- [10] Stavitskiy I.B., Shevchenko A.S. Definition of titanium EDM pulse parameters based on solution of the Stefan heat problem. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 3, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1599> (in Russ.).
- [11] Ogleznev N.D. Study erosion resistance electrode tool from composite materials for electrical discharge machining. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2014, vol. 16, no. 3, pp. 54–69. (In Russ.).
- [12] Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *IJMER*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 1263–1267.
- [13] Gupta S.C. *The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis*. JAI Press, 2003. 404 p.
- [14] Tahmasebi Pour Gh., Tahmasebi Pour Y., Ghoreishi M. Thermal model of the electro-spark nanomachining process. *IJMMM*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 56–59, doi: <http://dx.doi.org/10.7763/IJMMM.2014.V2.99>
- [15] Kuchling H. *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverlag Leipzig, 1980. 711 p. (Russ. ed.: *Spravochnik po fizike*. Moscow, Mir Publ., 1982. 519 p.)

Статья поступила в редакцию 24.03.2022

## 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](mailto: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](mailto:vats59@mail.ru)).

## Information about the authors

**BOYKO Anatoliy Fedorovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Manufacturing technology. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov (308012, Belgorod, Russian Federation, Kostyukova st., Bldg. 46, e-mail: [boyko\\_1947@bk.ru](mailto:boyko_1947@bk.ru)).

**STAVITSKY Ivan Borisovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Tool Engineering and Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [vats59@mail.ru](mailto:vats59@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бойко А.Ф., Ставицкий И.Б. Критерий оценки электроэрозионной стойкости материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 42–46, doi: [10.18698/0536-1044-2022-8-42-46](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-42-46)

### Please cite this article in English as:

Boyko A.F., Stavitskiy I.B. Criterion for Evaluating the Electrical Erosion Resistance of Materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, pp. 42–46, doi: [10.18698/0536-1044-2022-8-42-46](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-42-46)