

Определение параметров импульсов электроэрозионной обработки титана на основе решения тепловой задачи Стефана

© И.Б. Ставицкий, А.С. Шевченко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты теоретических исследований обрабатываемости титана методом электроэрозионной обработки, основанных на решении тепловой задачи Стефана. Предложена методика определения параметров импульсов электроэрозионной обработки титана и даны рекомендации по их назначению. Определены минимальные значения плотности теплового потока и длительности его импульсов, необходимые для реализации процесса электроэрозионной обработки титана, и установлены зависимости между этими минимальными величинами. Определены максимальные значения длительности импульсов тепловых потоков, действующих на титан, которые обеспечивают максимальный съем материала за один импульс, а также значения эффективной длительности тепловых потоков, обеспечивающих максимальную производительность процесса электроэрозионной обработки титана в соответствии с используемой плотностью теплового потока.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, параметры импульсов, обрабатываемость титана, плотность тепловых потоков, длительность электрических импульсов

Введение. В настоящее время проблема определения параметров импульсов электроэрозионной обработки и особенно их длительности рассматривается как актуальная. На практике такие параметры, как правило, назначают по эмпирическим зависимостям. Однако они установлены только для небольшой номенклатуры традиционных для электроэрозионной обработки материалов. В их числе наиболее широко используемые инструментальные и конструкционные виды стали, меди и некоторые другие материалы. Расчетные зависимости для назначения параметров импульсов электроэрозионной обработки многих материалов пока не разработаны. Одним из таких материалов является титан. При электроэрозионной обработке титана часто наблюдается нестабильность, вызванная неправильными назначениями параметров импульсов, и, как следствие, крайне невысокая производительность процесса обработки. Особую сложность вызывают прошивочные электроэрозионные операции, электроэрозионная обработка деталей, которые имеют отверстия малого диаметра или небольшие полости. Несмотря на то что для изготовления аналогичных деталей из других материалов все чаще применяют метод электроэрозионной

обработки, для обработки титана и его сплавов применение метода ограничено. Поэтому определение рациональных параметров импульсов для обработки титана приобрело актуальность. Подчеркнем, что получение эмпирических зависимостей связано с проведением большого объема экспериментальных исследований, а значит, большими затратами времени и средств [1–5]. Кроме того, при получении указанных зависимостей обычно не учитывают физические особенности процесса электроэрозионной обработки. По эмпирическим зависимостям не всегда удастся назначить оптимальные параметры импульсов, которые бы обеспечивали максимально возможную производительность процесса формообразования. Поэтому в целях сокращения объема экспериментальных исследований при разработке расчетных зависимостей целесообразно проведение предварительного расчета на основе рассмотрения тепловых процессов, происходящих при электроэрозионной обработке непосредственно в зоне воздействия электрического разряда.

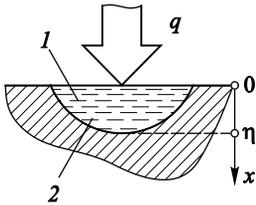


Рис. 1. Схема для определения границы фазового превращения материала:
1 — жидкая фаза; 2 — твердая фаза

Определение рациональных параметров импульсов электроэрозионной обработки титана. Оценить обрабатываемость материала методом электроэрозионной обработки и выбрать рациональные импульсы для нее можно путем решения задачи о перемещении границы фазового превращения материала — так называемой тепловой задачи Стефана [6], т. е. необходимо определить зависимость глубины проплавления материала от времени, исходя из физических свойств материала, плотности теплового потока q и длительности его действия (рис. 1).

Задачу Стефана для двухфазной системы описывают системой дифференциальных уравнений второго порядка, которые представляют собой основное уравнение теплопроводности для случая нестационарной теплопроводности в полубесконечном твердом теле [6, 7]:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \eta; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad \eta < x < \infty,$$

где $a_{1,2}$, $T_{1,2}$ — соответственно температуропроводность и температура жидкой (1) и твердой (2) фаз (см. рис. 1); η — координата границы фазового превращения.

