

**НАЗНАЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT5 НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ
ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ О ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГРАНИЦЫ
ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА**

И.Б. Ставицкий¹

stav@bmstu.ru

А.П. Наумов²

ant91on@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² ИПТМ РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Российская Федерация**Аннотация**

Приведены результаты теоретических исследований обрабатываемости титанового сплава VT5 методом электроэрозионной обработки, основанные на решении тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала (задачи Стефана). Предложена методика определения параметров электрических импульсов для электроэрозионной обработки сплава VT5 в целях повышения производительности процесса его обработки, даны рекомендации по их назначению. Определены плотность теплового потока и его длительность, необходимые для процесса электроэрозионной обработки сплава VT5. Установлены зависимости минимальной и максимальной длительностей импульса теплового потока, при которых возможен процесс электроэрозионной обработки сплава VT5 и максимальный съем сплава VT5 с заготовки за один импульс, от плотности теплового потока. Для максимальной производительности электроэрозионной обработки сплава VT5 при используемой плотности теплового потока введена эффективная длительность потока, установлены зависимости эффективной длительности теплового потока от его плотности. Для назначения рациональных режимов электроэрозионной обработки сплава VT5 приведены связи между кривыми обрабатываемости (т. е. зависимостями глубины проплавления материала от длительности импульса) сплава VT5 и других материалов

Ключевые слова

Электроэрозионная обработка, параметры импульсов, обрабатываемость, сплав VT5, плотность теплового потока, длительность электрических импульсов, моделирование, задача Стефана

Поступила 12.09.2022

Принята 13.02.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. В настоящее время при изготовлении деталей, имеющих сложный профиль, полости малого поперечного сечения (частный случай отверстия малого диаметра) или полости с отношением глубины к характерному линейному размеру поперечного сечения (например, диаметру) более 3–4, часто сталкиваются со следующей проблемой: детали с такими конструктивными элементами невозможно изготовить методами механической обработки. В связи с этим для их производства применяют электроэрозионную обработку (ЭЭО).

Важным условием для эффективного применения ЭЭО является использование рациональных режимов обработки. Однако рекомендации и формулы для корректного определения режимов обработки получены лишь для очень узкого перечня материалов.

Для многих материалов, например, рассматриваемого в настоящей работе титанового сплава ВТ5, такие рекомендации отсутствуют.

Некорректное назначение режима ЭЭО приводит к существенному снижению производительности процесса обработки, значительному износу электрода-инструмента (ЭИ), снижению точности обработанных конструктивных элементов, нестабильности процесса обработки и, как следствие, часто к снижению эффективности ЭЭО, а иногда и к нецелесообразности его применения.

В настоящей работе приведены результаты исследований обрабатываемости титанового сплава ВТ5 методом ЭЭО, направленные на получение рациональных режимов обработки.

Решение тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения титанового сплава ВТ5. Расчетные зависимости для назначения рациональных режимов ЭЭО многих материалов, в том числе сплава ВТ5, еще не разработаны. На практике, как правило, используют эмпирические зависимости, установление которых требует больших затрат времени и средств, поскольку необходимо проведение большого числа экспериментальных исследований [1–4].

Например, при числе независимых факторов $k = 5$ и простейшем двухуровневом типе опытов ($m = 2$) число необходимых для осуществления полного факторного эксперимента опытов составляет $N = m^k = 2^5 = 32$.

Поскольку для выявления случайной погрешности каждый опыт необходимо провести 3–5 раз, получаем $N' = (3–5) N = (3–5) \cdot 32 = 96–160$.

Кроме того, поскольку такие зависимости установлены без учета физических особенностей процесса ЭЭО, то по ним далеко не всегда можно

назначить режимы, обеспечивающие максимальную производительность процесса.

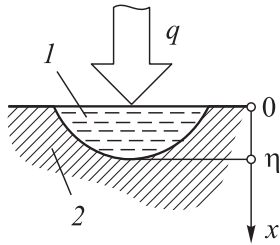


Рис. 1. Схема для определения границы фазового превращения материала:
1, 2 — жидкая и твердая фазы материала

Для сокращения числа экспериментальных исследований проведены теоретические исследования с использованием тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала — задачи Стефана [5, 6], решение которой позволило определить глубину проплавления η сплава ВТ5, исходя из его теплофизических свойств, плотности q теплового потока и времени t действия теплового источника (рис. 1).

