

УДК 621.9.048.4

**Назначение рациональных режимов
электроэрозионной обработки деталей из стали
12X18H10T на основе решения тепловой
задачи о перемещении границы фазового
превращения материала**

Ставицкий И. Б.^{1,*}, Наумов А. П.¹

^{*}vats59@mail.ru

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

В статье представлены результаты теоретических исследований обрабатываемости стали 12X18H10T методом электроэрозионной обработки, основанные на решении тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала. Предложены рекомендации по назначению рациональных режимов электроэрозионной обработки стали 12X18H10T; определены минимальные плотность теплового потока и его длительность, необходимые для реализации процесса электроэрозионной обработки стали 12X18H10T. Установлена зависимость минимальных значений длительностей импульсов теплового потока, при которых происходит электроэрозионная обработка стали 12X18H10T, от плотности этого теплового потока. Определены максимальные значения длительностей импульсов тепловых потоков, действующих на сталь 12X18H10T, обеспечивающие максимальный съем материала за один импульс, а также эффективные длительности тепловых потоков, обеспечивающие максимальную производительность процесса электроэрозионной обработки стали 12X18H10T, соответствующие используемой плотности теплового потока.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, режимы электроэрозионной обработки, обрабатываемость стали 12X18H10T, длительность электрического импульса, плотность теплового потока

Введение

В настоящее время в авиационной, ракетно-космической и в ряде других отраслей промышленности для изготовления деталей топливной арматуры широко применяют сталь 12X18H10T. Как правило, детали из этого материала имеют небольшие габаритные размеры, содержат отверстия малого диаметра или являются сложнопрофильными. Обработка таких деталей традиционными механическими методами часто затруднительна или невозможна. В связи с этим все большее применение при изготовлении таких деталей находят электрофизические методы обработки, в частности электроэрозионная обработка (ЭЭО). Этот метод, как правило, применяют для изготовления сложнопрофильных малогабаритных деталей и отверстий малого диаметра. Несомненными преимуществами ЭЭО

являются возможность получать отверстия, в том числе пересекающиеся, практически без заусенцев, использование непрофилированного электрода-инструмента (ЭИ), отсутствие силового воздействия инструмента на заготовку и др. Эффективность метода ЭЭО обуславливает заметное увеличение номенклатуры выпускаемого и внедряемого оборудования, в том числе специализированных станков для изготовления отверстий малого диаметра. Однако, несмотря на все более широкое применение этого метода в промышленности, его возможности реализуются далеко не полностью. Часто это вызвано необоснованным выбором и назначением режимов обработки, что приводит не только к значительному снижению производительности обработки, а в случае прошивания отверстий и к увеличению износа ЭИ, но и уменьшению точности получаемых отверстий.

На практике рациональные режимы ЭЭО, как правило, определяют по эмпирическим зависимостям. Однако эти зависимости установлены только для небольшой номенклатуры традиционных для ЭЭО материалов – как правило, наиболее широко используемых инструментальных сталей, меди и некоторых других. Расчетные зависимости для назначения рациональных режимов ЭЭО многих материалов, в том числе стали 12X18H10T, еще не разработаны. Традиционно их получают в результате проведения большого количества экспериментальных исследований, что связано с большими затратами времени и средств [1 – 6]. А поскольку такие зависимости получают без учета физических особенностей процесса ЭЭО, по ним далеко не всегда можно назначить оптимальные режимы, обеспечивающие максимально возможную производительность процесса формообразования. Поэтому проблема определения и назначения рациональных режимов ЭЭО весьма актуальна.

Определение рациональных режимов ЭЭО стали 12X18H10T

Получение эмпирических зависимостей для назначения оптимальных 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 стали 12X18H10T была использована тепловая задача о перемещении границы фазового превращения материала – задача Стефана [7,8]. Решение задачи позволяет определить глубину проплавления материала, исходя из его физических свойств, плотности теплового потока q и времени его действия (рис.1).

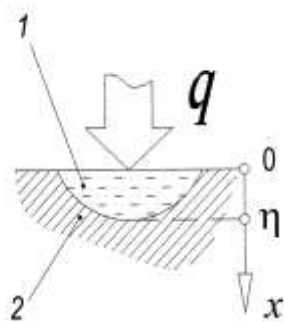


Рис 1. Схема для определения границы фазового превращения материала: 1 – жидкая фаза; 2 – твердая фаза

Задача Стефана для двухфазной системы описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, представляющих собой основное уравнение теплопроводности для случая нестационарной теплопроводности в полубесконечном твердом теле [7, 9]:

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

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

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:

$$\begin{aligned}T_1(x, 0) &= T_{\text{эф}} = T_{\text{пл}}; \\ T_2(x, 0) &= T_0; \\ T_1(\eta, t) &= T_2(\eta, t) = T_{\text{пл}}; \\ T(\infty, t) &= T_0;\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}q &= -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0}; \\ -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=\eta} + \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\eta} &= -\rho \cdot q_{\text{пл}} \frac{\partial \eta}{\partial t}.\end{aligned}$$

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

Поскольку интенсивность источника теплоты есть функция времени, в расчетах использовано некоторое ее эффективное значение и соответствующая ему температура $T_{\text{эф}}$. 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, а шестое – условие сопряжения тепловых потоков (знак минус означает, что на границе фазового превращения происходит поглощение теплоты).

Учитывая, что время действия источника теплоты для рассматриваемого диапазона режимов мало ($t_{\text{и}} = 1 \dots 100$ мкс), примем допущение, что тепловой поток постоянен:

$$q(t) = q_0 = \text{const}, \quad 0 < t < t_{\text{и}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{и}}$ – время действия импульса тока.

Для решения системы уравнений (1) с учетом начальных и граничных условий (2) использовали специальную программу Erosion, позволяющую анализировать процессы удаления материала при ЭЭО [7 – 14]. Чтобы для стали 12X18H10T получить решение задачи (определить глубину проплавления материала, исходя из плотности теплового потока и времени его действия), необходимо ввести следующие ее физические свойства: плотность $\rho_{ж}$ жидкой фазы при $T_{пл}$, плотность $\rho_{т}$ твердой фазы при T_0 , удельную теплоемкость c_{p1412} жидкой фазы при $T_{пл}$, удельную теплоемкость c_{p20} твердой фазы при T_0 , температуру плавления $T_{пл}$, скрытую теплоту плавления $q_{пл}$, теплопроводность λ_{1412} жидкой фазы при $T_{пл}$, теплопроводность λ_{20} твердой фазы при T_0 , т.е. теплофизические константы материала. В литературных источниках указанных данных для стали 12X18H10T недостаточно. Поэтому были найдены соответствующие величины для составляющих сталь 12X18H10T элементов, а затем по правилу аддитивности Коппа – Неймана [15] определены значения указанных констант для рассматриваемой стали.

