

УДК 721.9.048.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT14
НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ О ПЕРЕМЕЩЕНИИ
ГРАНИЦЫ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА**

© 2018 г. Ставицкий И.Б.¹, Рябцева А.В.², Каминская В.С.²

¹Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
2-я Бауманская ул., 5, г. Москва, Российская Федерация, 105005, e-mail: mail@bmstu.ru

²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

В статье представлены результаты теоретических исследований обрабатываемости титанового сплава методом электроэрозионной обработки, основанные на решении тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала. Приведено описание компьютерной программы для решения названной тепловой задачи. Предложена методика определения рациональных режимов электроэрозионной обработки титанового сплава VT14 и даны рекомендации по их назначению. Определены минимальные плотность теплового потока и время его действия, необходимые для реализации процесса электроэрозионной обработки титанового сплава VT14. Установлена зависимость минимальной длительности импульса теплового потока, при которой возможна электроэрозионная обработка титанового сплава VT14, от плотности теплового потока. Определены максимальная длительность импульса действующего теплового потока, вызывающая наибольший съём сплава VT14 за один импульс, и эффективная длительность теплового потока, обеспечивающая максимальную производительность процесса электроэрозионной обработки титанового сплава VT14.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, тепловая задача, плотность теплового потока, длительность электрического импульса, титановый сплав VT14, режимы электроэрозионной обработки, обрабатываемость сплава VT14.

**OPTIMIZATION OF ELECTRICAL DISCHARGE
MACHINING PROCESS FOR TITANIUM ALLOY VT14
BASED ON THE SOLUTION OF THE HEAT TASK
OF MOVING THE BOUNDARY OF THE PHASE
CONVERSION OF MATERIAL**

Stavitskiy I.B.¹, Ryabtseva A.V.², Kaminskaya V.S.²

¹Bauman Moscow State Technical University (Bauman MSTU)
5 2nd Bauman str., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: mail@bmstu.ru

²S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

The results of theoretical studies of titanium alloy machinability by electrical discharge machining based on the solution of the heat problem of moving the boundary of the phase conversion of material are presented in this article. The description of the computer program developed for solving the above-mentioned heat problem is given. The procedure of defining

rational modes of electrical discharge machining of titanium alloy BT14 is proposed and recommendations are given for the purpose intended. The minimum heat flux density and the duration required to implement the process of electrical discharge machining of titanium alloy BT14 are determined. The dependence of the minimum pulse duration of the heat flux on the heat flux density is established at which the electrical discharge machining of titanium alloy BT14 is possible. The following is determined: the maximum pulse duration of the acting heat flux which results in the greatest removal of alloy BT14 per pulse; the effective duration of the heat flux providing the maximum efficiency of the process of electrical discharge machining of titanium alloy.

Key words: *electrical discharge machining, heat task, heat flux density, electrical pulse duration, titanium alloy BT14, modes of electrical discharge machining, machinability of titanium alloy BT14.*



СТАВИЦКИЙ И.Б.



РЯБЦЕВА А.В.



КАМИНСКАЯ В.С.

СТАВИЦКИЙ Иван Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: vats59@mail.ru
STAVITSKIY Ivan Borisovich — Candidate of Sciences (Engineernig), Associate Professor of Instrumental technique and technology Department of the Bauman MSTU, e-mail: vats59@mail.ru

РЯБЦЕВА Александра Викторовна — начальник отдела РКК «Энергия», e-mail: aleksandra.ryabceva@rsce.ru
RYABTSEVA Aleksandra Viktorovna — Head of Department at RSC Energia, e-mail: aleksandra.ryabceva@rsce.ru

КАМИНСКАЯ Виктория Сергеевна — инженер 2 категории РКК «Энергия», e-mail: viktoriya.kaminskaya@rsce.ru
KAMINSKAYA Viktoria Sergeevna — Engineer 2 category at RSC Energia, e-mail: viktoriya.kaminskaya@rsce.ru