В рассматриваемой задаче тело считают полубесконечным, так как размеры интересующей нас области формообразования намного меньше размеров электрода-заготовки.

Начальные и граничные условия задаем в виде

$$\begin{aligned}
 T_1(x, 0) &= T_{\text{эф}} = T_{\text{пл}}; \\
 T_2(x, 0) &= T_0; \\
 T_1(\eta, t) &= T_2(\eta, t) = T_{\text{пл}}; \\
 T(\infty, t) &= T_0; \\
 q &= -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0}; \\
 -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=\eta} + \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\eta} &= -\rho q_{\text{пл}} \frac{\partial \eta}{\partial t},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $T_{\text{эф}}$ — эффективная температура центра источника теплоты; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления обрабатываемого материала; T_0 — начальная температура (20 °C); ρ — плотность; $q_{\text{пл}}$ — скрытая теплота плавления; λ — теплопроводность.

Подробное описание рассматриваемой задачи представлено в работах [8–12].

Для решения системы уравнений (1) разработана специальная программа, основанная на неявной конечно-разностной схеме и методе прогонки решения системы линейных уравнений, которая позволяет анализировать процессы удаления материала при электроэрозионной обработке [8–12].

Известно [6], что первопричиной электрической эрозии материала является выделение энергии на электродах. Энергия $W_{\text{и}}$, выделяющаяся за время существования электрического импульса, определяется выражением

$$W_{\text{и}} = \int_0^t UI dt, \tag{3}$$

где U — напряжение на электродах; I — сила тока разряда; t — длительность импульса тока.

Таким образом, энергия $W_{\text{и}}$ однозначно определяется параметрами импульсов.

В свою очередь, энергия $W_{\text{и}}$ выделяется в столбе разряда ($W_{\text{с}}$), а также на катоде ($W_{\text{к}}$) и аноде ($W_{\text{а}}$), которые являются электродом-заготовкой и электродом-инструментом, т. е.

$$W_{\text{и}} = W_{\text{с}} + W_{\text{к}} + W_{\text{а}}. \tag{4}$$

При этом распределение энергии W_n между тремя ее составляющими W_c , W_k и W_a в настоящее время аналитическими методами расчета определить невозможно. Следовательно, не установлена корреляция между режимом обработки и тепловым потоком, возникающим вследствие прохождения электрического разряда.

Для определения рациональных параметров импульсов электроэрозионной обработки предлагается установить связь между обрабатываемостью исследуемого материала и материалов, для которых в настоящее время рациональные режимы определены [8]. Можно предположить, что материалы, имеющие совпадающие или близкие кривые $\eta(t)$, следует обрабатывать импульсами с одними и теми же параметрами. На рис. 2 видно, что у титана кривые $\eta(t)$ близки к кривой $\eta(t)$ стали 12X18H10T во всем рассматриваемом интервале времени действия источника теплоты q плотностью 10 ГВт/м^2 , определяемом длительностью импульсов $t = 0 \dots 30 \text{ мкс}$. Следовательно, при небольших плотностях теплового потока, соответствующих чистовым режимам электроэрозионной обработки, титан целесообразно обрабатывать импульсами с параметрами, близкими по значению к применяемым для обработки стали 12X18H10T. При электроэрозионной обработке с более высокой плотностью теплового потока, например 50 ГВт/м^2 , кривые $\eta(t)$ титана близки к кривой $\eta(t)$ стали 45 при длительности импульсов $t = 0,5 \dots 5 \text{ мкс}$. При еще больших значениях плотности теплового потока, например 100 и 300 ГВт/м^2 , кривые $\eta(t)$ титана все так же близки к кривой $\eta(t)$ стали 45 при $t = 0,5 \dots 5 \text{ мкс}$

