

Исследование процессов электроэрозионной обработки

М.Ю. Сарилов

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре

Проведен анализ процессов, происходящих на катодной и анодной областях электроэрозионного процесса. Рассмотрена роль плазменного столба в процессах переноса электрической и тепловой энергии. Дано описание плазменного столба как объекта регулирования и выявлены условия, влияющие на его энергетические и геометрические параметры. Показаны причины, определяющие ведение процесса ЭЭО в определенной полярности. Электрическое воздействие на изоляционную жидкость порождает химические реакции одновременно в двух фазах: жидкости и плазме. Химические процессы в плазменной и жидкой фазах существенно отличаются друг от друга: в жидкой фазе развивается цепной радикальный процесс, а в газовой – плазмохимический, характеризующийся первоначальной фрагментацией и последующей рекомбинацией образованных фрагментов. Проведенные исследования выявили особенности электроэрозионной обработки титанового и алюминиевого сплава, заключающиеся в особом механизме пробоя на данные материалы ввиду высокой химической активности. Полученные уравнения подтверждают данное предположение и позволили выявить, что наиболее значимыми параметрами обработки, влияющими на производительность, шероховатость и износ электрода-инструмента, являются частота следования импульсов и скважность.

Ключевые слова: электроэрозия, пробой, плазменный канал, механизм теплопередачи, многофакторный эксперимент, алюминий, титан, плазма.

The Study of Electrical Discharge Machining Process

M.Yu. Sarilov

Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur

In the article the analysis of processes occurring at the cathodic and anodic areas of the EDM process is presented. The role of the plasma column in the processes of transfer of electric and thermal energy is considered. A description of the plasma column, as the object of regulation is given and the conditions influencing its energy and geometric parameters are revealed. The causes which determine the conduct of the trial, the EEE in a certain polarity are presented. Electric effect on the insulating liquid produces chemical reaction includes two phases: in the fluid and in plasma. Chemical processes in the plasma and in the liquid phases differ significantly from each other: in liquid phase a chain radical process develops, and in the gas phase – plasma process develops, which is characterized by the initial fragmentation and the subsequent recombination of formed fragments. The conducted investigation revealed specific features of electrical discharge machining of titanium and aluminum alloy, namely a particular mechanism of breakdown in these materials due to high chemical activity. The resulting equations confirm this assumption and revealed that the most important processing parameters that affect the performance, the roughness and wear of tool-electrode, are the pulse repetition frequency and duty cycle.

Key words: EDM, breakdown, plasma channel, heat transfer mechanism, multivariate experiment, alimini-um, titanium, plasma.

Введение

Интенсивное использование электроэрозионной обработки (ЭЭО) в настоящее время обусловлено очень динамичным развитием как отечественного, так и мирового машиностроения. Появляются новые виды сплавов высокой твердости, которые все чаще применяются в конструкциях и потому требуют специальных эффективных методов обработки. Вместе с тем в промышленности существует постоянная тенденция к созданию и использованию более легких деталей более сложной формы. С каждым годом конструктивные формы деталей усложняются, повышаются их точность и требования к физико-механическим свойствам поверхностного слоя. Перед машиностроением остро стоит задача интенсификации производственных процессов изготовления продукции, при этом выпускаемая продукция должна удовлетворять самым высоким требованиям качества. Высокая гибкость и технологичность методов ЭЭО позволяют успешно решить эти задачи. Накопленный опыт применения ЭЭО в машино- и приборостроении свидетельствует о ее конкурентоспособности по сравнению с механической обработкой резанием, что особенно проявляется при обработке труднообрабатываемых электропроводных материалов, изготовлении деталей сложной конфигурации, прошивке соединительных каналов в корпусных деталях и т.п.

Электроэрозионная обработка в реальных условиях представляет собой существенно нелинейный стохастический процесс, при этом является сложным физическим процессом, экспериментальное исследование которого в значительной степени затруднено вследствие сложности внедрения измерительных приборов непосредственно в зону обработки. Однако процесс ЭЭО можно представить в виде совокупности отдельных процессов, протекание которых подчиняется известным физическим законам, каждый из которых можно описать с помощью математических моделей.

Исследование пробоя в жидкой диэлектрической среде при электроэрозионной обработке. Процесс пробоя, составляя основу процесса ЭЭО, изучен крайне отрывочно, что не позволяет качественно влиять в широких пределах на процесс. Изучение процессов, происходящих при пробое жидкости, как основы всего процесса, позволит управлять обработкой значительно более точно – т.е. сделает эффективной [1].