Согласно ГОСТ5632-2014, химический состав стали 12X18H10T следующий, % (мас.):

$$C \leq 0,12 \pm 0,01; Si \leq 0,8^{+0,5}; Mn \leq 2,0 \pm 0,05; Cr (17,0 \dots 19,0) \pm 0,20; \\ Ni (9,0 \dots 11,0) \pm 0,15; S \leq 0,020^{+0,005}; P \leq 0,04^{+0,005}; Ti = (0,6 \dots 0,8) \pm 0,05; \\ Fe \text{ остальное.}$$

Согласно работе [16] плотность стали 12X18H10T $\rho_{т} = 7900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. На основании того, что плотность всех металлов при температуре плавления уменьшается в среднем на 5 % (за исключением Bi, Sb, As, которые уплотняются на 1...1,5 %), можно достаточно точно определить плотность исследуемой стали при ее температуре плавления:

$$\rho_{ж} = \rho(1 - 0,05) = 7900(1 - 0,05) = 7505 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

В результате анализа значений теплофизических констант для сталей 12X18H10T [15 – 23] и проведенных вычислений были получены следующие значения теплофизических констант для расчетов по программе Erosion:

$$\rho_{ж} = 7505 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \rho_{т} = 7900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c_{pж} = 558,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, c_{pт} = 406,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, T_{пл} = 1685 \\ K, q_{пл} = 300716 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \lambda_{ж} = 34,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \lambda_{т} = 14,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

После ввода этих данных в программу Erosion были определены зависимости глубины проплавления η от длительности импульса t при действии различных тепловых потоков q , по которым для различных значений теплового потока q были получены минимально необходимая для осуществления обработки стали 12X18H10T длительность импульса $t_{мин}$, максимальная глубина проплавления материала η_{max} и соответствующая ей длительность импульса t_{max} .

Одним из важных режимных параметров ЭЭО является длительность импульсов тока. Известно [2], что этот параметр оказывает существенное влияние на производитель-

ность процесса обработки. Как правило, его значение выбирают, используя эмпирические зависимости, которые известны для относительно небольшой номенклатуры обрабатываемых материалов, или проводя экспериментальные исследования. Часто найденное значение этого параметра оказывается далеко не оптимальным. Проведенные с использованием описанной выше программы исследования позволили определить зависимость $t_{\min}(q)$, при которой сталь 12X18H10T начинает плавиться, а значит, обрабатываться, т.е. процесс ЭЭО этого материала становится возможным (рис.2). При меньшей длительности импульсов названный материал в зоне действия теплового потока не успевает нагреться до температуры плавления и не удаляется.

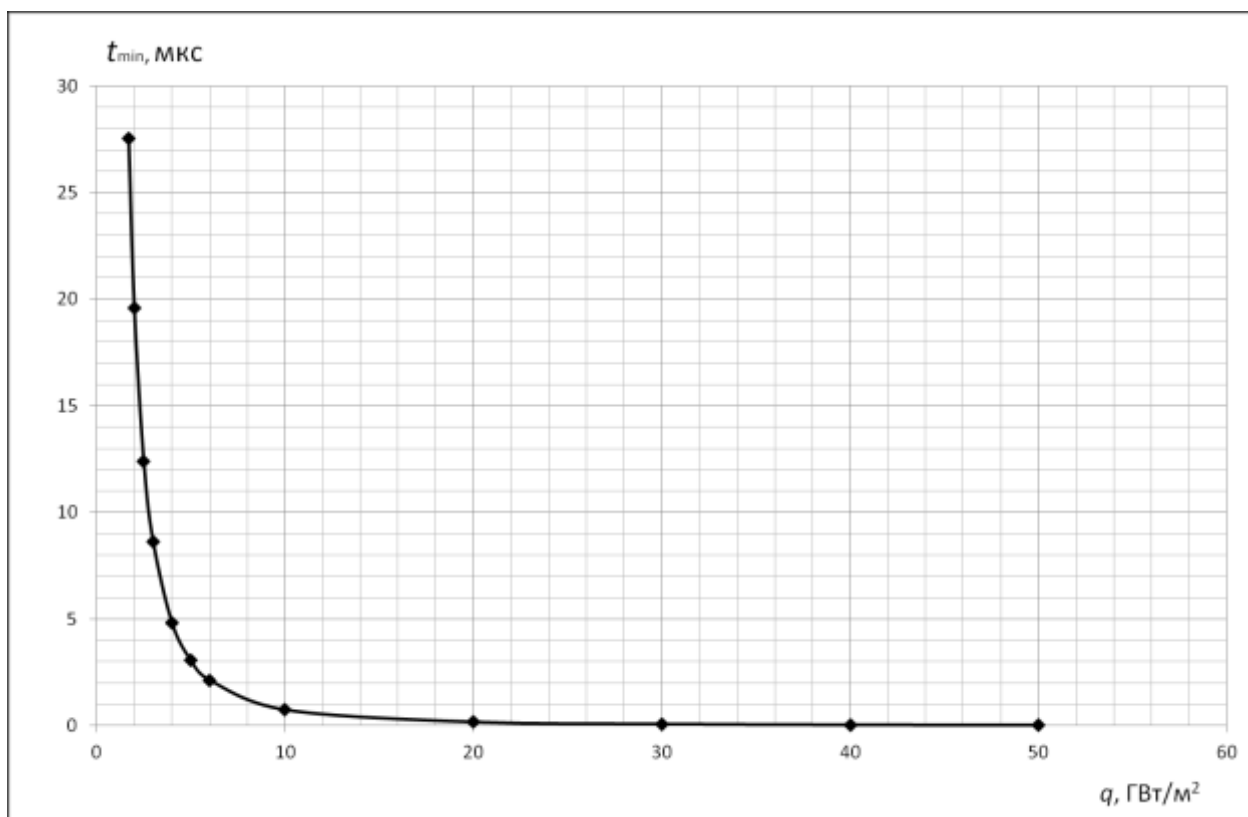


Рис.2. Зависимость минимальной длительности импульсов $t_{\min}$ от плотности теплового потока q

Известно [2, 7], что при увеличении плотности теплового потока глубина проплавления обрабатываемого материала и соответственно объем образующейся на поверхности лунки возрастают, что при обеспечении эффективного удаления продуктов эрозии и газов из межэлектродного промежутка приводит к росту производительности процесса ЭЭО.

