

УДК 721.9.048.4

Назначение рациональных режимов электроэрозионной обработки платины с использованием решений тепловой задачи Стефана

Ставицкий И. Б.^{1,*}, Битюцкая Ю. Л.¹

^{*}vats59@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье представлены результаты теоретических исследований обрабатываемости платины методом электроэрозионной обработки, основанные на решении тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала. Предложена методика определения рациональных режимов электроэрозионной обработки платины и даны рекомендации по их назначению; определены минимальные плотность теплового потока и его длительность, необходимые для реализации процесса электроэрозионной обработки платины. Установлена зависимость минимальных значений длительностей импульсов теплового потока, при которых происходит электроэрозионная обработка платины, от плотности этого теплового потока. Определены максимальные значения длительностей импульсов тепловых потоков, действующих на платину, обеспечивающие максимальный съем материала за один импульс, а также эффективные длительности тепловых потоков, обеспечивающие максимальную производительность процесса электроэрозионной обработки платины, соответствующие используемой плотности теплового потока.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, режимы электроэрозионной обработки, обрабатываемость платины, длительность электрических импульсов, плотность тепловых потоков

Введение

В настоящее время электроэрозионная обработка (ЭЭО) находит широкое применение в промышленности. Однако часто возникают сложности в определении рациональных режимов обработки [1 – 4]. Ошибки в назначении режимов приводят к нестабильности процесса и существенному увеличению времени изготовления деталей. Особенно это проявляется при обработке материалов, для которых расчетные зависимости определения рациональных режимов еще не разработаны. Это вызвано тем, что получение таких зависимостей связано с проведением большого числа экспериментов, и, следовательно, значительными затратами времени и средств [5]. В настоящее время в

электронной промышленности и ряде других отраслей наблюдается все большая необходимость обработки платины, причем электроэрозионный метод часто является единственно возможным при изготовлении из нее сложнопрофильных или малогабаритных прецизионных деталей. Поэтому проблема определения рациональных режимов ЭЭО платины весьма актуальна.

Определение рациональных режимов электроэрозионной обработки платины

Для установления рациональных режимов обработки платины была использована тепловая задача о перемещении границы фазового превращения материала – задача Стефана [6]. Решение задачи позволяет определить глубину проплавления материала, исходя из его физических свойств, плотности теплового потока и времени его действия (рис.1).

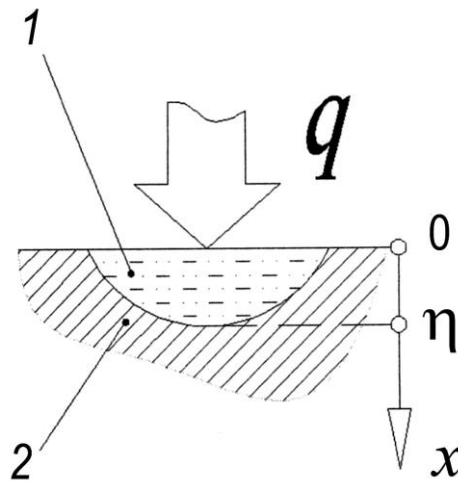


Рис 1. Схема для определения границы фазового превращения материала: 1 – жидкая фаза; 2 – твердая фаза

Эта задача для двухфазной системы описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка [6,7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \eta; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad \eta < x < \infty, \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_{1,2}$, $T_{1,2}$ – температуропроводность и температура жидкой и твердой фаз соответственно; η – координата границы фазового превращения.