Введение

Самым распространенным титановым сплавом является сплав Ti-Al-Mo-V (в российской классификации — BT14). Он относится к высокопрочным термически упрочняемым титановым ($\alpha+\beta$)-сплавам мартенситного типа. Основные легирующие элементы для сплава — ванадий, алюминий и молибден. Также сплав BT14 содержит незначительное количество циркония, кислорода, железа, водорода, кремния, азота и углерода. Поскольку, находясь в горячем состоянии, сплав BT14 хорошо поддается деформации, из него изготавливают листы, полосы, профили, фольгу, плиты, ленты и т. д. Благодаря высокому качеству сварного

шва его используют для производства ответственных деталей и узлов. Ракетно-космическая и авиационная промышленности являются самыми крупными потребителями титанового сплава BT14. Поскольку его рабочие температуры составляют 0...600 °С, он широко используется в двигателях, деталях топливной арматуры, корпусных и крепежных деталях [1].

Однако, при всех своих достоинствах сплав BT14 плохо обрабатывается резанием вследствие склонности к налипанию, низкой теплопроводности и плохих антифрикционных свойств. Особые сложности возникают при изготовлении отверстий малого диаметра, глухих полостей с небольшим поперечным сечением, удалении

образующихся после механической обработки заусенцев. Изготовление многих деталей из сплава ВТ14 традиционными механическими методами часто затруднено или невозможно.

В связи с этим все большее применение при производстве таких деталей находят электрофизические методы обработки, в частности, электроэрозионная обработка (ЭЭО). Этим методом, как правило, изготавливают сложнопрофильные детали и отверстия малого диаметра. Несомненными преимуществами ЭЭО являются:

- возможность получать отверстия, в т. ч. пересекающиеся, практически без заусенцев;
- использование на многих операциях непрофилированного электрода-инструмента (ЭИ);
- отсутствие силового воздействия инструмента на заготовку и др.

Эффективность метода ЭЭО обуславливает заметное увеличение номенклатуры выпускаемого и внедряемого оборудования, в т. ч. специализированных станков для изготовления отверстий малого диаметра. Однако, несмотря на все более широкое применение этого метода в промышленности, его возможности реализуются далеко не полностью. Во многом это вызвано необоснованным выбором и назначением режимов обработки, что приводит к значительному снижению производительности обработки, а в случае прошивания отверстий — увеличению износа ЭИ, а значит, уменьшению точности получаемых отверстий. Часто возникают сложности в определении рациональных режимов обработки [2–5]. Ошибки в назначении режимов приводят к нестабильности процесса и существенному увеличению времени изготовления деталей. Особенно это проявляется при обработке титана и его сплавов, для которых расчетные зависимости определения рациональных режимов еще не разработаны, так как это связано с проведением большого числа экспериментов, а следовательно, значительными затратами времени и средств [5]. А поскольку такие зависимости не учитывают физические особенности процесса ЭЭО, по ним далеко не всегда можно назначить оптимальные режимы, обеспечивающие стабильное протекание обработки и максимально возможную производительность формообразования. Поэтому проблема определения рациональных режимов ЭЭО сплава ВТ14 весьма актуальна.

Определение рациональных режимов ЭЭО сплава ВТ14

Получение эмпирических зависимостей для назначения рациональных режимов ЭЭО связано с проведением большого объема экспериментальных исследований, а значит, большими затратами времени и средств. Для сокращения таких исследований, а также учета физических особенностей процесса ЭЭО при установлении рациональных режимов обработки сплава ВТ14 целесообразно использовать тепловую задачу о перемещении границы фазового превращения материала — задачу Стефана [6–8]. Решение этой задачи позволяет определить координаты границы фазового превращения $\eta(t)$, исходя из его физических свойств, плотности теплового потока q и времени его действия t (рис. 1).

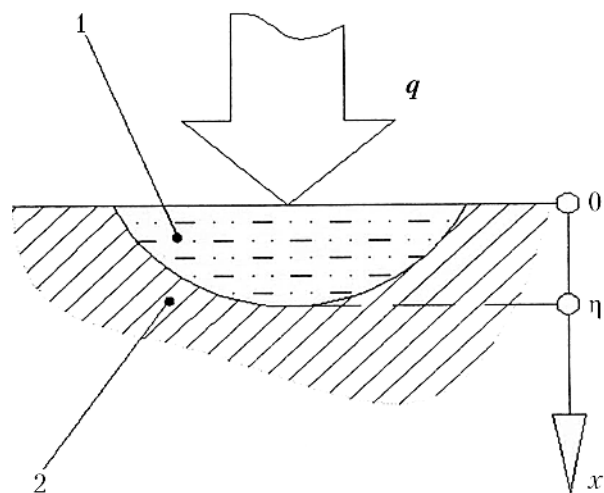


Рис. 1. Схема для определения границы фазового превращения материала: 1 — жидкая фаза; 2 — твердая фаза; q — плотность теплового потока; $\eta(t)$ — координата границы фазового превращения