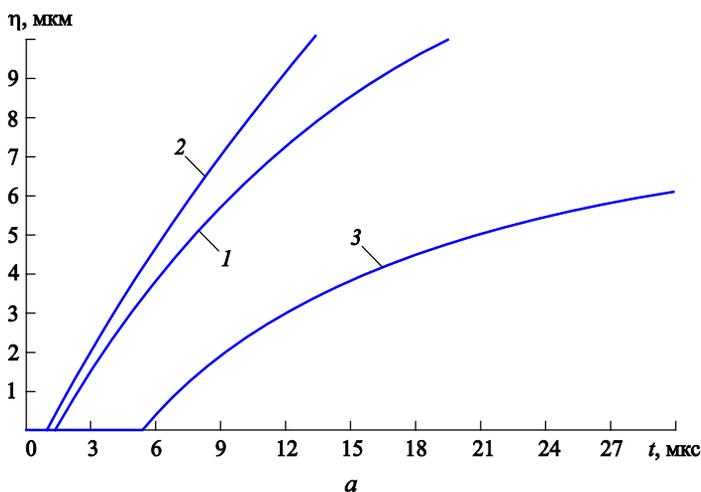


Рис. 2 (начало). Зависимость глубины η проплавления титана от длительности импульса t источника теплоты при плотности теплового потока $q = 10$ (а), 50 (б), 100 (в) и 300 ГВт/м^2 (г): 1 — титан; 2 — сталь 12X18H10T; 3 — сталь 45; 4 — медь; 5 — вольфрам

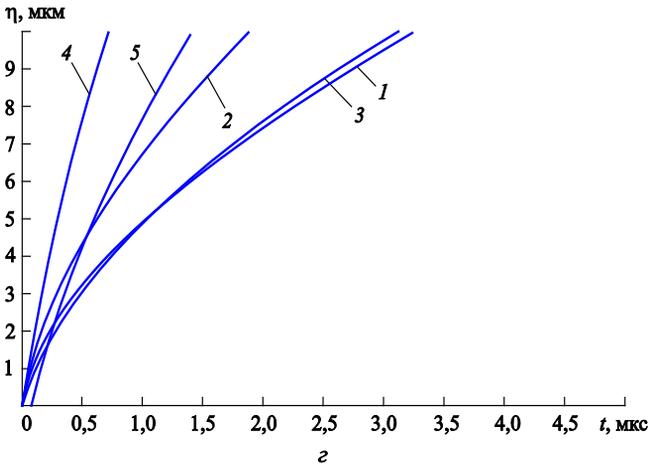
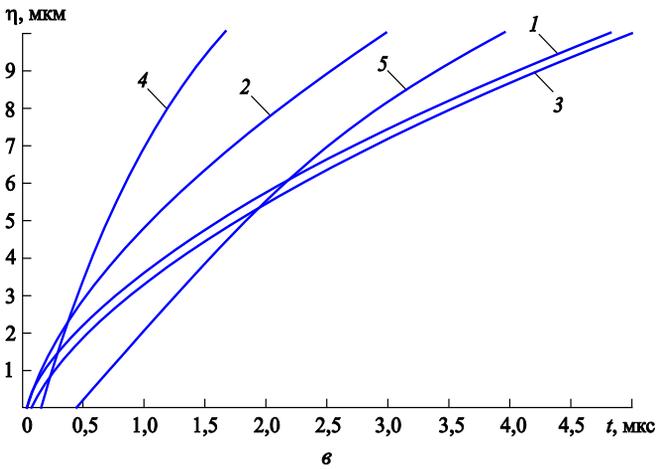
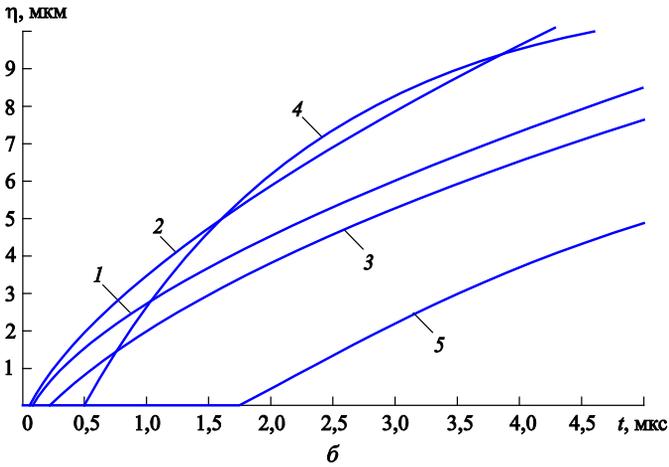