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

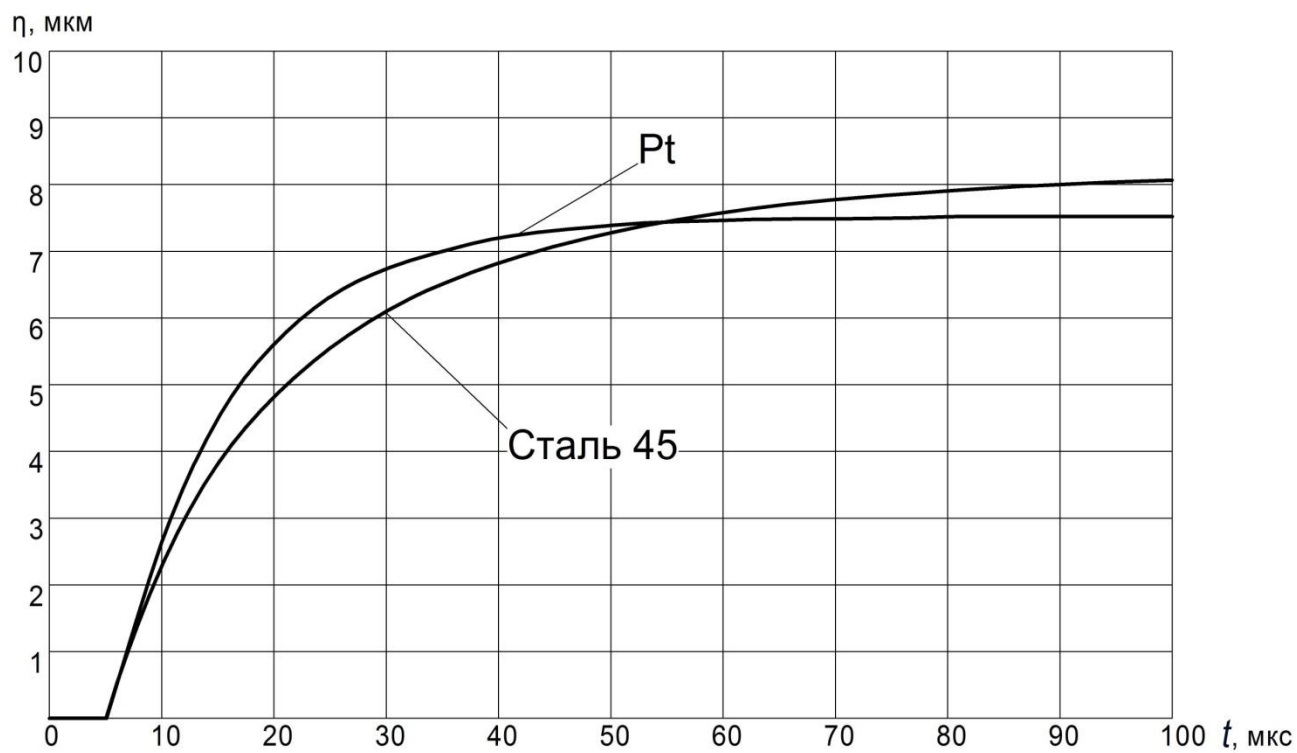
$$\begin{aligned}
T_1(x, 0) &= T_{\text{эф}} = T_{\text{пл}}; \\
T_2(x, 0) &= T_0; \\
T_1(\eta, t) &= T_2(\eta, t) = T_{\text{пл}}; \\
T(\infty, t) &= T_0; \quad (2) \\
q &= -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0}; \\
-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\eta} + \lambda_2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

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

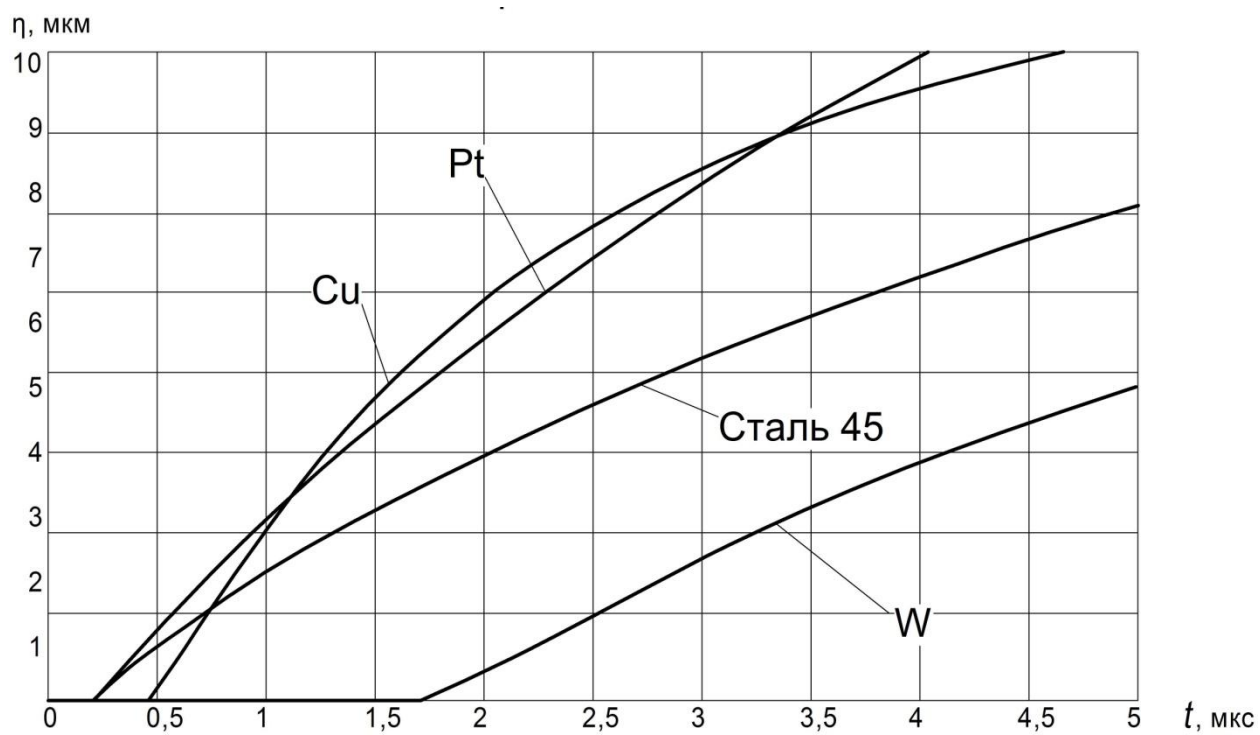
В настоящее время точная корреляция между тепловым потоком, возникающим при прохождении электрического разряда, и режимом обработки не выявлена. Поэтому для определения рациональных режимов ЭЭО предлагается установить связь между обрабатываемостью исследуемого материала и материалов, для которых в настоящее время рациональные режимы определены [8]. Можно утверждать, что материалы, имеющие совпадающие или близкие кривые $\eta(t)$, следует обрабатывать на одних и тех же режимах.