Проведенные с использованием программы Erosion исследования показали, что при обработке стали 12X18H10T максимальная глубина $\eta_{\max}$ ее проплавления при увеличении плотности теплового потока q возрастает до некоторого максимального значения $\eta_{\max}$ (рис.3). Превышение этого значения возможно только при существенном увеличении плотности теплового потока, что соответствует режимам неразмерной обработки.

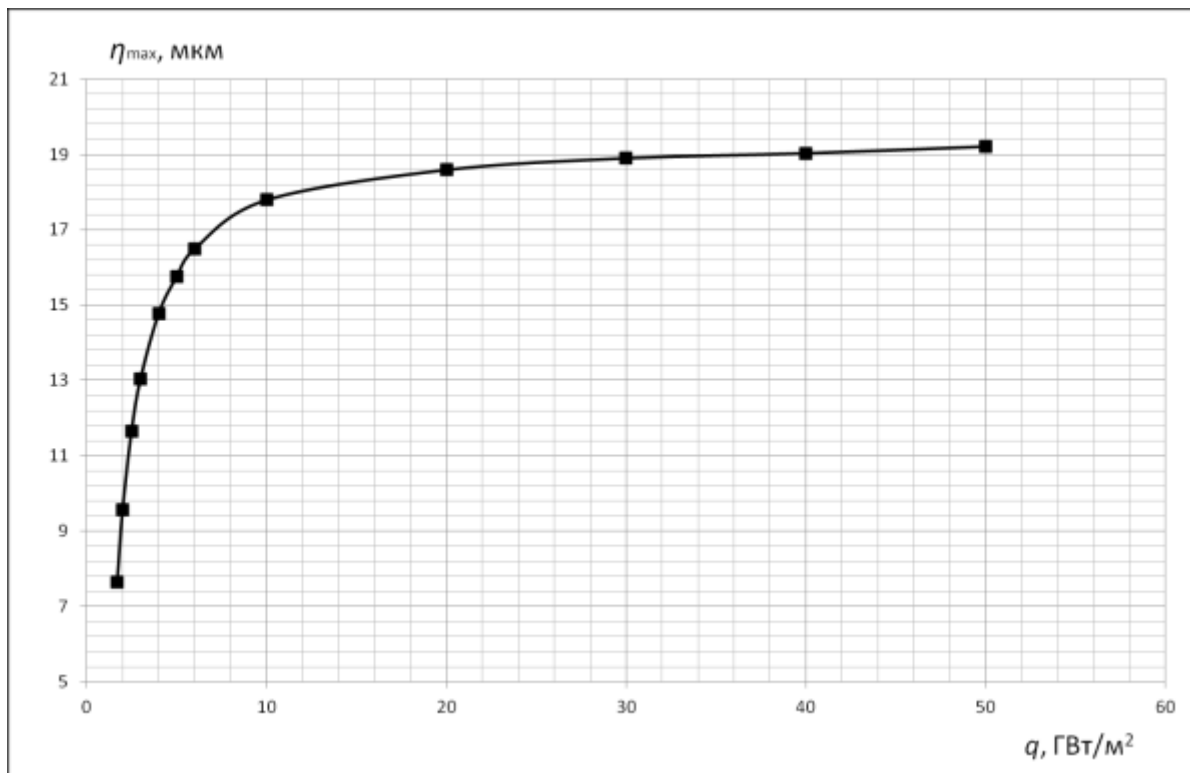


Рис.3. Зависимость максимальной глубины проплавления $\eta_{\max}$ от плотности теплового потока q

Также очевидно, что каждому значению $\eta_{\max}$ соответствует определенное значение длительности импульса $t_{\max}$, превышение которого не приведет к увеличению съема материала, но уменьшит частоту следования импульсов, а значит, производительность процесса ЭЗО (рис.4).

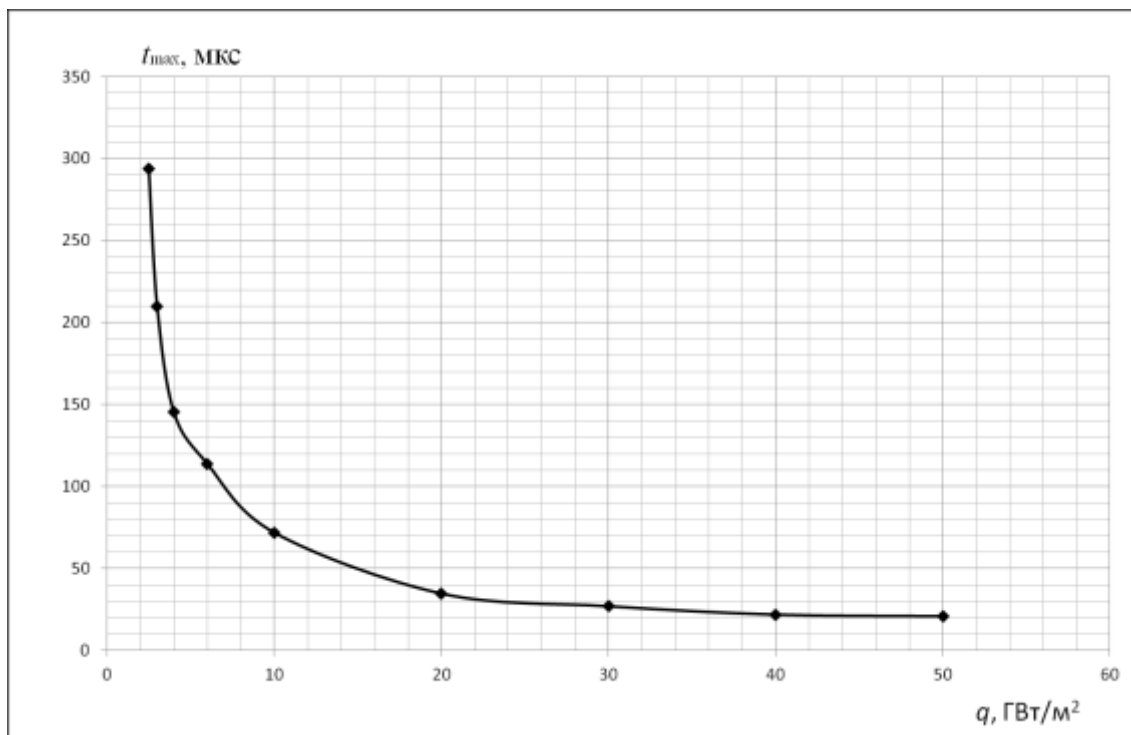


Рис.4. Зависимость максимальной длительности импульса $t_{\max}$ от плотности теплового потока q