Задача Стефана для двухфазной системы описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, представляющих собой основное уравнение теплопроводности для случая нестационарной теплопроводности в полубесконечном твердом теле [6, 9]:

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

где $T_{1,2}$ — температура жидкой и твердой фаз, соответственно, °С; $a_{1,2}$ — температуропроводность жидкой и твердой фаз, соответственно, м²/с; $\eta(t)$ — координата границы фазового превращения (см. рис. 1).

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

Начальные и граничные условия зададим в следующем виде:

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

Здесь $T_{\text{эф}}$ — эффективная температура центра источника теплоты, °С; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления обрабатываемого материала, °С; T_0 — начальная температура (20 °С); λ — теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·К); ρ — плотность обрабатываемого материала, кг/м³; $q_{\text{пл}}$ — скрытая теплота плавления обрабатываемого материала, Дж/кг.

Поскольку интенсивность источника теплоты есть функция времени, в расчетах целесообразно использовать некоторое ее эффективное значение и соответствующую ему температуру $T_{\text{эф}}$. Если пренебречь переходным процессом (нагревом поверхности до температуры плавления) и считать появление жидкой фазы мгновенным, то можно принять $T_{\text{эф}} = T_{\text{пл}}$.

Пятое уравнение в системе (2) представляет собой закон теплопроводности Фурье на поверхности, шестое — условие сопряжения тепловых потоков (знак «-» означает, что на границе фазового превращения происходит поглощение теплоты).

Учитывая, что время действия источника теплоты для рассматриваемого диапазона режимов ЭЭО мало ($t = 1...100$ мкс), примем допущение, что тепловой поток постоянен:

$$q(t) = q_0 = \text{const.}$$

Для решения системы уравнений (1) использовали специальную компьютерную программу *Erosion*, позволяющую анализировать процессы удаления материала ВТ14, а также проводить оценочный расчет параметров обработки [10–14].

Расчеты вели для следующих условий: обрабатываемый материал ВТ14; начальная температура, T_0 293 К (20 °С); плотность теплового потока, q $1 \cdot 10^{10} \dots 1 \cdot 10^{16}$ Вт/м²;

длительность импульса

$$\text{теплового потока, } t \quad (0...100) \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Все остальные значения (теплопроводность, плотность и скрытая теплота плавления сплава ВТ14) были взяты из справочника «Марочник стали и сплавов» [15].

Для назначаемой плотности q теплового потока, действующего на заготовку, программа позволяет получить зависимость глубины проплавления материала (сплава ВТ14) от длительности импульса теплового потока t . Кроме этого, можно рассчитать минимальную длительность импульса теплового потока, необходимую для начала плавления материала, т. е. определить минимальную длительность импульса тока, необходимую для реализации процесса обработки.

Известно [3], что причиной электрической эрозии материала является выделение на электродах энергии W :

$$W = \int_0^t UJ dt,$$

где U — напряжение на электродах, В; J — ток разряда, А, т. е. W однозначно определяется режимом обработки.

В свою очередь, соответственно, энергия W выделяется в столбе разряда (W_c), а также на катоде (W_k) и аноде (W_a), являющимися электродом-заготовкой и электродом-инструментом, т. е.