Основные положения физики процесса электроэрозионной обработки базируются на фундаментальных исследованиях отечественных и зарубежных ученых [2,4,5]. На базе этих работ удалось создать широкий спектр технологиче-

ских процессов, оснатив их высокопроизводительным современным оборудованием. Большое внимание при этом уделено точностным характеристикам процесса обработки за счет повышения динамических характеристик оборудования, расширения диапазона технологических режимов, подбора состава и структуры электродных материалов, использования возможностей автоматизации.

Однако зачастую описание процесса разрушения электрической прочности рабочей жидкости ведется по закономерностям, заимствованным из теории вакуумного или газового разряда, которые на данный момент считаются наиболее изученными. И теория, разработанная в данных разделах физики, не может безоговорочно перенесена на пробой жидкости ввиду ярких особенностей механизма этого явления. Главное отличие жидкостного пробоя от газового – это разные значения работы выхода электронов из катода. Данное явление происходит из-за нескольких явлений: изменение работы выхода вследствие проникновения поля в металл, влияние поверхности катода и пространственных зарядов под действием сил изображения с учетом нелинейной поляризации среды.

Работы по нелинейным эффектам в жидких диэлектриках в сверхсильных электрических полях показали, что изменение показателя преломления n в этих условиях можно описывать уравнением

$$n = n_0 + kE^2, \quad (1)$$

где n_0 – показатель преломления невозмущенной жидкости, $k = V \cdot \lambda$ (V – постоянная Керра, λ – длина волны света). Это дает возможность использовать для учета влияния нелинейной поляризации среды в сильном поле электрона и его электрического изображения на эмиссию из металла в жидкость. В сильных полях второе слабое формулы близко к n_0 , что требует учета нелинейной поляризации жидкости. Известно, что работу выхода W из металла в жидкость с диэлектрической проницаемостью ε можно записать как

$$W = W_0 \cdot \varepsilon^{-1}, \quad (2)$$

где W_0 – работа выхода электронов из металла в вакуум, $\varepsilon = n^2$. Выражение для силы электрического изображения $F(x)$ запишем в виде

$$F = -\frac{e^2}{4x^2(n_0 + kE^2)^2}. \quad (3)$$

Приведем это уравнение к виду, удобному для дальнейших расчетов:

$$Z(1 + Z^2)^2 = -\frac{b}{x^2}, \quad (4)$$

$$Z = \frac{F}{e} \cdot \sqrt{\frac{k}{n_0}}, \quad b = \frac{e}{4n_0^2} \cdot \sqrt{\frac{k}{n_0}}. \quad (5)$$

Анализ правой части (4) при реальных значениях k, n, W_0 показывает, что $z < 1$. При этом (4) можно приближенно записать в виде

$$Z \cong \sqrt{\frac{2}{3}} sh \frac{1}{3} \left(arsh 3 \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{b}{2x^2} \right). \quad (6)$$

Работа выхода из металла в жидкость с учетом нелинейной поляризации среды запишем как

$$W_1 = \int_{x_0}^{\infty} F \cdot dx = F \cdot x \Big|_{x_0}^{\infty} - \int_{x_0}^{\infty} x \cdot dF, \quad (7)$$

$$x_0 = \frac{300 \cdot e^2}{4W_0}. \quad (8)$$

Из формулы (4) выражение для x подставим в (7) и получим

$$W_1 = -F_0 x_0 + \sqrt{\frac{n_0}{k}} e^2 b \cdot \int_{z_0}^{\infty} \frac{d|z|}{\sqrt{|z|(1+|z|^2)}}. \quad (9)$$

После интегрирования (9) и с учетом (6) и (8) выразим z_0 в виде

$$z_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} sh \frac{1}{3} \left[arsh \cdot 3,4 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{k}{n_0}} \left(\frac{W_0}{n_0} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет рассчитать работу выхода для конкретных систем металл – жидкий диэлектрик. По результатам расчета видно, что уменьшение работы выхода электронов из металла в жидкость вследствие нелинейного изменения ϵ жидкости в поле электрона и его изображения тем больше, чем больше работы выхода из металла в вакуум и постоянная Керра.