Задача Стефана для двухфазной системы описывается системой двух дифференциальных уравнений второго порядка, каждое из которых представляет собой основное уравнение теплопроводности для случая нестационарной теплопроводности в полубесконечном твердом теле [5, 7]:

Задача Стефана для двухфазной системы описывается системой двух дифференциальных уравнений второго порядка, каждое из которых представляет собой основное уравнение теплопроводности для случая нестационарной теплопроводности в полубесконечном твердом теле [5, 7]:

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

где $T_{1,2}$, $a_{1,2}$ — температура и температуропроводность жидкой и твердой фаз; t — время; x — координата по глубине от поверхности; η — координата границы фазового превращения материала (глубина проплавления материала).

В рассматриваемой задаче тело считается полубесконечным, так как размеры рассматриваемой области заготовки, где происходит процесс плавления и съема материала, много меньше размеров этой заготовки.

Начальные и граничные условия зададим в следующем виде:

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

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\eta} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\eta} = -\rho q_{\text{пл}} \frac{\partial \eta}{\partial t}.$$

Здесь $T_{\text{эф}}$ — эффективная температура источника теплоты; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления обрабатываемого материала; T_0 — начальная температура (293 К); $\lambda_{1,2}$ — теплопроводность жидкой и твердой фаз; ρ — плотность обрабатываемого материала; $q_{\text{пл}}$ — скрытая теплота плавления.

Интенсивность источника теплоты есть функция времени, поэтому в расчетах использовано некоторое ее эффективное значение $T_{\text{эф}}$. Если пренебречь переходным процессом (нагревом локальной поверхности заготовки до температуры плавления) и считать появление жидкой фазы мгновенным, то можно принять $T_{\text{эф}} = T_{\text{пл}}$.

Пятое уравнение 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 теплового источника для режимов исследуемого диапазона мало (рассматриваем режимы, для которых время действия теплового источника или импульса тока не превышает 100 мкс), примем допущение, что плотность теплового потока постоянна:

$$q(t) = q_0 = \text{const}, \quad 0 < t < t_{\text{и}},$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса тока.

Систему уравнений (1) решали с использованием программного обеспечения Erosion [8–12]. Для решения задачи Стефана (определение глубины проплавления материала, исходя из заданных плотности теплового потока и времени его действия) необходимо ввести в программу следующие теплофизические параметры титанового сплава BT5: $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{тв}}$ — плотности жидкой и твердой фаз (при $T_{\text{пл}}$ и T_0); $c_{\text{рж}}^0$, $c_{\text{ртв}}^0$ — удельные теплоемкости жидкой и твердой фаз (при $T_{\text{пл}}$ и T_0); $\lambda_{\text{ж}}$, $\lambda_{\text{тв}}$ — теплопроводности жидкой и твердой фаз (при $T_{\text{пл}}$ и T_0).

Расчет теплофизических параметров сплава BT5. Поскольку в литературных источниках большая часть указанных параметров для сплава BT5 отсутствует, для элементов, составляющих сплав BT5, были взяты соответствующие им значения и по правилу аддитивности Коппа — Неймана [13] определены значения теплофизических параметров для рассматриваемого сплава.

Согласно ГОСТ 19807–1991¹, химический состав [% (мас.)] сплава ВТ5 следующий: Ti 90,6...95,2, Al 4,5...6,2, V ≤ 1,2, Mo ≤ 0,8, Zr ≤ 0,3, Si ≤ 0,12, Fe ≤ 0,3, C ≤ 0,1, прочие примеси составляют ≤ 0,3. Для определения теплофизических параметров будем считать, что титановый сплав ВТ5 содержит 95,2 % (мас.) Ti и 4,8 % (мас.) Al.

В результате анализа значений теплофизических констант для сплава ВТ5 [13–26] и проведенных вычислений получены следующие значения теплофизических констант, необходимые для расчетов: $\rho_{\text{ж}} = 4180 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{ТВ}} = 4400 \text{ кг/м}^3$; $c_{p \text{ ж}} = 998 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_{p \text{ ТВ}} = 514,6 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $T_{\text{пл}} = 1983 \text{ К}$; $q_{\text{пл}} = 377 \text{ 384 Дж/кг}$; $\lambda_{\text{ж}} = 45,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\lambda_{\text{ТВ}} = 9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Результаты расчетов с использованием программного обеспечения Erosion. После ввода полученных значений теплофизических параметров в программное обеспечение Erosion были определены зависимости глубины проплавления η от длительности импульса $t_{\text{и}}$ при действии тепловых потоков q различной плотности. По этим зависимостям для различных значений q получены важные для анализа обрабатываемости следующие параметры:

- минимальная длительность импульса $t_{\text{и}} = t_{\text{min}}$ для обработки сплава ВТ5;
- максимальная глубина проплавления η_{max} сплава ВТ5 и соответствующая ей длительность импульса $t_{\text{и}} = t_{\text{max}}$;
- эффективная глубина проплавления $\eta_{\text{эф}}$ сплава ВТ5 и соответствующая ей длительность импульса $t_{\text{и}} = t_{\text{эф}}$.