Рис. 2 (окончание). Зависимость глубины η проплавления титана от длительности импульса t источника теплоты при плотности теплового потока $q = 10$ (а), 50 (б), 100 (в) и 300 ГВт/м² (г): 1 — титан; 2 — сталь 12X18H10T; 3 — сталь 45; 4 — медь; 5 — вольфрам

и 0,2...3,2 мкс соответственно. Следовательно, при высокой плотности теплового потока, соответствующей черновым режимам электроэрозионной обработки, титан целесообразно обрабатывать с параметрами импульсов, близкими по значению к применяемым для обработки стали 45.

Следует отметить, что превышение указанных значений длительности импульсов для значений плотности тепловых потоков 50, 100 и 300 ГВт/м² приводит к глубине проплавления материала $\eta > 10$ мкм, что соответствует крайне грубому качеству обрабатываемой поверхности, поэтому эти значения длительности импульсов нами не рассматриваются.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет теоретически определить рациональные параметры импульсов для электроэрозионной обработки титана и существенно снизить объем экспериментальных исследований для создания эмпирических зависимостей.

Определение длительности импульсов. Одним из важных параметров импульса является его длительность. Известно [2], что этот параметр оказывает огромное влияние на производительность процесса обработки. Однако в большинстве случаев его значение назначают исходя из эмпирических зависимостей, которые известны для относительно небольшой номенклатуры обрабатываемых материалов или после проведения экспериментальных исследований. Часто выбранное значение этого параметра далеко от рационального. Проведенные с использованием описанной выше программы исследования позволили определить зависимость минимальной длительности импульсов t_{\min} , при которой начинает плавиться титан и соответственно становится возможным процесс электроэрозионной обработки, от плотности теплового потока q (рис. 3). При меньшей длительности импульсов титан в зоне действия теплового потока не успевает нагреться до температуры плавления и не удаляется.

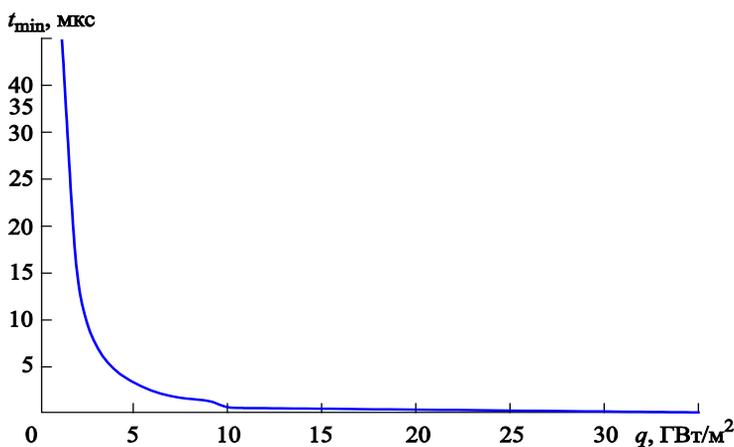


Рис. 3. Зависимость минимальной длительности импульсов t_{\min} от плотности теплового потока q

Известно, что при увеличении плотности теплового потока глубина проплавления обрабатываемого материала и объем образующейся на поверхности лунки возрастают, что приводит к росту производительности электроэрозионной обработки. Проведенные исследования показали, что при обработке титана глубина ее проплавления η при увеличении плотности теплового потока q достигает некоторого значения η_{\max} (рис. 4).