$$W = W_c + W_k + W_a.$$

В настоящее время распределение энергии W между тремя ее составляющими (W_c , W_k и W_a) невозможно определить аналитическими методами расчета. Следовательно, нельзя установить корреляцию между режимными параметрами ЭЭО и тепловым потоком, возникающим вследствие электрического разряда. Поэтому для определения рациональных режимов ЭЭО предлагается установить связь между обрабатываемостью исследуемого титанового сплава ВТ14 и материалами, для которых рациональные режимы обработки определены (как правило, наиболее широко используемые инструментальные стали, медь и некоторые другие). Можно предположить, что материалы, имеющие совпадающие или близкие зависимости глубины проплавления материала от длительности импульса теплового потока (в определенном диапазоне плотностей тепловых потоков) следует обрабатывать на одних и тех же или близких режимах [11]. Так, например, на рис. 2 видно, что у платины кривая $\eta(t)$ близка к кривой $\eta(t)$ стали 45 в рассматриваемом

интервале $t = 0...100$ мкс при $q = 10$ ГВт/м². Следовательно, при небольших плотностях теплового потока, соответствующих чистовым режимам ЭЭО, платину целесообразно обрабатывать на режимах, применяемых для обработки стали 45 [4].

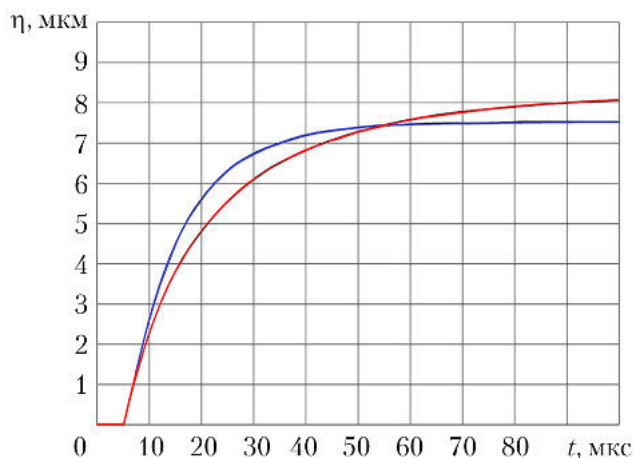


Рис. 2. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t при плотности теплового потока $q = 10$ ГВт/м²: ■ – Pt; ■ – сталь 45

Однако при сравнении кривых обрабатываемости сплава ВТ14 и материалов, для которых рациональные режимы ЭЭО определены, сходство наблюдается только при плотности $q = 50$ ГВт/м², соответствующей режимам черновой обработки (рис. 3–5). При этой плотности теплового потока совпадение кривых обрабатываемости сплава ВТ14 и меди наблюдается при длительностях импульса $t \leq 3...4$ мкс. При $t > 4$ мкс, как видно на рис. 5, кривые обрабатываемости меди и сплава ВТ14 начинают значительно различаться, глубина проплавления сплава ВТ14 продолжает существенно возрастать и достигает значений, которым соответствует не только значительный съем материала за каждый электрический импульс, но и неудовлетворительное качество получаемой поверхности (обработка становится неразумной). Поэтому можно предположить, что для сплава ВТ14 ЭЭО на черновых режимах целесообразно осуществлять на коротких импульсах ($t < 5$ мкс) и использовать режимы, применяемые для обработки меди.

Как видно на рис. 3–5, глубина проплавления сплава ВТ14 больше, чем стали 45 и меди при всех рассмотренных плотностях теплового потока и длительностях импульса. Соответственно, размер лунки, образующейся на поверхности обрабатываемого материала, и объем удаляемого материала будут больше. При этом производительность процесса обработки также должна быть выше.

Однако, как показывает производственный опыт, реальная производительность ЭЭО сплава ВТ14 часто ниже названных материалов, что свидетельствует о неправильной организации процесса обработки и применении нерациональных режимов.

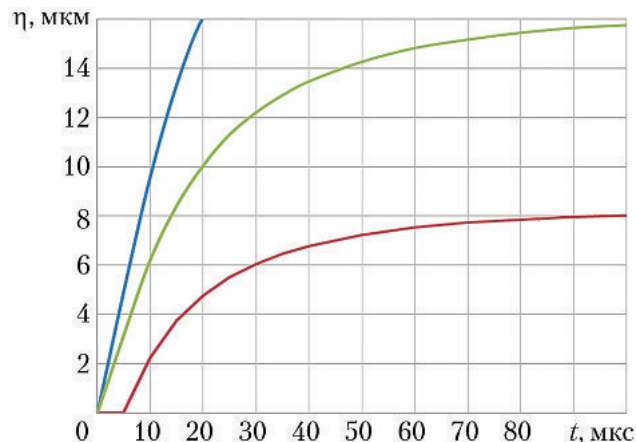


Рис. 3. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t при плотности теплового потока $q = 10$ ГВт/м²: ■ – ВТ14; ■ – титан; ■ – сталь 45