Известно [1], что на производительность процесса ЭЭО существенное влияние оказывает длительность импульса тока. Это параметр является одним из главных режимных параметров. Поскольку тепловой поток, действующий на поверхность заготовки, создается протекающим в межэлектродном промежутке током, то при расчетах принимаем, что длительности импульса теплового потока и импульса тока равны.

При длительности импульса $t_{\text{и}} = t_{\text{min}}$ материал начинает плавиться, т. е. обрабатываться, и становится возможным процесс ЭЭО. При $t_{\text{и}} < t_{\text{min}}$ материал в зоне действия теплового потока не успевает нагреться до температуры плавления и не удаляется.

¹ ГОСТ 19807–1991. Титан и сплавы титановые деформируемые. М., Изд-во стандартов, 1991.

Построенные с использованием программного обеспечения Erosion зависимости глубины проплавления материала от времени действия теплового источника (импульса тока) при разных значениях его плотности q позволили определить зависимость $t_{\min}(q)$ для сплава ВТ5 (рис. 2).

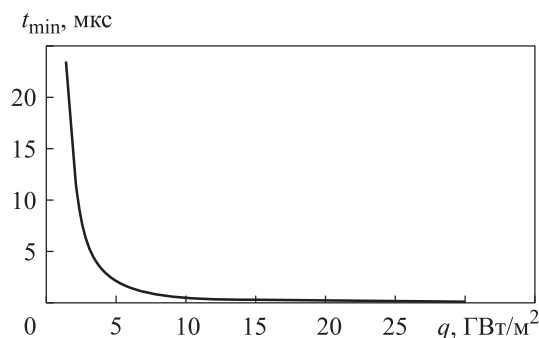


Рис. 2. Зависимость минимальной длительности импульсов t_{\min} от плотности теплового потока q

При увеличении плотности теплового потока глубина проплавления обрабатываемого материала и, следовательно, объем образующейся лунки увеличивается, что приводит к росту производительности процесса ЭЭО [1, 5].

Расчеты, проведенные с использованием программного обеспечения Erosion, показали, что при обработке сплава ВТ5 тепловыми потоками плотностью $q = 1,5$ ГВт/м², соответствующей чистой обработке, глубина проплавления достигает некоторого максимального значения η_{\max} (рис. 3).

Отметим, что начиная с некоторого времени $t_{\text{эф}}$ скорость проплавления $d\eta/dt_{\text{и}}$ намного меньше, чем в начале действия импульса (не считая отрезка $[0, t_{\min}]$). Очевидно, что целесообразно прекратить действие импульса при $t_{\text{эф}}$ и после необходимой паузы сгенерировать следующий такой же импульс. Превышение длительности импульса $t_{\text{эф}}$ приведет лишь к незначительному увеличению глубины проплавления материала до η_{\max} , но при этом уменьшится частота следования импульсов, значит, и производительность процесса ЭЭО.

Авторами предложено директивно принять значение $t_{\text{эф}}$ таким, что соответствующая этому времени глубина $\eta_{\text{эф}} = 0,9\eta_{\max}$. Например, на рис. 3 видно, что $\eta_{\max} = 9,26$ мкм, следовательно, эффективная глубина $\eta_{\text{эф}} = 0,9\eta_{\max} = 0,9 \cdot 9,26 = 8,33$ мкм. Соответствующее этой глубине время $t_{\text{эф}} = 109,8$ мкс. Отношения $t_{\max}/t_{\text{эф}} = 200/109,8 = 1,82$ и $\eta_{\max}/\eta_{\text{эф}} =$

$= 9,26/8,33 = 1,11$ показывают, что в случае принятия $t_{и} = t_{эф}$ можно почти в 2 раза увеличить частоту следования импульсов тока при незначительном снижении объема удаляемого материала за один импульс, что позволит существенно повысить производительность процесса ЭЭО.