Большим количеством экспериментальных данных установлено [3,4,7], что при наложении на межэлектродный промежуток (МЭП), заполненный диэлектрической жидкостью, определенного напряжения U_{np} происходит электрический пробой промежутка, т.е. образование в диэлектрике электропроводной области в результате ударной лавинообразной ионизации атомов среды за время порядка 10^{-7} с. Напряжение пробоя связано с напряженностью электрического поля и величиной МЭП соотношением:

$$U_{np} = aE_{np}, \quad (11)$$

где a – расстояние между электродами. При прочих равных условиях величина U_{np} зависит от свойств жидкого диэлектрика.

В результате образования на катоде электронной лавины – стримера, последний, перемещаясь к аноду, испаряет и ионизирует на своем пути жидкость. К моменту достижения анода

стример оказывается отделенным от окружающей среды парогазоплазменной оболочкой. Далее подача электрической энергии в зону разряда происходит по плазменному каналу, состоящему в основном из водородной плазмы, которая и является рабочим органом в процессе обработки.

Исследование плазменного канала и механизма теплопередачи в процессе электроэрозионной обработки. При высокой степени ионизации газ приобретает особые электрофизические и физико-химические свойства, что дает основание рассматривать ионизированный газ как четвертое агрегатное состояние – плазму. Газоразрядную плазму успешно применяют как активный технологический фактор, например, в процессе электроимпульсной размерной обработки. В общем случае можно считать, что плазма представляет собой смесь трех компонент: свободные электроны, положительные ионы и нейтральные атомы.

Рассмотрим поведение плазмы в электрическом поле. Под действием электрического поля в плазме возникают направленные потоки частиц: через плазму течет электрический ток. При прохождении тока ионы можно считать неподвижными, ток создается потоком электронов. В случае, когда ток постоянен, устанавливается равновесие между силой, с которой действует на электроны электрическое поле, и силой торможения, обусловленной столкновениями между электронами и ионами. Электрон испытывает за 1 секунду γ_{ei} столкновений, при каждом из которых он теряет импульс $m_e u$, где u – направленная скорость электрона. Следовательно, сила торможения равна $m_e u \gamma_{ei}$ и условие торможения имеет вид: $eE = m_e \gamma_{ei}$. Плотность тока в плазме $j = neu$. Следовательно,

$$j = \frac{ne^2 E}{m_e \gamma_{ei}} = \frac{ne^2 \tau_{ei} E}{m_e}. \quad (12)$$

Выражение (3) является законом Ома для плазмы. Тогда электропроводность плазмы будет

$$\sigma_E = \frac{ne^2 \tau_{ei}}{m_e}. \quad (13)$$

Рассмотрим поведение плазмы в магнитном поле. Как известно, в однородном магнитном поле заряженная частица движется в общем случае по винтовой линии. Проекция траектории на плоскость, перпендикулярную вектору магнитной индукции B , представляет собой окружность с радиусом $\rho = mv_{\perp} c / qB$, где v_{\perp} – поперечная составляющая скорости частицы. Это так называемая ларморовская окружность. Вращение по этой окружности происходит с

ларморовской частотой $\omega_B = qB / mc$. Вдоль силовых линий частица движется с постоянной скоростью v_{\perp} .

В общем случае движение заряженной частицы в неоднородном магнитном поле можно представить как суперпозицию следующих трех движений: вращение по ларморовской окружности со скоростью v_{\perp} ; движение центра ларморовской окружности вдоль силовой линии со скоростью v_{\parallel} ; дрейфовое движение центра ларморовской окружности, перпендикулярное B и $\text{grad } |B|$.

Область распространения плазменного столба в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, ограничена плоскостью, по которой уравниваются электродинамическими силами, которые возникают вследствие того, что плазма в магнитном поле ведет себя как диамагнетик. Диамагнетизм плазмы обусловлен тем, что ларморовские токи вращающихся заряженных частиц создают в каждой единице объема магнитный момент, направленный против действующего внешнего поля. По этой причине напряженность магнитного поля внутри плазмы уменьшается и создается пондеромоторная сила, уравнивающая перепад давлений внутри и на границе плазменного образования [6].

Отрыв электрона от атома (ионизация атома) требует определенной энергии ионизации W_u , которая равна энергии связи в атоме. Для того, чтобы при соударении нейтральных частиц массой M имела место ионизация, необходимо наличие у ударяющей частицы кинетической энергии теплового движения со скоростью v_n при нагреве газа до температуры T :

$$W = 1,5kT = \Delta K = 0,5Mv_n^2, \quad (14)$$

равной или большей энергии ионизации ударяемой частицы W_u . Условие $W \geq W_u$ выражает энергетику процесса ионизации как эндотермического процесса. Процессу ионизации предшествует также эндотермический процесс диссоциации многоатомных молекул газа, протекающий с поглощением энергии диссоциации W_d . Практически эти процессы начинают происходить при $O > 2000 - 3000$ К. Электропроводность газа можно увеличить за счет одного из пяти возможных видов эмиссии электронов: термоэлектронная из горячего катода; автоэлектронная или электростатическая из холодного катода; фотоэлектронная; вторичная, вызванная положительными ионами; вторичная, вызванная метастабильными атомами.