Из анализа графиков $\eta(t)$, полученных для различных тепловых потоков q , следует, что глубина проплавления материала значительно возрастает в течение времени $t_{\text{эф}}$, названным эффективной длительностью импульса. При этом материал проплавляется до эффективной глубины $\eta_{\text{эф}}$. При дальнейшем повышении длительности импульса до t_{max} происходит лишь незначительное увеличение глубины проплавления материала до η_{max} . В качестве примера на рис.5. представлена зависимость $\eta(t)$ для стали 12X18H10T при $q=1,7$ ГВт/м². На рис.5 видно, что при увеличении длительности импульса с 141 до 225 мкс, т.е. на 60 % глубина проплавления материала возрастает лишь на 0,56 мкм, т.е. на 7,9 %.

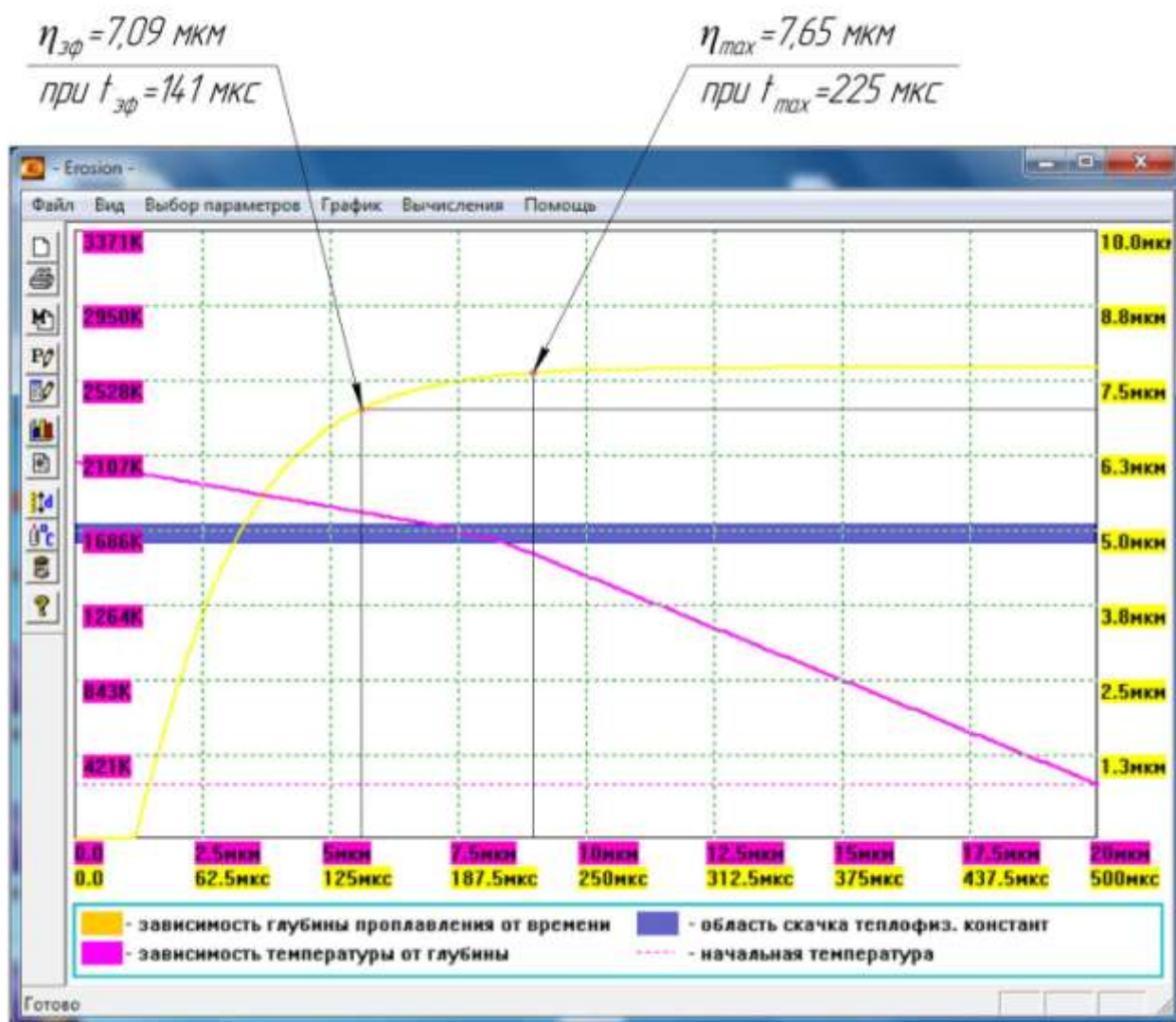


Рис.5. Зависимость глубины проплавления η от длительности импульса t при $q=1,7$ ГВт/м² для стали 12X18H10T

Таким образом, значительное увеличение длительности импульса от $t_{\text{эф}}$ до t_{max} приводит лишь к незначительному росту глубины проплавления материала, удаляемого за один импульс, но при этом существенно ограничивает возможность повышения максимальной частоты следования импульсов. В результате производительность процесса ЭЗО с увеличением длительности импульса от $t_{\text{эф}}$ до t_{max} возрастает незначительно. Следовательно, ЭЗО целесообразно проводить при значениях t , близких к $t_{\text{эф}}$. При этом, несмотря

на незначительное снижение объема удаляемого за один импульс материала, можно существенно увеличить частоту следования импульсов, а значит, количество образующихся в единицу времени лунок, т.е. производительность процесса ЭЭО.

На рис.6 и рис.7 представлены зависимости эффективной глубины проплавления $\eta_{\text{эф}}$ стали 12X18H10T и эффективной длительности импульса $t_{\text{эф}}$ от плотности теплового потока q .