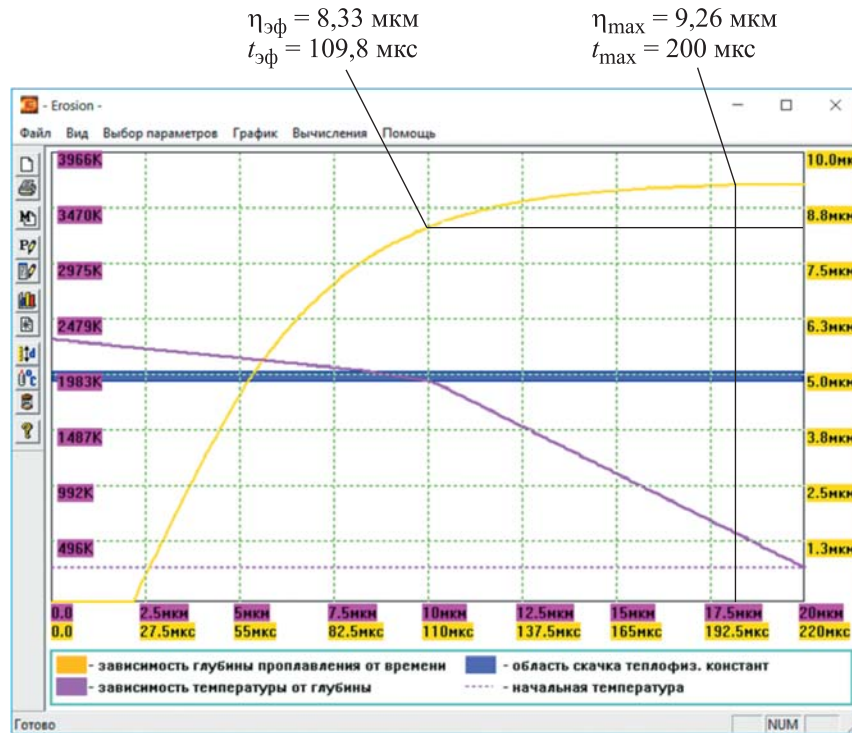


Рис. 3. Скриншот зависимостей глубины проплавления η от длительности импульса $t_{и}$ и температуры $T_{пл}$ от глубины η при $q = 1,5 \text{ ГВт/м}^2$

Отметим, что кривая $\eta(t_{и})$ с пологим участком (см. рис. 3) встречается довольно часто для разных материалов.

При значениях $q \geq 2 \text{ ГВт/м}^2$ глубина проплавления достигает максимального значения $\eta_{max} \geq 10 \text{ мкм}$ (рис. 4), чему соответствует очень грубая черновая поверхность, а также неразмерная обработка. В связи с этим в настоящей работе рассматривали диапазон глубин проплавления материала $\eta_{max} = 0 \dots 10 \text{ мкм}$, следовательно, для $q \geq 2 \text{ ГВт/м}^2$ принимаем $\eta_{эф} = 10 \text{ мкм}$ и $t_{и} = t_{эф}$. Зависимости максимальной глубины проплавления η_{max} , максимальной длительности импульса t_{max} , эффективной глубины проплавления $\eta_{эф}$ и эффективной длительности импульса $t_{эф}$ от плотности теплового потока q приведены на рис. 5.

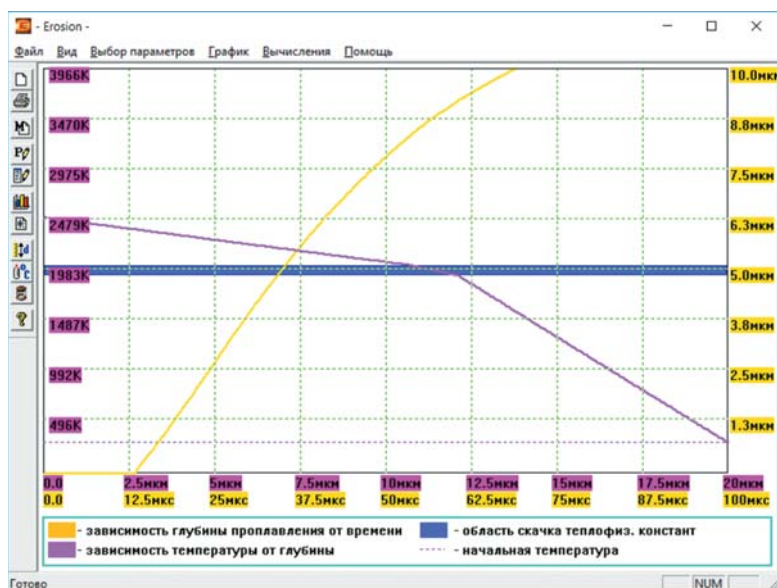


Рис. 4. Скриншот зависимостей глубины проплавления η от длительности импульса t_i и температуры $T_{пл}$ от глубины η при $q \geq 2 \text{ ГВт/м}^2$