С помощью специальной программы, основанной на неявной конечно-разностной схеме и методе прогонки решения системы линейных уравнений (2) и позволяющей анализировать процессы удаления материала при ЭЭО [8–12], были получены следующие результаты.

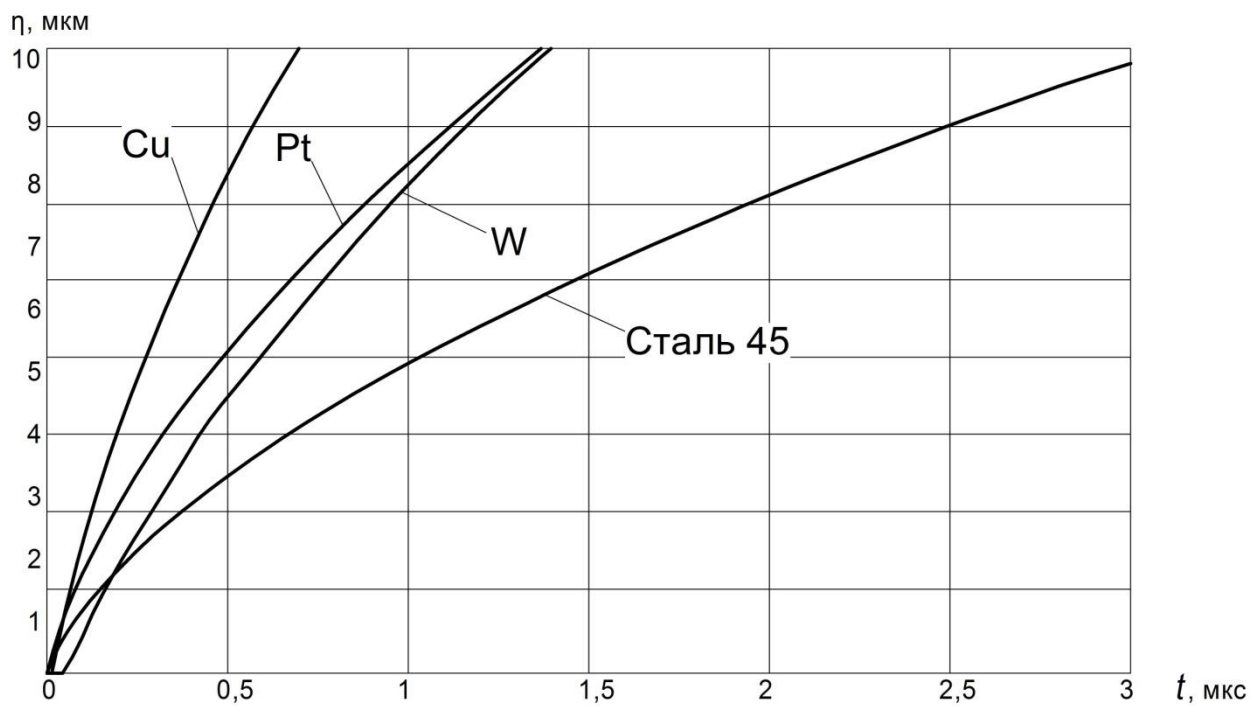
Поскольку при ЭЭО платины с плотностью теплового потока 10 ГВт/м² и длительностью импульсов $t = 0 \dots 100$ мкс кривые $\eta(t)$ близки к кривой $\eta(t)$ стали 45 (рис.2), на чистовых режимах ее обработки целесообразно использовать режимы, применяемые для стали 45. При ЭЭО с более высокой плотностью теплового потока, например 50 ГВт/м², кривые $\eta(t)$ платины близки к кривой $\eta(t)$ меди при длительности импульсов $t = 0,7 \dots 4$ мкс. При еще больших плотностях теплового потока, например 300 и 500 ГВт/м², кривые $\eta(t)$ платины близки к кривой $\eta(t)$ вольфрама при $t = 0,5 \dots 1,5$ мкс и $0,2 \dots 1,0$ мкс соответственно. Таким образом, при высокой плотности теплового потока, соответствующей черновым режимам ЭЭО, платину целесообразно обрабатывать на режимах, применяемых для обработки вольфрама. Следует отметить, что превышение указанных значений длительности импульсов для плотностей тепловых потоков 50, 300 и 500 ГВт/м² приводит к глубине проплавления материала $\eta > 10$ мкм, что соответствует крайне грубому качеству обрабатываемой поверхности. Поэтому эти значения длительности импульсов в работе не рассматривали.