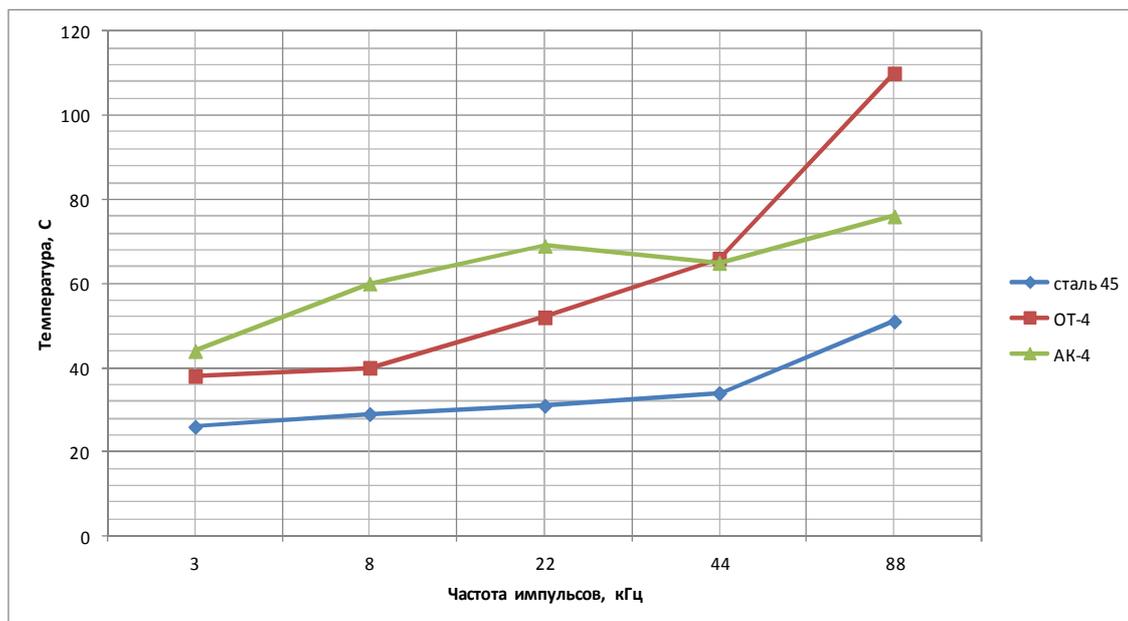
Приложенное электромагнитное поле повышает энергию ионизированного газа, ускоряя заряженные частицы, особенно электроны вви-

ду их высокой подвижности. Возрастающая кинетическая энергия электронов ΔK_e частично превращается в тепловую энергию, повышая энтальпию газа W_{Σ} при нагреве до $10^3 - 10^4$ К и вызывая диссоциацию многоатомных молекул газа с затратой энергии W_d . Другая часть энергии электромагнитного поля аккумулируется в ионизированном газе в виде $W_{и}$. Поэтому суммарные энергозатраты W_{Σ} со стороны электромагнитного поля на создание электрического разряда в газах равны

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma} + W_d + W_{и}. \quad (15)$$

В ионизированном газе наряду с процессами ионизации происходит нейтрализация заряженных частиц вследствие процесса рекомбинации. При рекомбинации выделяется энергия, эквивалентная $W_{и}$, причем механизм рекомбинации связан с превращением кванта энергии в фотон. Излучение, порождаемое рекомбинацией, является одной из причин свечения многих форм электрического разряда. Нагрев катода для термоэлектронной эмиссии происходит в результате рекомбинации бомбардирующих его положительных ионов, а также теплопроводности от ближайших слоев газоразрядной плазмы в столбе дуги. Катодная область по протяженности приблизительно равна длине свободного пробега электрона и составляет около 10^{-5} см. В этой области электроны эмиссии ускоряются электрическим полем, увеличивая свою кинетическую энергию на величину $\Delta K_e = eU_K$, где U_K – падение напряжения в катодной области дугового разряда. Величина ΔK_e должна быть достаточной для ионизации нейтральных частиц межэлектродного промежутка, т. е. $\Delta K_e \geq W_u$. Падение напряжения U_K также ускоряет положительные ионы, летящие в сторону катода, способствуя теплогенерации на катоде и в столбе дуги. Вблизи анода электроны получают дополнительную кинетическую энергию за счет энергии электрического поля, характеризуемого падением напряжения в анодной области разряда U_a .