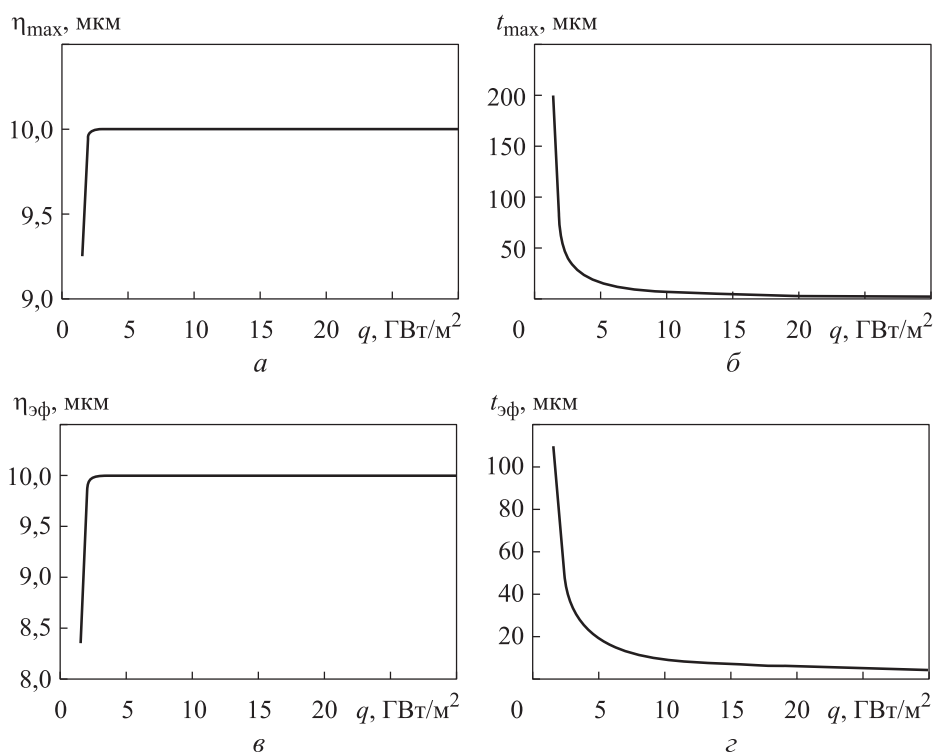


Рис. 5. Зависимости максимальной глубины проплавления η_{max} (а), максимальной длительности импульса t_{max} (б), эффективной глубины проплавления $\eta_{эф}$ (в) и эффективной длительности импульса $t_{эф}$ (г) от плотности теплового потока q

Кривые максимальных и эффективных значений при принятом ограничении $\eta_{\max} = 0 \dots 10$ мкм различаются только при $q < 2$ ГВт/м². При $q \geq 2$ ГВт/м² значение максимальной глубины η_{\max} задается верхней границей диапазона рассматриваемых глубин, соответствующей заданному значению шероховатости поверхности или размерной обработке.

Определение рациональных режимов ЭО титанового сплава ВТ5.

Предложено установить связь между кривыми обрабатываемости, т. е. зависимостями глубины проплавления η от длительности импульса $t_{\text{и}}$ сплава ВТ5 и других материалов, в том числе, для которых в настоящее время определены рациональные режимы [8]. Можно предположить, что материалы, имеющие совпадающие или близкие кривые $\eta(t_{\text{и}})$, следует обрабатывать на одних и тех же или близких режимах.

Построены зависимости $\eta(t_{\text{и}})$ для сплава ВТ5 и других материалов (сталь 45, сталь 12Х18Н10Т, Ti, Pt, Al, Fe, Ni) при трех значениях $q = 2, 10$ и 50 ГВт/м², соответствующих чистовой, получистовой и черновой ЭО соответственно (рис. 6).