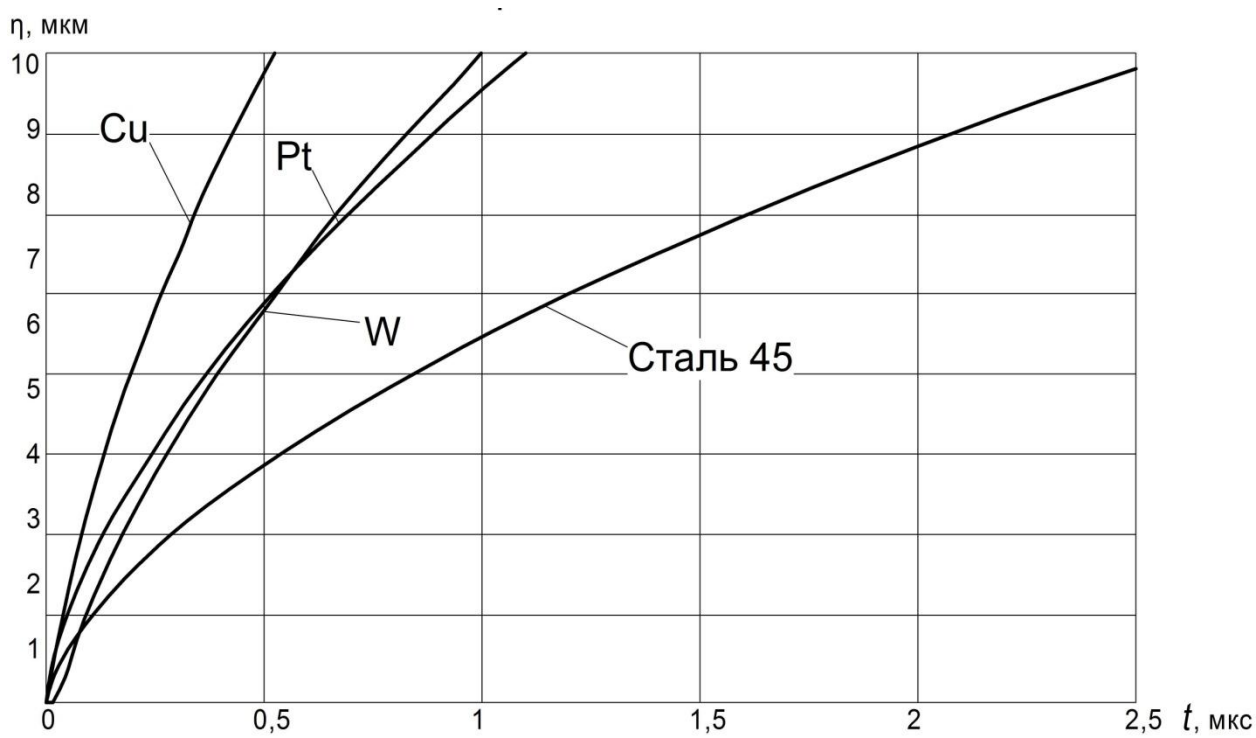
а



б



в



г

Рис.2. Зависимость глубины η проплавления платины от длительности импульса t источника теплоты при плотности теплового потока $q=10$ (а), 50 (б), 300(в) и 500 ГВт/м² (г)

Таким образом, предлагаемая методика позволяет определить рациональные режимы ЭЭО платины.