На аноде ускоренные электроны внедряются в кристаллическую решетку материала, в результате чего их кинетическая энергия рассеивается в виде тепла в анодном пятне, что вызывает локальное повышение температуры анода. Тепло, генерируемое на аноде, расходуется на нагрев, плавление и необходимый перегрев жидкого металла, на излучение в окружающую среду и на потери теплопроводностью через тело анода и в окружающую среду. Достигая поверхности нагреваемого металла, электроны электронного луча, называемые первичными, внедряются в кристаллическую решетку, испытывают торможение на своем пути в результате



Зависимость температуры от изменения частоты импульсов

взаимодействия с ионами, свободными и связанными электронами, в результате чего и происходит разогрев поверхности электродов, а значит и сам процесс обработки [7,8].

Особенности электроэрозионной обработки титановых и алюминиевых сплавов

Обработка алюминиевых и титановых сплавов имеет свои яркие особенности. Ранее были проведены исследования тепловых явлений при обработке трех видов материалов: сталь 45, титановый сплав OT-4, алюминиевый сплав АК-4. Результатами исследований стали выводы о факторах, влияющих на изменение температуры в процессе электроэрозионной обработки [9]. Так же в качестве результатов были приведены экспериментальные закономерности, полученные в результате обработки вышеназванных материалов (рисунок).

Как видно из рисунка, ситуация с концентрацией тепловой энергии в алюминиевом сплаве схожа с таковой в титановом сплаве, а иногда даже несколько больше. Это весьма парадок-

сальное явление ввиду того, что коэффициент удельной теплопроводности у алюминия на порядок больше, чем у титана, и почти в 3 раза больше, чем у стали.

Также у алюминиевого сплава очень высокий коэффициент удельной теплоемкости, который свидетельствует о том количестве тепловой энергии, которое нужно сообщить одному грамму (килограмму) для того, чтобы он изменил свою температуру на один градус Цельсия (Кельвина). Все это свидетельствует о том, что процесс пробоя на алюминий и его сплавы имеет свои характерные особенности, вызывающие концентрацию тепловой энергии в зоне обработки. Логично предположить, что данный факт вызван влиянием материала электрода на процесс пробоя.

Наиболее вероятной причиной этой аномалии является искажение поля в промежутке «усами», образующимися из окисной пленки при разрушении ее во время разряда. Появление этих окисных усов обосновывается высокой химической активностью самого материала, а с

Коэффициенты

	C0	X1	X2	X3	X4	X1X2	X1X3	X1X4
при обработке титанового								
Y1	101,75	11,125	44,5	-39,25	74,5	22,625	-7,375	8,875
Y2	8,25	-1,125	0,25	1,25	0,375	0,375	0,375	0,5
Y3	2,325	0,0125	0,025	0,5	0,6125	-0,0125	0,1125	-0,075
при обработке алюминиевого								
Y1	404,188	24,1875	21,6875	13,1875	140,938	18,9375	8,6875	-14,3125
Y2	5,125	-0,5	0,125	0,25	1,75	0,0	0,125	-0,625
Y3	4,45625	0,01875	0,23125	0,24375	0,85625	0,06875	0,15625	-0,15625

учетом высокой температуры расплавленного металла в зоне лунки образование уса из оксида алюминия занимает крайне малое время. Сходной окислительной способностью обладает и титан, однако, из-за большого значения коэффициента удельной теплоемкости и низкого коэффициента теплопередачи количество разогретого, химически активного титана меньше и размеры оксидного уса меньше. Соответственно и влияние данного уса на процесс пробоя меньше.

Анализ состояния электродов в процессе измерений показывает, что на алюминиевых и титановых электродах последующие разряды осуществляются, как правило, с кромок кратера, образующегося от первого пробоя. Образование кратеров на электродах из других материалов не вызывает образования «усов» и практически каждый последующий пробой происходит с нового участка поверхности электродов. Это явление наблюдалось во всех экспериментах в условиях однородного или слабо неоднородного поля.