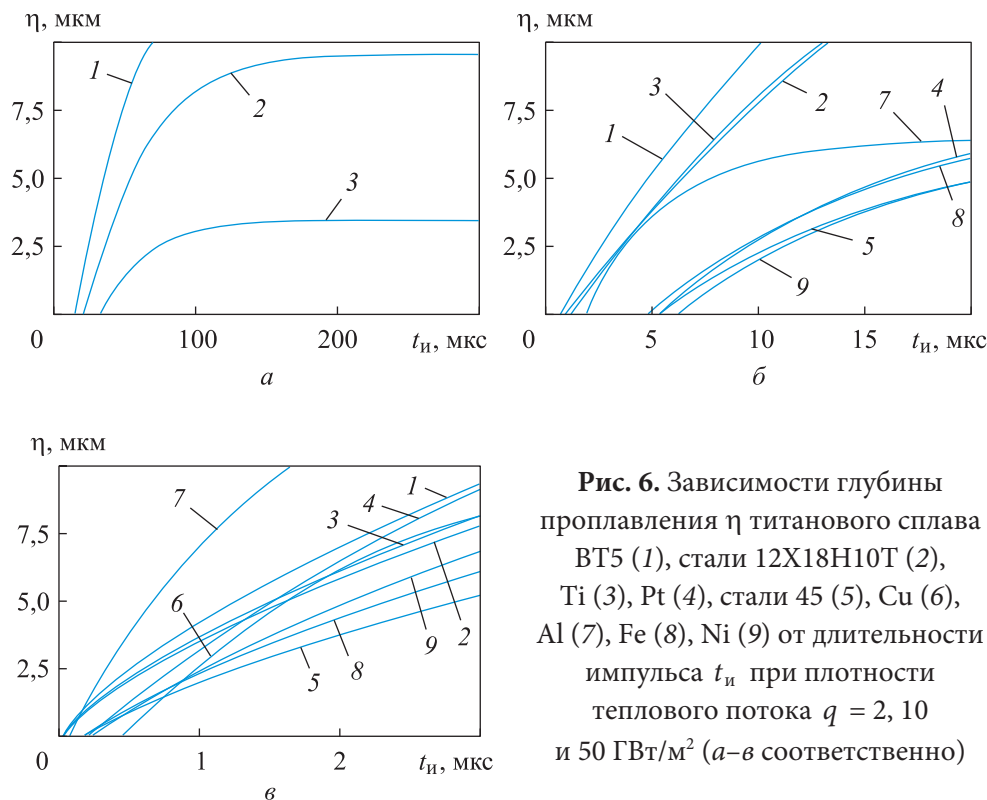


Рис. 6. Зависимости глубины проплавления η титанового сплава ВТ5 (1), стали 12Х18Н10Т (2), Ti (3), Pt (4), стали 45 (5), Cu (6), Al (7), Fe (8), Ni (9) от длительности импульса $t_{\text{и}}$ при плотности теплового потока $q = 2, 10$ и 50 ГВт/м² (а–в соответственно)

При тепловом потоке $q = 2 \text{ ГВт/м}^2$ наблюдается некоторая корреляция кривых $\eta(t_{\text{и}})$ для сплава ВТ5 и стали 12Х18Н10Т в диапазоне 20...70 мкс, при этом обрабатываемость сплава ВТ5 в 1,5–2 раза выше, чем у стали 12Х18Н10Т. При тепловом потоке $q = 10 \text{ ГВт/м}^2$ кривая $\eta(t_{\text{и}})$ для сплава ВТ5 ближе всего расположена к кривой $\eta(t_{\text{и}})$ для стали 12Х18Н10Т. Видно, что обрабатываемость сплава ВТ5 выше, чем у других исследуемых материалов. При тепловом потоке $q = 50 \text{ ГВт/м}^2$ кривая $\eta(t_{\text{и}})$ для сплава ВТ5 ближе всего расположена к кривой $\eta(t_{\text{и}})$ для стали 12Х18Н10Т при длительности импульса менее 1,6 мкс и к кривой $\eta(t_{\text{и}})$ для меди при длительности импульса более 1,6 мкс. Обрабатываемость сплава ВТ5 при тепловом потоке $q = 50 \text{ ГВт/м}^2$ также выше, чем у большинства других исследуемых материалов.

Приведенные на рис. 6 зависимости $\eta(t_{\text{и}})$ наглядно показывают, что при всех трех рассмотренных значениях теплового потока $q = 2, 10$ и 50 ГВт/м^2 , соответствующих чистовой, получистовой и черновой ЭЭО, обрабатываемости сплава ВТ5 и других материалов различны, следовательно, и рациональные режимы обработки также будут различаться. Отмечено, что обрабатываемость сплава ВТ5 выше, чем у всех других исследуемых материалов, что можно объяснить хорошей обрабатываемостью методом ЭЭО входящих в состав сплава ВТ5 алюминия и титана.

Заключение. Приведены результаты теоретических исследований ЭЭО сплава ВТ5. С учетом расчетов, сравнений и сбора данных подготовлен комплект теплофизических параметров сплава ВТ5, необходимый для теоретического исследования его обрабатываемости методом ЭЭО на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала (задачи Стефана). Численные результаты получены с использованием программного обеспечения Erosion.

Установлены зависимости глубины проплавления от длительности импульса при разных значениях плотности теплового потока, на основании анализа которых определены следующие важные для обрабатываемости сплава ВТ5 показатели:

- минимальная для ЭЭО длительность импульса при разных значениях плотности теплового потока;
- максимальная и эффективная глубины проплавления при разных значениях плотности теплового потока и соответствующие им длительности импульсов.

Показано, что при увеличении плотности теплового потока время действия теплового источника необходимо уменьшать.