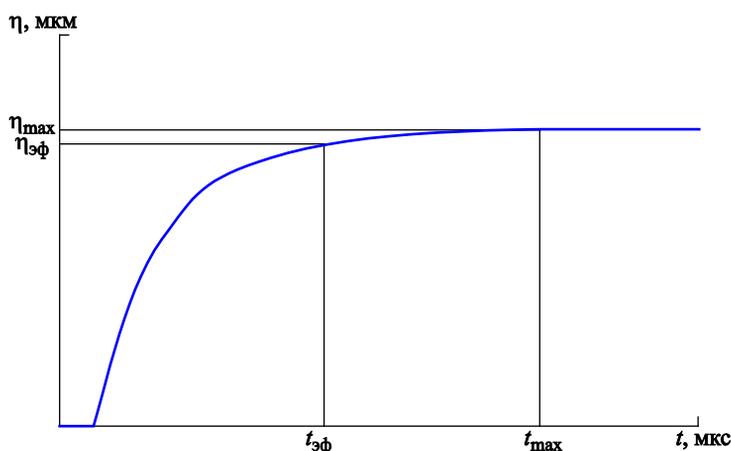


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t

Превышение этого значения возможно только при существенных увеличениях плотности теплового потока, что соответствует режимам неразмерной обработки. Сделанные при решении поставленной задачи допущения не позволяют провести расчеты при таких больших значениях плотностей тепловых потоков. Также очевидно, что каждому значению η_{\max} соответствует определенное значение длительности импульса t_{\max} , превышение которого не приведет к увеличению съема материала, но уменьшит максимальную частоту следования импульсов, а значит, производительность электроэрозионной обработки.

В общем виде зависимость $\eta(t)$ для титана представлена на рис. 5. Глубина проплавления значительно возрастает в течение времени $t_{\text{эф}}$, названном эффективной длительностью импульса. При этом материал проплавляется до эффективной глубины $\eta_{\text{эф}}$. В дальнейшем до времени t_{\max} происходит лишь незначительное увеличение глубины проплавления до η_{\max} . Таким образом, существенное увеличение длительности импульса от $t_{\text{эф}}$ до t_{\max} не приводит к значимому увеличению материала, удаляемого за один импульс, но заметно снижает максимальную частоту следования импульсов. Следовательно, электроэрозионную обработку целесообразно проводить при значениях

длительности импульсов, соответствующей значениям $t_{эф}$. При этом, несмотря на незначительное снижение объема удаляемого за один импульс материала, можно существенно увеличить частоту следования импульсов, а значит, увеличить съём материала в единицу времени, т. е. производительность электроэрозионной обработки. На рис. 6 представлены зависимости эффективной глубины проплавления $\eta_{эф}$ титана и эффективной длительности импульса $t_{эф}$ от плотности теплового потока q .

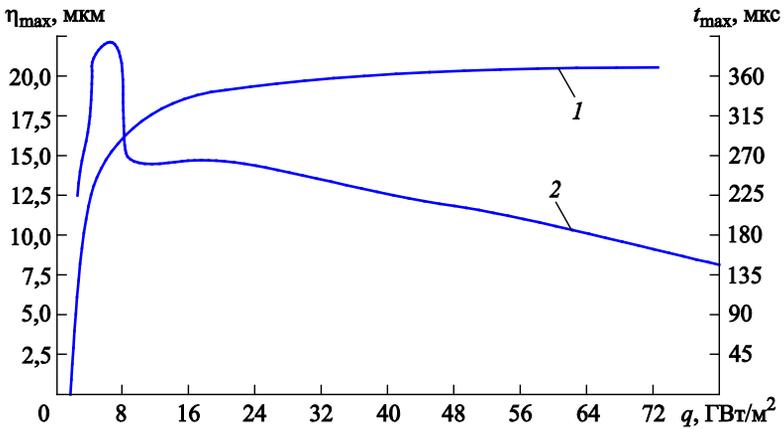


Рис. 5. Зависимость максимальной глубины проплавления η_{max} (1) и максимальной длительности импульса t_{max} (2) от плотности теплового потока q