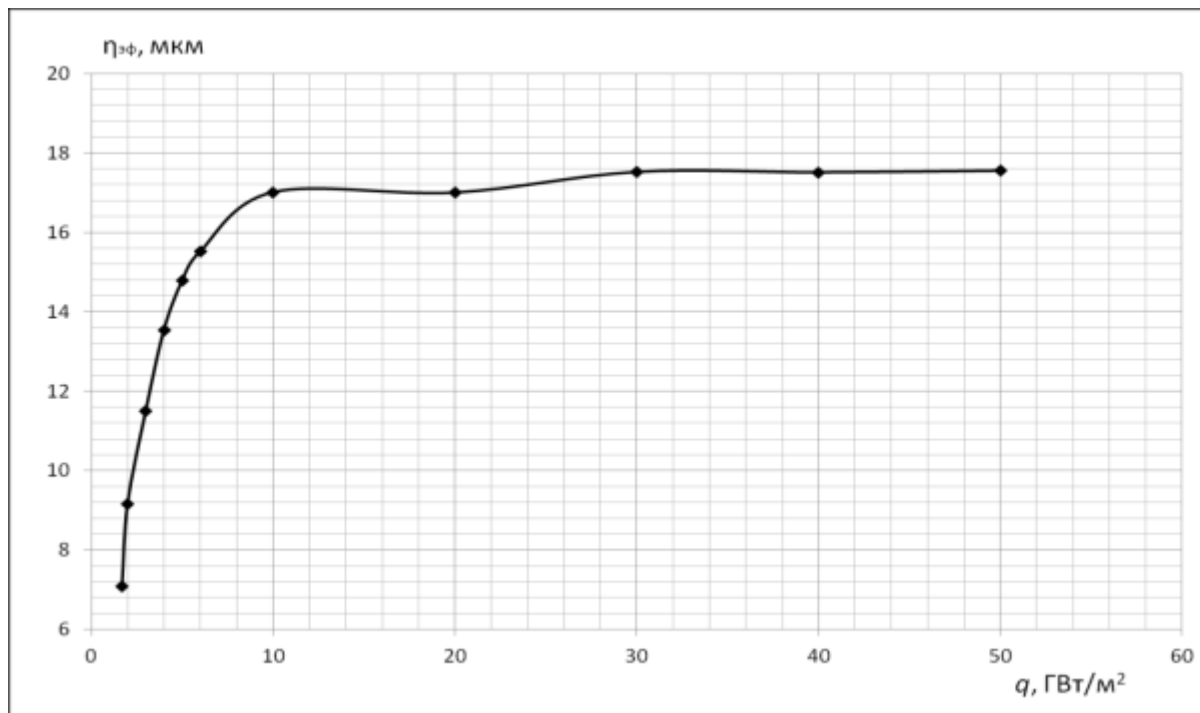


Рис. 6. Зависимость эффективной глубины проплавления $\eta_{\text{эф}}$ от плотности теплового потока q

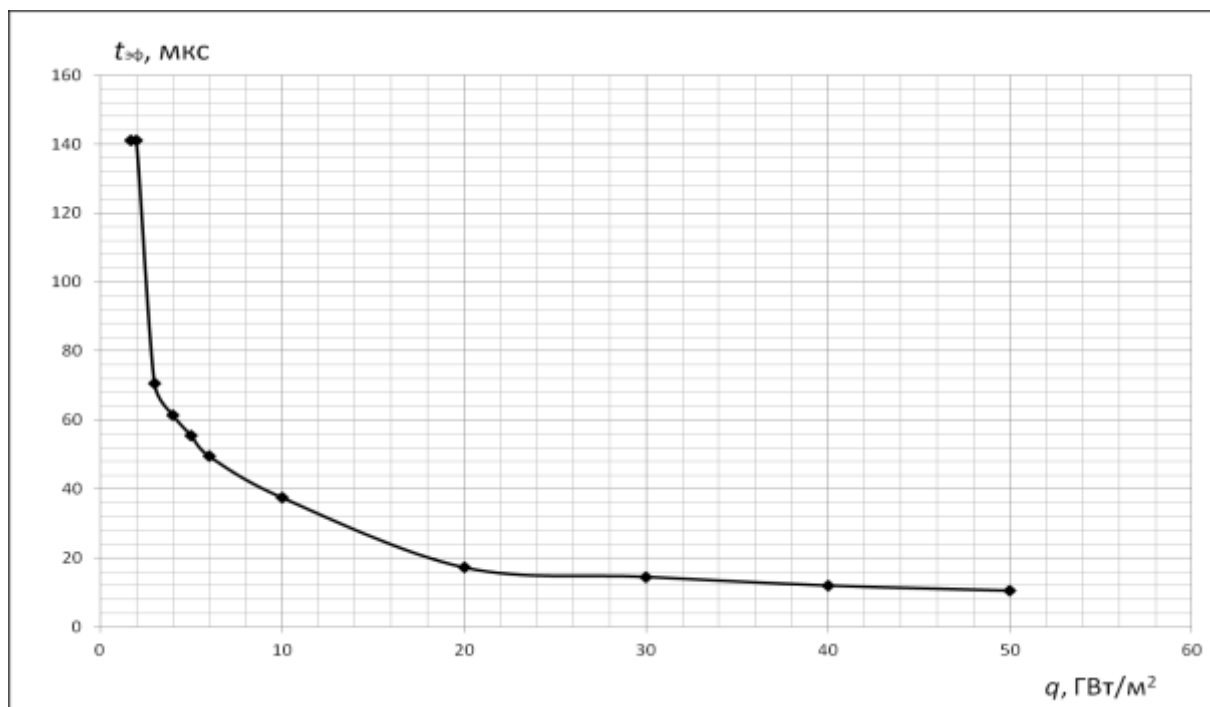


Рис. 7. Зависимость эффективной длительности импульса $t_{\text{эф}}$ от плотности теплового потока q

Известно [7], что причиной электрической эрозии материала является его плавление и испарение в локальной зоне, вызванные энергией $W_{\text{и}}$, которая выделяется на электродах за время существования электрического разряда:

$$W_{\text{и}} = \int_0^t U I dt \quad (4)$$

где U – напряжение на электродах; I – ток разряда.

Таким образом, энергия $W_{\text{и}}$ однозначно определяется режимом обработки.

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

$$W_{\text{и}} = W_{\text{с}} + W_{\text{к}} + W_{\text{а}}. \quad (5)$$

При этом распределение энергии $W_{\text{и}}$ между тремя ее составляющими $W_{\text{с}}$, $W_{\text{к}}$ и $W_{\text{а}}$ в настоящее время аналитическими методами расчета определить невозможно. Следовательно, не установлена точная корреляция между режимными параметрами обработки и тепловым потоком, возникающим вследствие прохождения электрического разряда.