Выявлены различия рационального режима обработки сплава ВТ5 и режимов ЭЭО других исследуемых материалов. Для назначения рациональных режимов обработки материалов необходимы дополнительные экспериментальные исследования с учетом рекомендаций, приведенных в настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Золотых Б.Н., Любченко Б.М. Инженерная методика расчета технологических параметров ЭЭО. М., Машиностроение, 1981.
- [2] Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
- [3] Nair S.S., Joshi N. Trends in wire electrical discharge machining (WEDM): a review. *IJERA*, 2014, vol. 4, no. 12-1, pp. 71–76.
- [4] Chandramouli S., Shrinivas Balraj U., Eswaraiiah K. Optimization of electrical discharge machining process parameters using Taguchi method. *IJAME*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 425–434.
- [5] Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Дис. ... д-ра техн. наук. М., МИЭМ, 1968.
- [6] Халдеев В.Н., Макаров М.Н. О тепловом действии электрического импульса. *Металлообработка*, 2016, № 1, с. 23–28.
- [7] Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М., 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. Сер. Машиностроение*, 2011, Спец. выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение», с. 67–74.
- [9] Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные методы. Кн. 2. Методы математической физики. М., Академия, 2013.
- [10] Окулов Н.А. Об одном численном методе решения одномерных задач типа Стефана. *Вычислительные методы и программирование*, 2011, т. 12, № 2, с. 238–246.
- [11] Gupta S.C. The classical Stefan problem. Amsterdam, Elsevier, 2003.
- [12] 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>
- [13] Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., ред. Физические величины. М., Энергоатомиздат, 1991.
- [14] Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М., Металлургия, 1989.

- [15] Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М., Машиностроение, 1975.
- [16] Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М., Metallurgia, 1980.
- [17] Шлямнев А.П., Свистунова Т.В., Лапшина О.Б. и др. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы. М., Интермет Инжиниринг, 2000.
- [18] Дриц М.Е., ред. Свойства элементов. М., Metallurgia, 1985.
- [19] Desai P.D. Thermodynamic properties of iron and silicon. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1986, vol. 15, no. 3, pp. 967–983. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555761>
- [20] Desai P.D. Thermodynamic properties of manganese and molybdenum. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1987, vol. 16, no. 1, pp. 91–108. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555794>
- [21] Thermophysical properties of materials for water cooled reactors. *IAEA-TECDOC-949*. Vienna, IAEA, 1997.
- [22] Desai P.D. Thermodynamic properties of selected binary aluminium alloy systems. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1987, vol. 16, no. 1, pp. 109–124. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555788>
- [23] Седов Ю.Е., Адаскин А.М. Справочник молодого термиста. М., Высшая школа, 1986.
- [24] The periodic table of the elements. *webelements.com: веб-сайт*. URL: <http://www.webelements.com> (дата обращения: 05.05.2023).
- [25] AISI type 304 stainless steel. *asm.matweb.com: веб-сайт*. URL: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304A> (дата обращения: 05.05.2023).
- [26] Характеристика материала ВТ5. *splav-kharkov.com: веб-сайт*. URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1285 (дата обращения: 05.05.2023).

Ставицкий Иван Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Наумов Антон Петрович — младший научный сотрудник ИПТМ РАН (Российская Федерация, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ставицкий И.Б., Наумов А.П. Назначение рациональных режимов электроэрозионной обработки деталей из титанового сплава ВТ5 на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 3 (146), с. 98–112. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-98-112>

OPTIMIZING RATIONAL MODES IN THE ELECTRODISCHARGE MACHINING OF PARTS MADE OF VT5 TITANIUM ALLOY BASED ON SOLVING THE PROBLEM OF PHASE MATERIAL CONVERSION BOUNDARY DISPLACEMENT

I.B. Stavitskiy¹

stav@bmstu.ru

A.P. Naumov²

ant91on@yandex.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² IMT RAS, Chernogolovka, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

The paper presents results of theoretical studies of the VT5 titanium alloy machinability by the electrodischarge machining method based on solving the thermal problem of the material phase transformation boundary displacement (Stefan problem). It proposes a method for determining parameters of electrical pulses for the VT5 alloy electrodischarge machining in order to increase the process productivity; recommendations are provided for that purpose. Density of the heat flux and its duration were determined necessary for implementation of the VT5 alloy electrodischarge machining process. Dependences were established of the minimum value of the heat flux pulse duration, when the VT5 alloy electrodischarge machining process was possible, and of maximum value of the heat flux pulse duration ensuring maximum removal of the VT5 alloy from the workpiece in one pulse, on the heat flux density. It is shown that for the maximum productivity of the VT5 alloy electrodischarge machining at the heat flux density used, it is necessary to assign effective duration of such a flux. Dependences of the heat flux effective duration on its density were established. Besides, to assign rational modes of VT5 alloy electrodischarge machining, relationships were established and provided between the VT5 alloy machinability curves (dependences of the material penetration depth on the pulse duration) and other materials, including those for which rational modes are currently defined