Одним из важных режимных параметров ЭЭО является длительность импульсов. Известно [2], что этот параметр сильно влияет 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 материал и соответственно становится возможным процесс ЭЭО, от плотности теплового потока q (рис.3). При меньшей длительности импульсов материал в зоне действия теплового потока не успевает нагреться до температуры плавления и не удаляется.

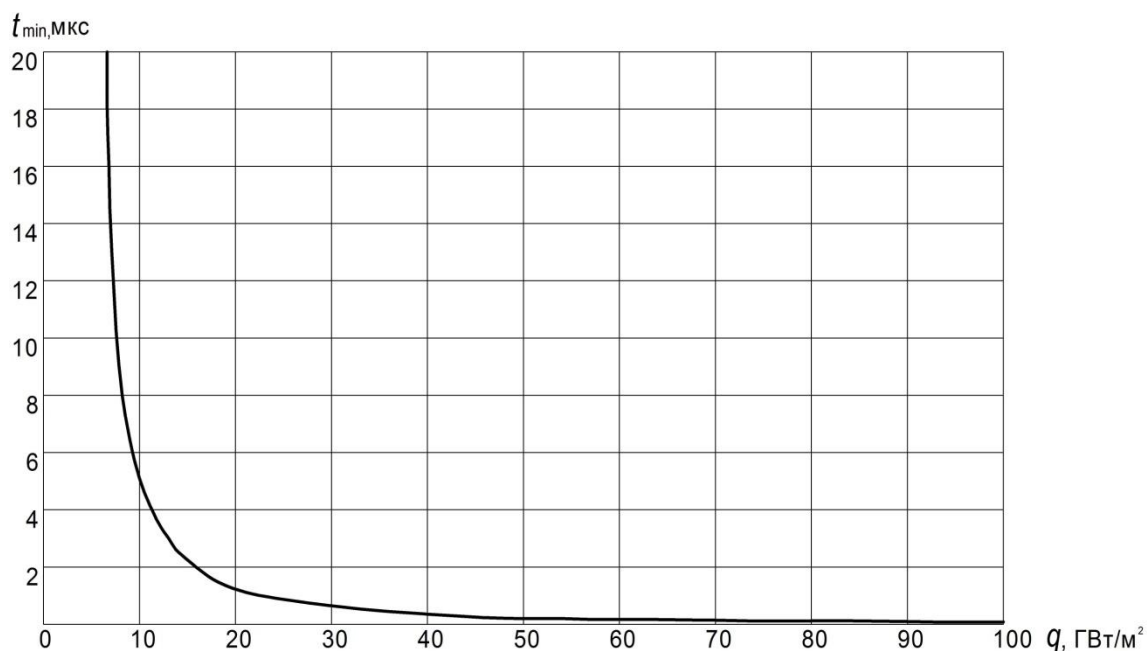


Рис.3. Зависимость минимальной длительности импульсов $t_{\min}$ от плотности теплового потока q

Известно, что при увеличении плотности теплового потока глубина проплавления обрабатываемого материала и соответственно объем образующейся на поверхности лунки возрастают, что приводит к росту производительности ЭЭО. Проведенные исследования показали, что при обработке платины глубина ее проплавления η при увеличении плотности теплового потока q происходит до некоторого значения $\eta_{\max}$ (рис.4). 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 $\eta_{\max}$ соответствует определенное значение длительности импульса $t_{\max}$, превышение которого не приведет к увеличению съема материала, но уменьшит максимальную частоту следования импульсов, а значит, производительность ЭЭО (см. рис.4).