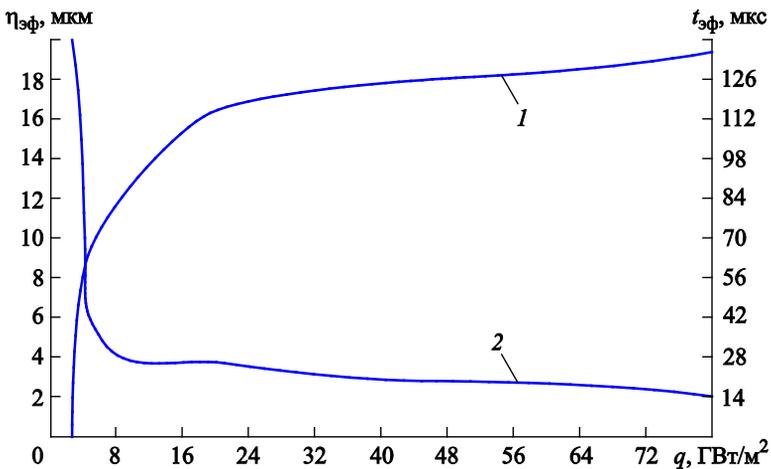


Рис. 6. Зависимость эффективной глубины проплавления $\eta_{эф}$ (1) и эффективной длительности импульса $t_{эф}$ (2) от плотности теплового потока q

Закключение. Проведенные исследования дали возможность получить следующие зависимости:

- глубины проплавления титана — от времени действия теплового потока (импульса тока);
- минимальной длительности импульса теплового источника, необходимой для начала плавления материала, — от плотности теплового потока;
- максимальных глубины проплавления и длительности импульса — от плотности теплового потока;
- эффективных глубины проплавления и длительности импульса — от плотности теплового потока.

Установлено, что при небольших плотностях теплового потока, соответствующих чистовым режимам электроэрозионной обработки, титан целесообразно обрабатывать с параметрами импульсов, используемых для обработки стали 12X18H10T, а при более высоких плотностях (50 ГВт/м^2 и более), соответствующих черновым режимам электроэрозионной обработки, — с параметрами импульсов, используемых для обработки стали 45. Результаты работы, представленные на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала, можно использовать для определения рациональных параметров импульсов электроэрозионной обработки титана.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. *Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
- [2] Золотых Б.Н., Любченко Б.М. *Инженерная методика расчета технологических параметров ЭЭО*. Москва, Машиностроение, 1981.
- [3] Dhirendra nath mishra, Aarti Bhatia, Vaibhav rana. Study on Electro Discharge Machining (Edm). *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, pp. 24–35.
- [4] Ms. Sharanya S. Nair. Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM): A Review. *Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, pp. 71–76.
- [5] Chandramouli S., Shrinivas Balraj U., and Eswaraiiah K. Optimization of Electrical Discharge Machining Process Parameters Using Taguchi Method. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 425–434.
- [6] Золотых Б.Н. *Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1967.
- [7] Крейт Ф., Блэк У. *Основы теплопередачи*: пер. с англ. Москва, Мир, 1983.
- [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*, 2011, спец. выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение», с. 164–171.

- [9] Ставицкий И.Б., Хапаев М.М. Особенности электроэрозионной обработки композиционных поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза. *Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1997, № 2, с. 95–100.
- [10] Окулов Н.А. Об одном численном методе решения одномерных задач типа Стефана. *Вычислительные методы и программирование*. 2011, т. 12, с. 238–246.
- [11] Калиткин Н.Н., Корякин П.В. *Численные методы. Кн. 2. Методы математической физики*. Москва, Академия, 2013.
- [12] Gupta S.C. *The Classical Stefan Problem: basic concepts, modelling and analysis*. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, JAI Press, 2003.