Для определения рациональных режимов ЭЭО предлагается установить связь между обрабатываемостями исследуемого материала и материалов, для которых в настоящее время рациональные режимы определены [11]. Можно утверждать, что материалы, имеющие совпадающие или близкие кривые $\eta(t)$, следует обрабатывать на одних и тех же или близких режимах.

Зависимости $\eta(t)$ для стали 12X18H10T и зависимости $\eta(t)$ для других материалов, сравнивали при трех значениях теплового потока $q=2, 10$ и 50 ГВт/м^2 , соответствующих чистовой, получистовой и черновой ЭЭО соответственно.

Для теплового потока $q=2 \text{ ГВт/м}^2$ и длительности импульса $t=0...300 \text{ мкс}$ корреляции кривой $\eta(t)$ для стали 12X18H10T с кривыми $\eta(t)$ для других исследуемых материалов (медь, титан, серебро, сталь 45, сплав ВТ14 и др.) не наблюдается. В связи с этим можно заключить, что обрабатываемость этой стали при малых плотностях теплового потока, соответствующих чистовым режимам ЭЭО, существенно отличается от обрабатываемости других материалов, а значит, и рациональный режим ее обработки также будет отличаться. Для его назначения необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования с учетом рекомендаций, представленных в настоящей работе.

Для теплового потока $q=10 \text{ ГВт/м}^2$ кривая $\eta(t)$ для стали 12X18H10T близка к кривой $\eta(t)$ для сплава ВТ14 в диапазоне $t=0...12 \text{ мкс}$ (рис.8). Исходя из этого можно утверждать, что обрабатываемость стали 12X18H10T при тепловых потоках $q \approx 10 \text{ ГВт/м}^2$ близка к обрабатываемости сплава ВТ14. Однако, сплав ВТ14 имеет специфические особенности ЭЭО и рациональные режимы для его обработки не определены. Поэтому для назначения рациональных режимов ЭЭО стали 12X18H10T на получистовых режимах соответствующим тепловым потокам $q \approx 10 \text{ ГВт/м}^2$ также необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования с учетом вышеназванных рекомендаций.

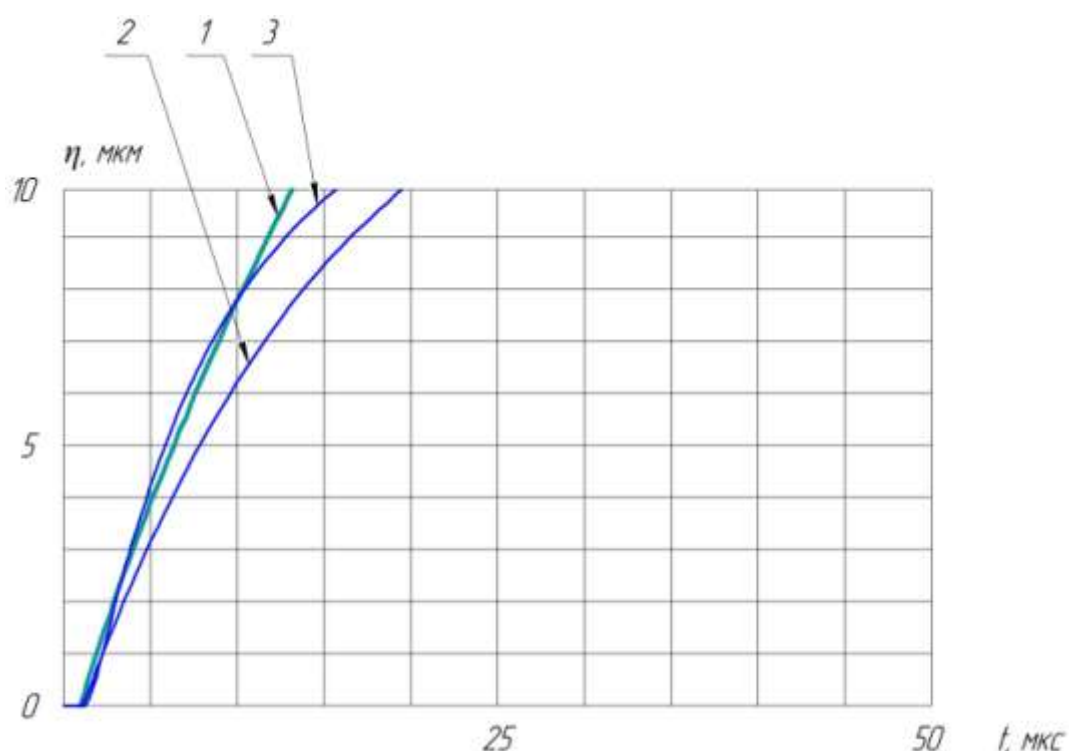


Рис.8 Зависимость глубины η проплавления стали 12X18H10T от длительности импульса t при плотности теплового потока $q=10 \text{ ГВт/м}^2$: 1 – сталь 12X18H10T, 2 – Ti, 3 – VT14.

Для теплового потока $q=50 \text{ ГВт/м}^2$ кривая $\eta(t)$ для стали 12X18H10T близка к кривым $\eta(t)$ для меди и платины (рис.9). Исходя из того, что ЭЭО меди в настоящее время применяется достаточно широко и ее рациональные режимы известны, можно утверждать, что для ЭЭО стали 12X18H10T на черновых режимах при коротких импульсах $t=0...5 \text{ мкс}$ целесообразно использовать режимы, применяемые для обработки меди.