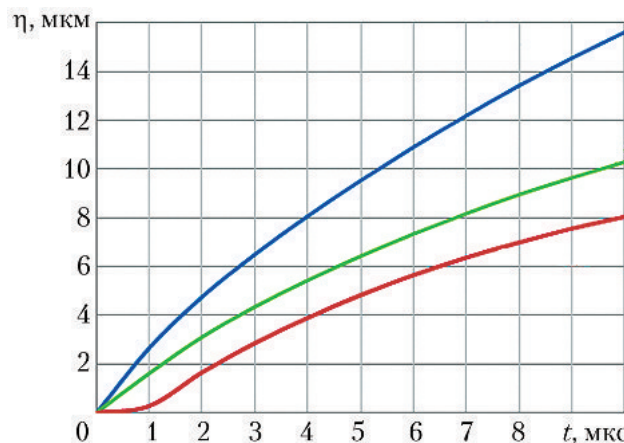


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t при плотности теплового потока $q = 25$ ГВт/м²: ■ – ВТ14; ■ – титан; ■ – сталь 45

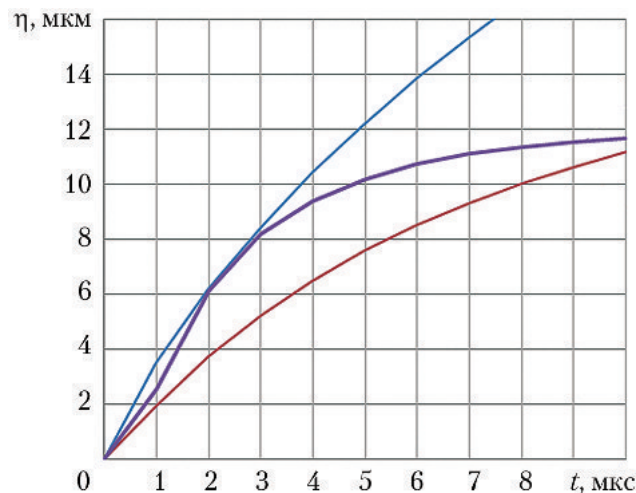


Рис. 5. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t при плотности теплового потока $q = 50$ ГВт/м²: ■ – ВТ14; ■ – медь; ■ – сталь 45

Одним из важных режимных параметров ЭЭО, влияющих на ее производительность, является длительность импульса. Как правило, ее выбирают, используя эмпирические зависимости, которые известны для относительно небольшой номенклатуры обрабатываемых материалов, или проводя экспериментальные исследования. Решение описанной выше задачи позволяет установить минимальную длительность t_{min} импульса, необходимую для осуществления процесса ЭЭО. Проведенные с использованием программы *Erosion* исследования позволили определить зависимость $t_{min}(q)$, при которой сплав ВТ14 начинает плавиться (обрабатываться), т.е. становится возможным процесс ЭЭО (рис. 6). При меньшей длительности импульса названный материал в зоне действия теплового потока не успевает нагреться до температуры плавления и не удаляется, т.е. его обработка невозможна.

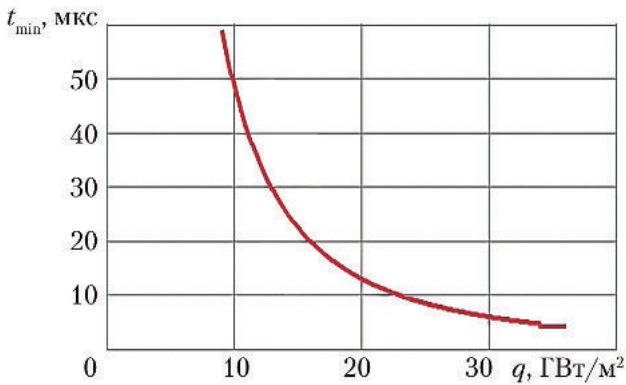


Рис. 6. Зависимость минимальной длительности импульсов t_{min} от плотности теплового потока q

Повышение производительности ЭЭО обусловлено увеличением плотности q теплового потока и длительности импульса t , которые влияют на глубину проплавления обрабатываемого материала. В общем виде зависимость $\eta(t)$ при некоторой плотности теплового потока для большинства обрабатываемых материалов представлена на рис. 7.