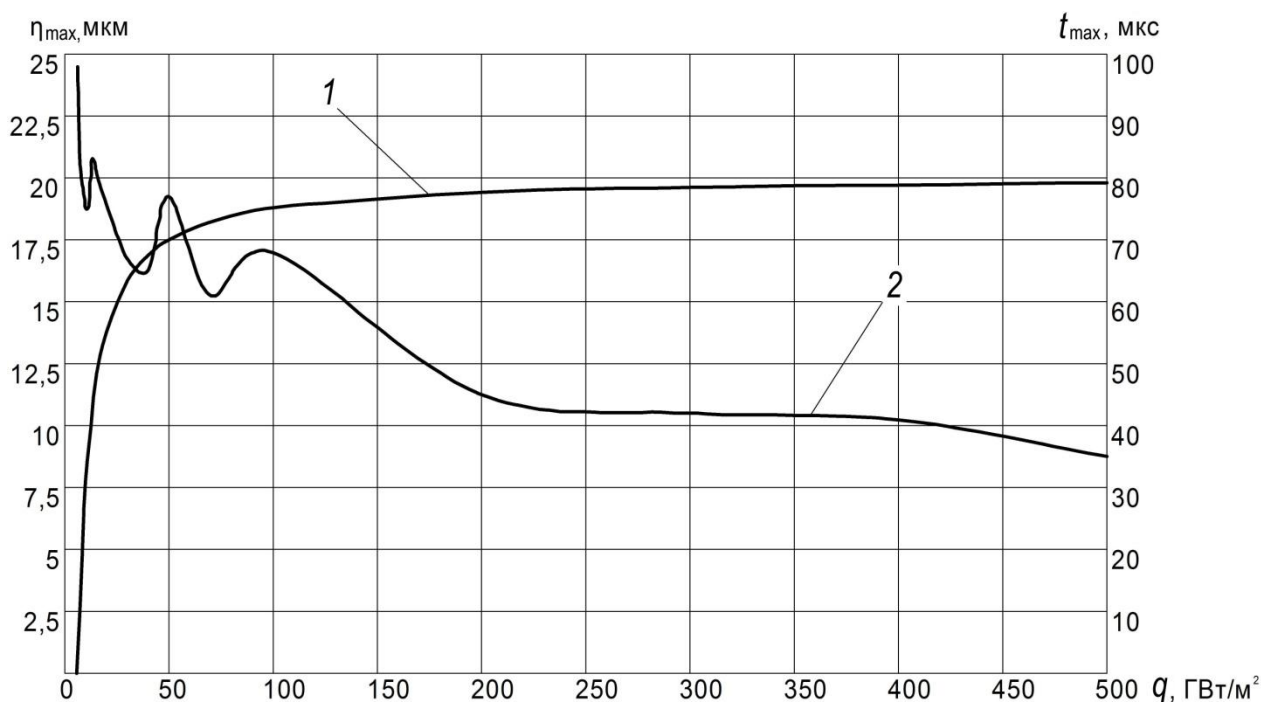


Рис.4. Зависимость максимальной глубины проплавления $\eta_{\max}$ (1) и максимальной длительности импульса $t_{\max}$ (2) от плотности теплового потока q

В общем виде зависимость $\eta(t)$ для платины представлена на рис.5.

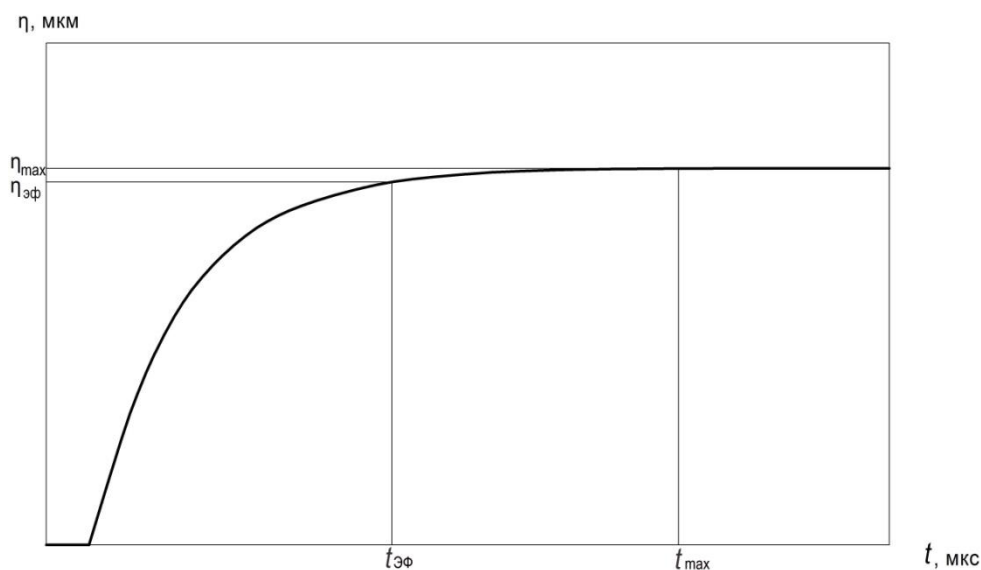


Рис.5. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t

Видно, что 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 существенному увеличению материала, удаляемого за один импульс, но существенно снижает максимальную частоту следования импульсов. Следовательно, ЭЭО целесообразно проводить при длительностях импульсов соответствующих значениям $t_{\text{эф}}$. При этом, несмотря на незначительное снижение объема удаляемого за один импульс материала, можно существенно увеличить частоту следования импульсов, а значит, увеличить съем материала в единицу времени, т.е. производительность ЭЭО. На рис.6 представлены зависимости эффективной глубины проплавления $\eta_{\text{эф}}$ платины и эффективной длительности импульса $t_{\text{эф}}$ от плотности теплового потока q .