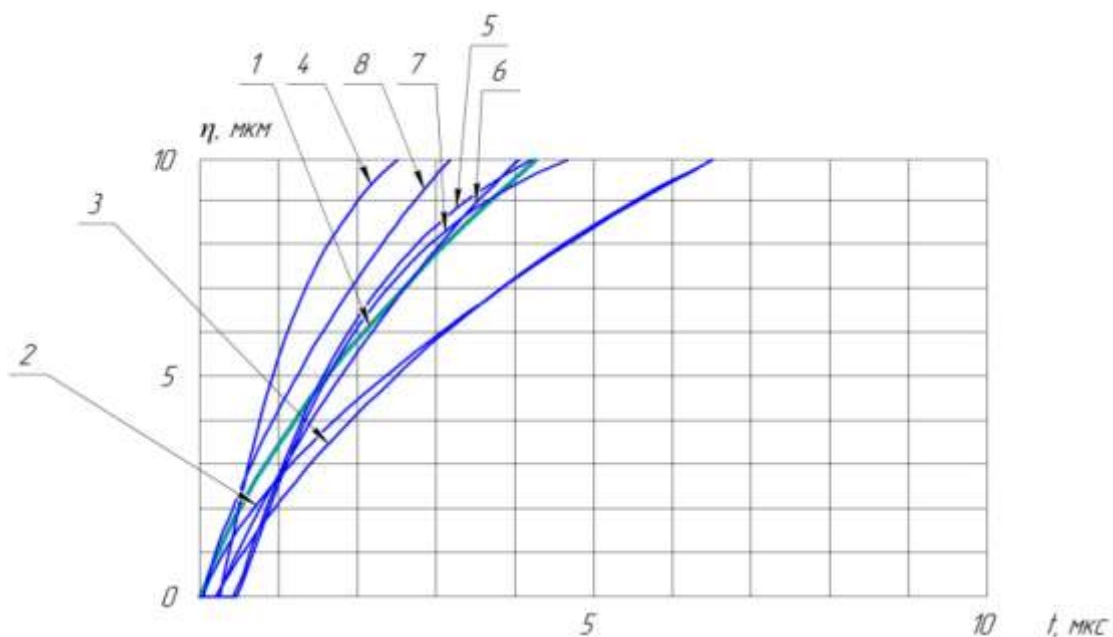


Рис.9 Зависимость глубины η проплавления стали 12X18H10T от длительности импульса t при плотности теплового потока $q=50 \text{ ГВт/м}^2$: 1 – сталь 12X18H10T, 2 – Ti, 3 – Fe, 4 – Ag, 5 – ЗлСрМ375-160, 6 – Pt, 7 – Cu, 8 – Br14.

Следует отметить, что значения длительности импульса, соответствующие глубине проплавления материала $\eta > 10$ мкм, в работе не рассмотрены, так как глубина проплавления $\eta > 10$ мкм соответствует крайне грубому качеству обрабатываемой поверхности и не является размерной обработкой.

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты исследований, связанные с изучением электроэрозионной обрабатываемости стали 12X18H10T и назначением рациональных режимов ее обработки этим методом. В ходе работы был проведен сбор справочных данных по теплофизическим параметрам стали 12X18H10T и ее составляющих. В результате был подготовлен комплект исходных данных (теплофизические параметры) для решения задачи Стефана с помощью программы Erosion.

В результате решения задачи Стефана с использованием программы Erosion были получены следующие зависимости: глубины проплавления стали 12X18H10T от времени действия теплового потока (импульса тока), а также необходимой для начала плавления материала минимальной длительности импульса теплового источника, максимальных глубины проплавления и длительности импульса, эффективных глубины проплавления и длительности импульса от плотности теплового потока.

Также было показано, что при небольших и средних плотностях теплового потока, соответствующих чистовым и получистовым режимам ЭЭО, обрабатываемость стали 12X18H10T существенно отличается от обрабатываемости других материалов, а значит, рациональный режим ее обработки также будет отличаться. При высоких плотностях теплового потока, соответствующих черновым режимам ЭЭО, обрабатываемость стали 12X18H10T при коротких импульсах t менее 5 мкс схожа с обрабатываемостью меди и для обработки стали 12X18H10T целесообразно использовать режимы, применяемые для обработки меди. Кроме того, показано, что обработку стали 12X18H10T целесообразно проводить на коротких импульсах ($t = 1 \dots 150$ мкс), причем с увеличением плотности теплового потока длительность импульсов целесообразно уменьшать.

Представленные на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала результаты работы можно использовать для назначения рациональных режимов ЭЭО стали 12X18H10T.

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. Инженерные методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1981. 52 с.

3. Sharanya S. Nair, Nehal Joshi. Trends in wire electrical discharge machining (WEDM): A review // Int. J. of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4. № 12. Pt.1. P. 71-76.
4. Chandramouli S., Shrinivas Balraj U., Eswaraiah K. Optimization of electrical discharge machining process parameters using Taguchi method // Int. J. of Advanced Mechanical Engineering. 2014. Vol. 4. № 4. Spec. iss. P.425-434.
5. Dhirendra nath mishra, Aarti Bhatia, Vaibhav rana. Study on electro discharge machining (EDM) // Int. J. of Engineering and Science (IJES). 2014. Vol. 3. № 2. P. 24-35.
6. Белов И.И., Груздев А.А., Саушкин Б.П. Влияние параметров режима на технологические характеристики операции электроэрозионной прошивки отверстий в форсунках // Изв. Моск. гос. техн. ун-та МАМИ. 2012. Т. 2. № 2. С. 77-83.
7. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1968. 52 с.
8. Халдеев В.Н., Макаров М.Н. О тепловом действии электрического импульса // Металлообработка. 2016. № 1. С. 23-28.
9. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с. [Kreith F., Black W.Z. Basic heat transfer. N.Y., 1980].
10. Ставицкий И.Б., Хапаев М.М. Особенности электроэрозионной обработки композиционных поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза // Вестник МГТУ. Сер.: Машиностроение. 1997. № 2. С. 95-102.
11. Ставицкий И.Б. Определение рациональных режимов электроэрозионной обработки на основе решения тепловой задачи о перемещении границы фазового превращения материала // Вестник МГТУ. Сер.: Машиностроение. 2011. Спец. выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение». С. 164-171.
12. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные методы. Кн.2: Методы математической физики. М.: Академия, 2013. 302 с.
13. Окулов Н.А. Об одном численном методе решения одномерных задач типа Стефана // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т.12. № 1. С. 238-246.
14. Gupta S.C. The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis. Amst.; Boston: Elsevier, 2003. 385 p.
15. Физические величины: Справочник /А.П. Бабичев и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
16. Бородулин Г.М., Мошкевич Е.И. Нержавеющая сталь. М.: Metallurgy, 1973. 319 с.
17. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: Справочник / Шлямнев А.П. и др. М.: Интермет инжиниринг, 2000. 232 с.
18. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. 2-е изд. М: Metallurgy, 1980. 320 с.
19. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.

20. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1989. 382 с.
21. Свойства элементов: Справочник / под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
22. Desai P.D. Thermodynamic properties of iron and silicon // J. of Physical and Chemical Reference Data. 1986. Vol. 15. № 3. P. 967-984. DOI: [10.1063/1.555761](https://doi.org/10.1063/1.555761)
23. Thermophysical properties of materials for water cooled reactors. Vienna: Int. Atomic Energy Agency (IAEA), 1997. 280 p.