Для подтверждения данного предположения были проведены экспериментальные исследования на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ 40–440М. В качестве материала электрода были использован электрод из меди М1, а в качестве обрабатываемых материалов – все те же титановый сплав ОТ–4 и алюминиевый сплав АК–4. Для получения максимальной информативности при минимальном объеме экспериментальных работ был использован метод математического планирования эксперимента, в частности по методике полного факторного эксперимента. Из всего многообразия факторов, влияющих на технологические показатели обработки, можно выбрать следующие: X1 – количество гребней в импульсе, X2 – количество силовых транзисторов в схеме, X3 – скважность, X4 – частота следования импульса. Названная совокупность факторов удовлетворяет требованиям совместимости и отсутствия линейной корреляции. В качестве результирующих функций были

приняты: Y1 – производительность обработки, Y2 – массовый износ электрода-инструмента, Y3 – шероховатость обработанной поверхности.

Данные были обработаны по методике многофакторного эксперимента, коэффициенты регрессии уравнений представлены в таблице.

Анализ разработанной линейной модели показал, что гипотеза адекватности может быть принята с 95% уровнем достоверности, так как критерий Фишера не превышает табличное значение.

Заключение

Проведенный анализ процессов, происходящих на катодной и анодной областях во время размерной электроэрозионной обработки, показал важную роль плазменного разрядного столба. Представленный плазменный столб описывается как объект регулирования и показываются энергетические и геометрические параметры, позволяющие влиять на него. Также выявлены причины, определяющие ту или иную поляризованность электроэрозионной обработки. Химические реакции, возникающие под электрическим воздействием, протекают одновременно в жидкой и плазменной фазах. Химические процессы в плазменной и жидкой фазах существенно отличаются друг от друга: в жидкой фазе развивается цепной радикальный процесс, а в газовой – плазмохимический, характеризующийся первоначальной фрагментацией и последующей рекомбинацией образованных фрагментов.

Кроме того, представленные исследования выявили особенности при электроэрозионной обработке титановых и алюминиевых сплавов, заключающиеся в особом механизме пробоя на данные материалы ввиду высокой химической активности. Были получены уравнения, которые подтверждают высказанное предположение и позволили выявить, что наиболее значимыми параметрами обработки, влияющие на производительность, шероховатость и износ электрода-инструмента при электроэрозионной обработке, являются частота следования импульсов и скважность.

регрессии

X2X3	X2X4	X3X4	X1X2X3	X1X2X4	X1X3X4	X2X3X4	X1X2X3X4
сплава ОТ–4:							
–14,5	34,25	–37,0	–21,375	19,875	–7,625	–16,75	–23,625
–1,25	0,875	0,125	0,375	–1,0	0,25	0,625	–0,25
0,15	0,1125	0,1125	–0,0125	0,0	0,05	0,1125	0,075
сплава АК–4:							
11,4375	–7,5625	–69,0625	–11,3125	–1,5625	–18,3125	–8,3125	–9,8125
0,25	0,25	–0,125	0,125	–0,125	0,0001	–0,125	0,5
0,31875	0,00625	–0,13125	–0,04375	–0,03125	0,10625	0,21875	0,08125

Литература

1. *Бурдасов Е.Н., Сарилов М.Ю.* Исследование устойчивости процесса электроэрозионной обработки с использованием критериев нелинейной динамики // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, №1. – С. 344–348.
2. *Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р.* Физические основы электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1977. – 43 с.
3. *Кабалдин Ю.Г., Сарилов М.Ю., Биленко С.В.* Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанных поверхностей на основе подходов искусственного интеллекта. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2007. – 191 с.
4. *Красюк В.А.* О физических процессах, лежащих в основе электрических методов обработки // Электрические методы обработки. – М., 1951. – 155 с.
5. *Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И.* Электроискровая обработка токопроводящих материалов. – М.: АН СССР, 1958. – 300 с.
6. *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: Физматгиз, 1958. – 907 с.
7. *Сарилов М.Ю., Злыгостев А.М.* Исследование плазменного канала и механизма теплопередачи в процессе электроэрозионной обработки // Вестник ТОГУ. – Хабаровск: Изд-во ФГБОУ ВПО ТОГУ, 2011. – №2. – С. 43 – 50.
8. *Сарилов М.Ю., Линева А.С.* Исследования пробоя диэлектрической жидкости как источника совершенствования электроэрозионной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2011. – №1. – С. 570 – 574.
9. *Сарилов М.Ю., Загалева М.Р., Александров А.В.* Применение синергетического подхода к исследованию электроэрозионного процесса // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2011. – №1. – С. 627 – 631.

Поступила в редакцию 26.04.2016