Keywords

Electrodischarge machining, pulse parameters, machinability, VT5 alloy, heat flux density, electrical pulse duration, simulation, Stefan problem

Received 12.09.2022

Accepted 13.02.2023

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Zolotykh B.N., Lyubchenko B.M. Inzhenernaya metodika rascheta tekhnologicheskikh parametrov EEO [Engineering methodology for calculating the technological parameters of EDM]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981.
- [2] Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki [Electrical discharge machining of aerospace products]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010.
- [3] Nair S.S., Joshi N. Trends in wire electrical discharge machining (WEDM): a review. *IJERA*, 2014, vol. 4, no. 12-1, pp. 71–76.
- [4] Chandramouli S., Shrinivas Balraj U., Eswaraiah K. Optimization of electrical discharge machining process parameters using Taguchi method. *IJAME*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 425–434.
- [5] Zolotykh B.N. Osnovnye voprosy teorii elektricheskoy erozii v impulsnom razryade v zhidkoy dielektricheskoy srede. Dis. d-ra tekhn. nauk [Basic questions of the theory of electrical erosion in a pulsed discharge in a liquid dielectric. Dr. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, MIEM, 1968 (in Russ.).
- [6] Khaldeev V.N., Makarov M.N. On a thermal effect of an electric impulse. *Metall-obrabotka*, 2016, no. 1, pp. 23–28 (in Russ.).
- [7] Kreith F., Black W.Z. Basic heat transfer. New York, Harper & Row, 1980.
- [8] Stavitskiy I.B. Determination of rational modes of electroerosive machining based on the solution of the thermal problem of moving the boundary of the phase transformation of the material. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2011, Spec. iss. "Power and Transport Machine Building", pp. 63–73 (in Russ.).
- [9] Kalitkin N.N., Koryakin P.V. Chislennyye metody. Kn. 2. Metody matematicheskoy fiziki [Numerical methods. P. 2. Methods of mathematical physics]. Moscow, Akademiya Publ., 2013.
- [10] Okulov N.A. On a numerical method for solving one-dimensional Stefan-type problems. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye* [Numerical Methods and Programming], 2011, vol. 12, no. 2, pp. 238–246 (in Russ.).
- [11] Gupta S.C. The classical Stefan problem. Amsterdam, Elsevier, 2003.
- [12] 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 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1599>
- [13] Grigoryev I.S., Meylikhov E.Z., ed. Fizicheskie velichiny [Physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991.
- [14] Zinovyev V.E. Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989.
- [15] Novitskiy L.A., Kozhevnikov I.G. Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh [Thermophysical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.

- [16] Livshits B.G., Kraposhin V.S., Linetskiy Ya.L. Fizicheskie svoystva metallov i splavov [Physical properties of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980.
- [17] Shlyamnev A.P., Svistunova T.V., Lapshina O.B., et al. Korroziionnostoykie, zharostoykie i vysokoprochnye stali i splavy [Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2000.
- [18] Drits M.E., ed. Svoystva elementov [Properties of elements]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985.
- [19] Desai P.D. Thermodynamic properties of iron and silicon. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1986, vol. 15, no. 3, pp. 967–983. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555761>
- [20] Desai P.D. Thermodynamic properties of manganese and molybdenum. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1987, vol. 16, no. 1, pp. 91–108. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555794>
- [21] Thermophysical properties of materials for water cooled reactors. *IAEA-TECDOC-949*. Vienna, IAEA, 1997.
- [22] Desai P.D. Thermodynamic properties of selected binary aluminium alloy systems. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1987, vol. 16, no. 1, pp. 109–124. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555788>
- [23] Sedov Yu.E., Adaskin A.M. Spravochnik molodogo termista [Handbook of young thermist]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986.
- [24] The periodic table of the elements. *webelements.com: website*. Available at: <http://www.webelements.com> (accessed: 05.05.2023).
- [25] AISI type 304 stainless steel. *asm.matweb.com: website*. Available at: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304A> (accessed: 05.05.2023).
- [26] Kharakteristika materiala VT5 [Characteristics of VT5 material]. *splav-kharkov.com: website* (in Russ.). Available at: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1285 (accessed: 05.05.2023).

Stavitskiy I.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Tool Engineering and Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Naumov A.P. — Research Assistant, IMT RAS (Akademika Osip'yana ul. 6, Chernogolovka, Moscow Region, 142432 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Stavitskiy I.D., Naumov A.P. Optimizing rational modes in the electrodischarge machining of parts made of VT5 titanium alloy based on solving the problem of phase material conversion boundary displacement. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 3 (146), pp. 98–112 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-98-112>