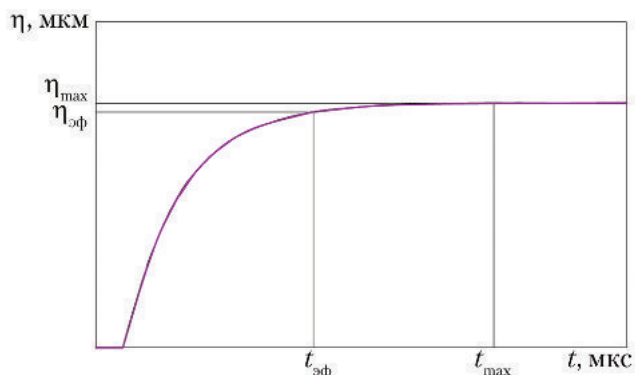


Рис. 7. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t

Видно, что глубина проплавления η материала имеет максимум η_{max} при $t = t_{max}$.

Проведенные исследования по обработке титанового сплава ВТ14 показали (рис. 8), что при $q > 1,5$ ГВт/м² глубина проплавления достигает своего максимального значения η_{max} , превышающего 10 мкм, соответствующего черновой обработке. Дальнейшее увеличение плотности теплового потока приводит к тому, что обработка становится неразумной.

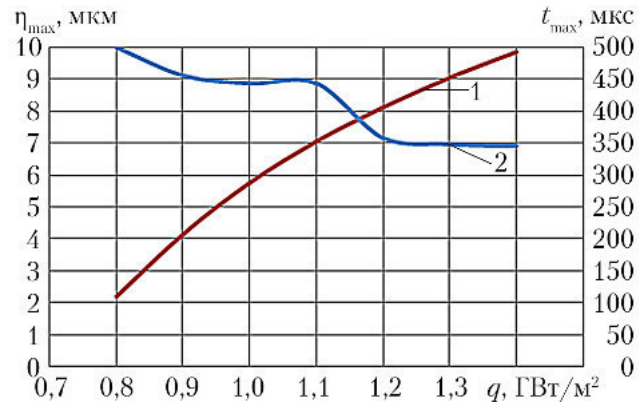


Рис. 8. Зависимость максимальной глубины проплавления η_{max} (1) и максимальной длительности импульса t_{max} (2) от плотности теплового потока q

Кроме того, на рис. 7 видно, что при увеличении длительности импульса глубина проплавления материала значительно возрастает только в течение времени $t_{эф}$, называемого эффективной длительностью импульса. Дальнейшее повышение длительности импульса не приводит к существенному росту глубины проплавления материала и, соответственно, к существенному увеличению объема удаляемого за один импульс материала. При этом длительность импульсов значительно возрастает, и существенно уменьшается их частота. Очевидно, что столь незначительное повышение съема материала за один импульс при значительном снижении частоты следования импульсов приводит к уменьшению производительности обработки. Следовательно, увеличить производительность ЭЭО можно благодаря значительному увеличению частоты следования импульсов, при незначительном уменьшении объема материала, удаляемого за каждый импульс. В связи с этим ЭЭО целесообразно проводить при длительностях $t = t_{эф}$. При этом глубина проплавления материала, соответствующая этому времени, достигает значения $\eta_{эф}$ (рис. 9).

На рис. 8 и 9 видно, что, например, при $q = 1$ ГВт/м² при уменьшении длительности импульса с $t_{max} = 280$ мкс до $t_{эф} = 125$ мкс, т.е. на 125%, глубина проплавления η снижается с $\eta_{max} = 5,8$ мкм до $\eta_{эф} = 4,9$ мкм,

т. е. всего на 18%. При $q = 1,4 \text{ ГВт/м}^2$ уменьшение длительности импульса с 310 до 105 мкс, т. е. на 195%, приведет к снижению глубины проплавления материала с 9,8 до 8,3 мкм, т. е. всего на 18%.