Статья поступила в редакцию 28.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ставицкий И.Б., Шевченко А.С. Определение параметров импульсов электроэрозионной обработки титана на основе решения тепловой задачи Стефана. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1599>

Ставицкий Иван Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области электрофизических методов обработки материалов. e-mail: vats59@mail.ru

Шевченко Антон Сергеевич — магистрант кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: lantonshev1@gmail.com

Definition of titanium EDM pulse parameters based on solution of the Stefan heat problem

© I.B. Stavitskiy, A.S. Shevchenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents the results of theoretical studies of titanium machinability by electrical discharge machining (EDM), based on the solution of the Stefan heat problem. We propose a method for determining the parameters of titanium electrical discharge machining pulses and give recommendations for their intended purpose. Moreover, we define the minimum heat flux density and its duration, necessary to implement the titanium EDM process. We established the dependence of the minimum values of heat flux pulse duration at which the titanium electrical discharge machining is carried out, on the density of the heat flux. We determined the maximum values of pulse durations of heat fluxes acting on the titanium to ensure the maximum material removal per pulse, and the effective durations of the heat fluxes, providing the maximum performance of titanium EDM process, as appropriate for the heat flux density.

Keywords: EDM, EDM pulse parameters, titanium machinability, heat flux density, electrical pulses duration

REFERENCES

- [1] Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Aerospace equipment EDM]. Moscow, BMSTU Publ., 2010.
- [2] Zolotykh B.N., Lyubchenko B.M. *Inzhenernaya metodika rascheta tekhnologicheskikh parametrov EEO* [Engineering method of calculating EDM technological parameters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981.
- [3] Dhirendranathmishra, Aarti Bhatia, Vaibhav rana. Study on Electro Discharge Machining (Edm). *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, pp. 24–35.
- [4] Ms. Sharanya S. Nair Int. Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM): A Review. *Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, pp. 71–76.
- [5] Chandramouli S., ShrinivasBalraj U., Eswaraiah K. Optimization of Electrical Discharge Machining Process Parameters Using Taguchi Method. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 425–434.
- [6] Zolotykh B.N. *Osnovnye voprosy teorii elektricheskoy erozii v impulsnom razryade v zhidkoy dielektricheskoy srede*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Main problems of electrical erosion theory in pulsed discharge in liquid dielectric medium. Dr. eng. sc. diss.]. Moscow, 1967.
- [7] Kreith F., Black W.Z. *Basic Heat Transfer*. Harper and Row Publ., New York 1980 [In Russ.: Kreit F., Blek U. *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer fundamentals]. Moscow, Mir Publ., 1983].
- [8] Stavitskiy I.B. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, spets. vypusk "Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie"* — *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Spec. iss. "Power and Transport Engineering"*, 2011, pp. 164–171.

- [9] Stavitskiy I.B., Khapaev M.M. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 1997, no. 2, pp. 95–100.
- [10] Okulov N.A. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye — Numerical Methods and Programming*, 2011, vol. 12, pp. 238–246.
- [11] Kalitkin N.N., Koryakin P.V. Chislennyye metody [Numerical methods]. *Metody matematicheskoi fiziki* [Methods of mathematical physics]. Book 2. Moscow, Akademiya Publ., 2013.
- [12] Gupta S.C. The Classical Stefan Problem: basic concepts, modelling and analysis. *North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics*. JAI Press, 2003.

Stavitskiy I.B., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Tool Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 scientific papers in the field of electrophysical methods of materials processing. e-mail: vats59@mail.ru

Shevchenko A.S., Master's Degree student of the Department of Tool Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: 1antonshev1@gmail.com