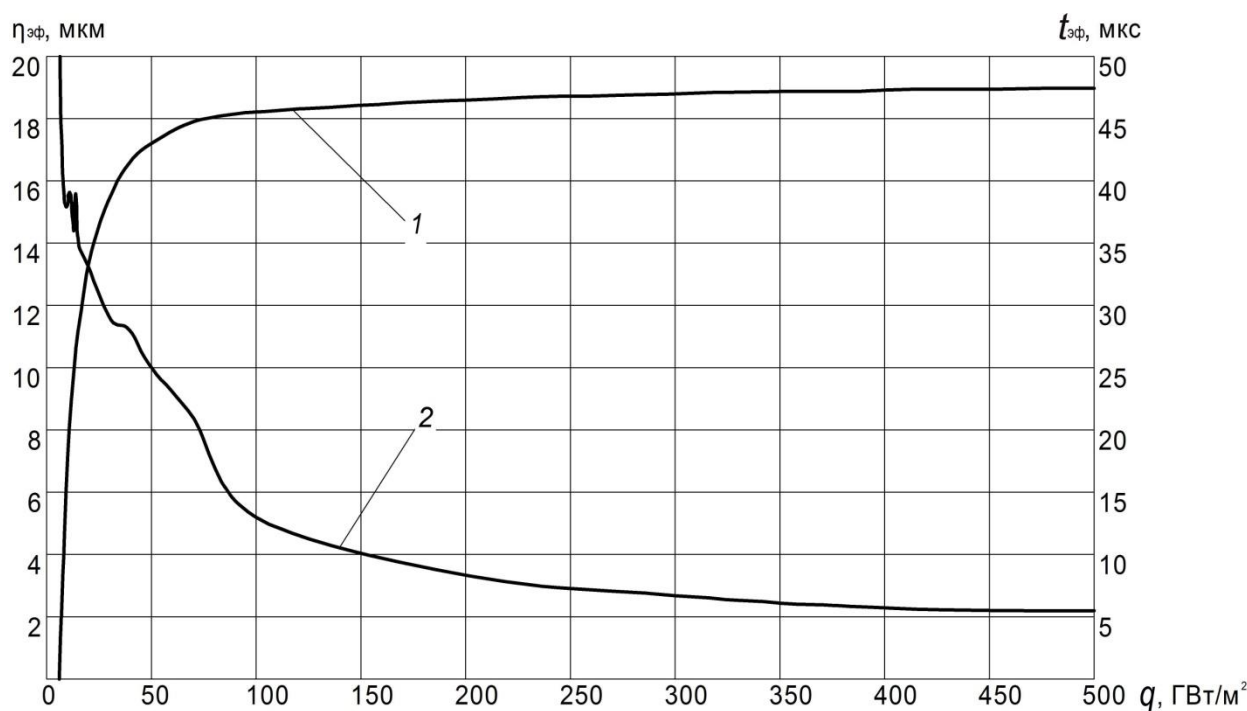


Рис. 6. Зависимость эффективной глубины проплавления $\eta_{\text{эф}}$ (1) и эффективной длительности импульса $t_{\text{эф}}$ (2) от плотности теплового потока q

Закключение

Таким образом, в результате проведенных исследований были получены следующие зависимости: глубины проплавления платины 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. Также показано, что при небольших плотностях теплового потока, соответствующих чистовым режимам ЭЭО, платину целесообразно обрабатывать на режимах, применяемых для обработки стали 45; при ЭЭО с более высокими плотностями теплового потока (например, 50 ГВт/м²), на режимах, используемых для обработки меди; а при высоких плотностях теплового потока, соответствующих черновым режимам ЭЭО, на режимах, применяемых для обработки вольфрама. Представленные на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала результаты работы можно использовать для назначения рациональных режимов ЭЭО платины.

Список литературы

1. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Саушкина. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
2. Золотых Б.Н., Любченко Б.М. Инженерная методика расчета технологических параметров ЭЭО. М.: Машиностроение, 1981. 51 с.
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, iss. 2. P. 24-35.
4. Ms. Sharanya S. Nair, Ms. Nehal Joshi. Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM): A Review // International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4, iss. 12, pt. 1. P. 71-76.
5. Chandramouli S., Shrinivas Balraj U., Eswaraiah K. Optimization of Electrical Discharge Machining Process Parameters Using Taguchi Method // International Journal of Advanced Mechanical Engineering. 2014. Vol. 4, no. 4. P. 425-434.
6. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: дисс...докт. техн. наук. М., 1967.
7. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 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. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение». С. 164-170.
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. 90-96.