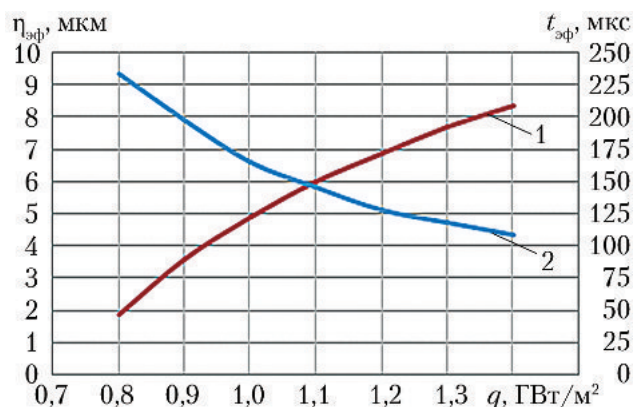


Рис. 9. Зависимость эффективной глубины проплавления $\eta_{\text{эф}}$ (1) и эффективной длительности импульса $t_{\text{эф}}$ (2) от плотности теплового потока q

Таким образом, обработка при значениях t , близких к $t_{\text{эф}}$, позволяет при незначительном уменьшении объема материала, удаляемого за один импульс, увеличить частоту следования импульсов при обработке сплава ВТ14 в 2–3 раза и тем самым повысить производительность ЭЭО сплава ВТ14.

Заключение

В результате решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала (задачи Стефана) были получены следующие зависимости: глубины проплавления сплава ВТ14 от длительности импульса теплового потока (импульса тока) и необходимой для начала плавления материала минимальной длительности импульса; максимальных глубины проплавления и длительности импульса, а также эффективных глубины проплавления и длительности импульса от плотности теплового потока.

Было показано, что при небольших и средних плотностях теплового потока, соответствующих чистовым и получистовым режимам ЭЭО, обрабатываемость сплава ВТ14 существенно отличается от обрабатываемости других материалов, а значит, рациональный режим его обработки также будет иметь другие значения. При высоких плотностях теплового потока, соответствующих черновым режимам ЭЭО, обработку сплава ВТ14 целесообразно осуществлять на коротких импульсах (не более 5 мкс).

Представленные результаты расчетов параметров импульсов, полученные с помощью

решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала и рассмотрения тепловых процессов, происходящих при ЭЭО непосредственно в зоне действия электрического разряда, позволяют резко сократить количество экспериментальных исследований при определении рациональных режимов ЭЭО сплава ВТ14, а также создать эмпирические зависимости, необходимые для расчета таких режимов.

Список литературы

1. ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Производство титана и изделия из него. Режим доступа: <http://www.vsm-po.ru> (дата обращения 20.03.2016 г.).
2. 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.
3. Золотых Б.Н., Любченко Б.М. Инженерная методика расчета технологических параметров ЭЭО. М.: Машиностроение, 1981, 51 с.
4. Ms. Sharanya S. Nair Int. Trends in wire electrical discharge machining (WEDM): a review // Journal of Engineering Research and Applications. 2014. V. 4. P. 71–76.
5. Dhirendra M., Aarti B., Vaibhav R. Study on electro discharge machining (EDM) // The International Journal of Engineering and Science. 2014. V. 3. P. 24–35.
6. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Дисс. ... докт. техн. наук. М., 1967. 107 с.
7. Ставицкий И.Б., Битюцкая Ю.Л. Назначение рациональных режимов электроэрозионной обработки платины с использованием решений тепловой задачи Стефана // Наука и образование. 2015. № 11. С. 60–71.
8. Халдеев В.Н., Макаров М.Н. О тепловом воздействии электрического импульса // Металлообработка. 2016. № 1. С. 80–91.
9. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с.
10. Ставицкий И.Б., Хапаев М.М. Особенности электроэрозионной обработки композиционных поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1997. № 2. С. 90–96.
11. Ставицкий И.Б. Определение рациональных режимов электроэрозионной

обработки на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала // Вестник МГТУ. Спец. выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение». 2011. С. 164–170.

12. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные методы. Кн. 2. Методы математической физики. М.: Академия, 2013. 304 с.