Electrical Discharge 12X18H10T Steel Machining Process Optimization Based on the Task Solution of Moving a Boundary of the Material Phase Change

I.B. Stavitskiy^{1,*}, A.P. Naumov¹

^{*}vats59@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

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

The article presents the theoretical study results of the 12X18H10T steel machinability by electrical discharge machining (EDM), based on the solution of the heat problem on moving a boundary of material phase change, i.e. the Stephen problem. The solution allows us to determine the material melt penetration when exposed to the heat flow based on the time of action of this heat flow and the physical properties of machined material.

The article also presents a dependence of the minimum duration of current pulses, at which 12X18H10T steel starts melting and, respectively, an EDM process becomes possible, on the density of heat flow. Shows that it is expedient to proceed 12X18H10T steel processing with pulse durations corresponding to values, called the effective pulse duration. Exceeding these values does not lead to a substantial increase in the removed material per pulse, but significantly reduces the maximum pulse repetition frequency and hence the EDM performance. Describes dependence of the effective pulse duration on the heat flow density. Shows also the curves of maximum melt penetration of 12X18H10T steel and corresponding pulse duration versus a density of heat flow.

To determine the rational EDM modes of 12X18H10T steel the article offers to find a relationship between its workability and machinability of materials, for which rational EDM modes are, currently, defined. It is shown that at low and medium densities of heat flow that correspond to the finishing and semi-finishing EDM modes, machinability of 12X18H10T steel differs significantly from the workability of other materials, so its rational treatment mode will also differ. Before making decision to use it further pilot studies with regard to the recommendations, presented in the article, are necessary. At high heat flow densities (for instance, 50 GW / m²), corresponding to rough EDM modes, machinability of 12X18H10T steel at fast pulses $t = 0 \dots 5 \mu\text{s}$ is similar to the machinability of copper, and to treat the 12X18H10T steel it is advisable to use copper processing modes. In addition, the article shows that the fast pulses are advisable for pro-

cessing of 12X18H10T steel, and with increasing heat flow density is expedient to reduce pulse duration.

Results obtained by solving the heat problem of Stephen can be useful when defining the rational EDM modes for processing of 12X18H10T steel.

References

1. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaia obrabotka izdelij aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electrical discharge machining of aerospace engineering objects]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2010. 437 p.
2. Zolotikh B.N., Lubchenko B.M. *Inzhenernye metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov elektroerozionnoj obrabotki* [Engineering calculation methods of technological parameters for electrical discharge machining]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 52 p.
3. Sharanya S. Nair, Nehal Joshi. Trends in wire electrical discharge machining (WEDM): A review . *Int. J. of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, no. 12, pt.1, pp.71-76.
4. Chandramouli S., Shrinivas Balraj U., Eswaraiah K. Optimization of electrical discharge machining process parameters using Taguchi method . *Int. J. of Advanced Mechanical Engineering*, 2014, vol. 4, no. 4, spec.iss., pp. 425-434.
5. Dhirendra nath mishra, Aarti Bhatia, Vaibhav rana. Study on electro discharge machining (EDM) . *Int. J. of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, no.2, pp. 24-35.
6. Belov I.I., Gruzdev A.A., Saushkin B. P. Influence of the mode parameters on the technological characteristics of the injector hole broaching operation. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* [News of the Moscow State Technical University MAMI], 2012, vol.2, no.2, pp. 77-83 (in Russ.).
7. Zolotikh B.N. *Osnovnye voprosy teorii elektricheskoy erozii v impulsnom razriade v zhidkoj elektricheskoy srede* [The main issues of the theory of electrical erosion pulsed electrical discharge in liquid environment. Abstr. doct. diss.]. Moscow, 1968. 52 p.
8. Khaldeev V.N., Makarov M.N. On the thermal influence of an electric pulse. *Metalloobrabotka*. [Metal processing], 2016, no. 1, pp. 23-28 (in Russ.).
9. Kreith F., Black W.Z. *Osnovy teploperedachi* [Basic heat transfer]. Moscow: Mir, 1983. 512 p.
10. Stavitskij I.B., Khapaev M.M. Features of electrical discharge machining of composite polycrystalline superhard materials based on diamond. *Vestnik MGTU. Ser.: Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State University. Mechanical engineering and machine science], 1997, no.2, pp. 95-102 (in Russ.).
11. Stavitskij I.B. The definition of rational modes of electrical discharge machining on the basis of the solution of the thermal problem of moving boundaries of phase transformation material. *Vestnik MGTU. Ser.: Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Univer-

- sity. Mechanical engineering and machine science], 2011, spec.iss. «Power and transport engineering», pp. 164-171 (in Russ.).
12. Kalitkin N.N., Koriakin P.V. *Chislennye metody. Kn. 2: Metody matematicheskoy fiziki* [Numerical methods. 2: Methods of mathematical physics]. Moscow: Academy Publ., 2013. 302 p.
 13. Okulov N.A. On a numerical method for solving one-dimensional Stefan-type problems. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Numerical methods and programming], 2011, vol.12, no. 1, pp. 238-246 (in Russ.).
 14. Gupta S.C. *The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis*. Amst.; Boston: Elsevier, 2003. 385 p.
 15. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities.] Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1231 p.
 16. Borodulin G.M., Moshkevich E.I. *Nerzhaveyushchaia stal'* [Stainless steel]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 319 p.
 17. *Korrozionnostojkie, zharostojkie i vysokoprochnye stali i splavy* [Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys]. Moscow: Internet Engineering, 2000. 232 p.
 18. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Linetskij Ia. L. *Fizicheskie svoystva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 320 p.
 19. Novitskij L.A., Kozhevnikov I.G. *Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh* [Thermophysical properties of materials at low temperatures]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 216 p.
 20. Zinovjev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgiya, 1989. 382 p.
 21. *Svoystva elementov* [Properties of elements]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 672 p.
 22. Desai P.D. Thermodynamic properties of iron and silicon. *J. of Physical and Chemical Reference Data*, 1986, vol. 15, no. 3, pp. 967-984. DOI: [10.1063/1.555761](https://doi.org/10.1063/1.555761)
 23. *Thermophysical properties of materials for water cooled reactors*. Vienna: Int. Atomic Energy Agency (IAEA), 1997. 280 p.