10. Окулов Н.А. Об одном численном методе решения одномерных задач типа Стефана // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 238-246. Режим доступа: <http://num-meth.srcc.msu.ru/index.html> (дата обращения 01.10.2015).
11. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные методы. В 2 кн. Кн. 2. Методы математической физики. М.: Академия, 2013. 304 с.
12. Gupta S.C. The Classical Stefan Problem: Basic Concepts, Modelling and Analysis. Elsevier, 2003. (North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics; vol. 45.).

Electrical Discharge Platinum Machining Optimization Using Stefan Problem Solutions

I.B. Stavitskiy^{1,*}, Yu.L. Bityutskaya¹

[*vats59@mail.ru](mailto:vats59@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: electro-discharge machining, electrical discharge machining (EDM); EDM modes, machinability of platinum, duration electrical pulses, density of heat flow

The article presents the theoretical study results of platinum workability by electrical discharge machining (EDM), based on the solution of the thermal problem of moving the boundary of material change phase, i.e. Stefan problem. The problem solution enables defining the surface melt penetration of the material under the heat flow proceeding from the time of its action and the physical properties of the processed material. To determine the rational EDM operating conditions of platinum the article suggests relating its workability with machinability of materials, for which the rational EDM operating conditions are, currently, defined. It is shown that at low densities of the heat flow corresponding to the finishing EDM operating conditions, the processing conditions used for steel 45 are appropriate for platinum machining; with EDM at higher heat flow densities (e.g. 50 GW / m²) for this purpose copper processing conditions are used; at the high heat flow densities corresponding to heavy roughing EDM it is reasonable to use tungsten processing conditions. The article also represents how the minimum width of the current pulses, at which platinum starts melting and, accordingly, the EDM process becomes possible, depends on the heat flow density. It is shown that the processing of platinum is expedient at a pulse width corresponding to the values, called the effective pulse width. Exceeding these values does not lead to a substantial increase in removal of material per pulse, but considerably reduces the maximum repetition rate and therefore, the EDM capacity. The paper shows the effective pulse width versus the heat flow density. It also presents the dependences of the maximum platinum surface melt penetration and the corresponding pulse width on the heat flow density. Results obtained using solutions of the Stefan heat problem can be used to optimize EDM operating conditions of platinum machining.

References

1. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki* [Electrical discharge machining of aerospace engineering products]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 437 p. (in Russian).

2. Zolotych B.N., Lyubchenko B.M. Inzhenernaya metodika rascheta tekhnologicheskikh parametrov EEO [Engineering method of calculation of technological parameters of EDM]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 51 p. (in Russian).
3. Dharendra Nath Mishra, Aarti Bhatia, Vaibhav Rana. Study on Electro Discharge Machining (EDM). *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, iss. 2, pp. 24-35.
4. Ms. Sharanya S. Nair, Ms. Nehal Joshi. Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM): A Review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, iss. 12, pt. 1, pp. 71-76.
5. Chandramouli S., Shrinivas Balraj 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. Zolotych B.N. *Osnovnye voprosy teorii elektricheskoi erozii v impul'snom razryade v zhidkoi dielektricheskoi srede. Dokt. diss.* [The main issues of the theory of electrical erosion in pulsed discharge in liquid dielectric medium. Dr. diss.]. Moscow, 1967. (in Russian).
7. Kreith F., Black W.Z. *Basic Heat Transfer*. Harper and Row, New York, 1980. (Russ. ed.: Kreith F., Black W.Z. *Osnovy teploperedachi*. Moscow, Mir Publ., 1983. 512 p.).
8. Stavitsky I.B. Determination of Rational Regimes of Electroerosion Treatment on the Basis of Solving the Heat Problem on Displacement of the Boundary of the Material Phase Transformation. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, spec. iss., pp. 164-170. (in Russian).
9. Stavitsky I.B., Khapaev M.M. Peculiarities of electrical-discharge machining of composite polycrystalline super hard materials based on diamond. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 1997, no. 2, pp. 90-96. (in Russian).
10. Okulov N.A. On a numerical method for solving one-dimensional Stefan-type problems. *Vychislitel'nye Metody i Programirovanie = Numerical Methods and Programming*, 2011, vol. 12, pp. 238-246. Available at: <http://num-meth.srcc.msu.ru/index.html>, accessed 01.10.2015. (in Russian).
11. Kalitkin N.N., Koryakin P.V. *Chislennyye metody. V 2 kn. Kn. 2. Metody matematicheskoi fiziki* [Numerical methods. In 2 books. Book 2. Methods of Mathematical Physics]. Moscow, Akademiya Publ., 2013. 304 p. (in Russian).
12. Gupta S.C. *The Classical Stefan Problem: Basic Concepts, Modelling and Analysis*. Elsevier, 2003. (North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics; vol. 45.).