13. Окулов Н.А. Об одном численном методе решения одномерных задач типа Стефана // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 238–246.

14. Gupta S.C. *The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis*. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics: JAI Press, 2003. P. 404.

15. Бреславский Д.В., Бреславская Е.А. Марочник стали и сплавов. Режим доступа: <http://www.1metal.ru/info-tisplav.html> (дата обращения 20.03.2016 г.).

Статья поступила в редакцию 04.10.2017 г.

Reference

1. PAO Korporatsiya VSMPO-AVISMA. *Proizvodstvo titana i izdeliya iz nego* [PJSC Corporation VSMPO-AVISMA. Titanium production and products made of it]. Available at: <http://www.vsmo.ru> (accessed 20.03.2016).

2. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki* [Electroerosion processing of aerospace hardware]. Ed. by B.P. Saushkin. Moscow, MG TU im N.E. Baumana publ., 2010. 437 p.

3. Zolotykh B.N., Lyubchenko B.M. *Inzhenernaya metodika rascheta tekhnologicheskikh parametrov EEO* [Engineering procedure for calculating processing parameters of EDM]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981. 51 p.

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. Dhirendra M., Aarti B., Vaibhav R. Study on electro discharge machining (EDM). *The International Journal of Engineering and Science*, 2014, vol. 3, pp. 24–35.

6. Zolotykh B.N. *Osnovnye voprosy teorii elektricheskoi erozii v impul'snom razryade v zhidkoi dielektricheskoi srede*. Diss. ... dokt. tekhn. nauk [Basic issues in the theory of electrical erosion in a pulse discharge in liquid dielectric medium. Engineering Science Doctoral Dissertation]. Moscow, 1967. 107 p.

7. Stavitskii I.B., Bityutskaya Yu.L. *Naznachenie ratsional'nykh rezhimov elektroerozionnoi obrabotki platiny s ispol'zovaniem reshenii teplovoi zadachi Stefana* [Specifying efficient modes of electrical discharge machining of platinum using solutions of Stefan heat problem]. *Nauka i obrazovanie*, 2015, no. 11, pp. 60–71.

8. Khaldeev V.N., Makarov M.N. *O teplovom vozdeistvii elektricheskogo impul'sa* [About thermal effects of an electrical pulse]. *Metalloobrabotka*, 2016, no. 1, pp. 80–91.

9. Kreit F., Blek U. *Osnovy teploperedachi*. Per. s angl. [Fundamentals of heat transfer. Translated from English]. Moscow, Mir publ., 1983. 512 p.

10. Stavitskii I.B., Khapaev M.M. *Osobennosti elektroerozionnoi obrabotki kompozitsionnykh polikristallicheskiikh sverkhtoverdykh materialov na osnove almaza* [Aspects of electrical discharge machining of composite polycrystalline super-hard diamond-based materials]. *Vestnik MG TU. Ser. Mashinostroenie*, 1997, no. 2, pp. 90–96.

11. Stavitskii I.B. *Opreделение ratsional'nykh rezhimov elektroerozionnoi obrabotki na osnove resheniya teplovoi zadachi o peremeshchenii granitsy fazovogo prevrashcheniya materiala* [Determining efficient modes of electrical discharge machining based on the solution of the heat problem of predicting the motion of the material phase transition boundary]. *Vestnik MG TU. Spets. vypusk «Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie»*, 2011, pp. 164–170.

12. Kalitkin N.N., Koryakin P.V. *Chislennyye metody*. Kn. 2. *Metody matematicheskoi fiziki* [Numerical techniques. Book 2. Methods of mathematical physics]. Moscow, Akademiya publ., 2013. 304 p.

13. Okulov N.A. *Ob odnom chislennom metode resheniya odnomernykh zadach tipa Stefana* [About a numerical technique for solving one-dimensional Stefan-type problems]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 2011, vol. 12, pp. 238–246.

14. Gupta S.C. *The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis*. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, JAI Press, 2003. P. 404.

15. Breslavskii D.V., Breslavskaya E.A. *Marochnik stali i splavov* [Steel and alloys grade guide]. Available at: <http://www.1metal.ru/info-tisplav.html> (accessed 20.03.2016).