

Исследование процессов электроэрозионной обработки

© М.Ю. Сариллов,¹ В.В. Мыльников²

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,
681013 Комсомольск-на-Амуре, Россия

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: sarilov@knastu.ru; mrmynikov@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2018 г.

В окончательной редакции 14 ноября 2018 г.

Принято к публикации 21 декабря 2018 г.

Аналитически исследованы пробой в жидкой диэлектрической среде, плазменный канал и механизм теплопередачи в процессе электроэрозионной обработки. Выявлены особенности и наиболее значимые параметры электроэрозионной обработки титановых и алюминиевых сплавов. Теория, эксперимент и математическое моделирование показали, что гипотеза адекватности может быть принята с 95% уровнем достоверности, так как критерий Фишера не превышает табличное значение.

DOI: 10.21883/JTF.2019.06.47636.66-18

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 усложненной формы. С каждым годом совершенствуются конструктивные формы деталей, повышается 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 позволяет успешно решить эти задачи [1]. Накопленный опыт применения ЭЭО в машино- и приборостроении свидетельствуют о ее конкурентоспособности в сравнении с механической обработкой резанием, что особенно проявляется при обработке труднообрабатываемых электропроводных материалов, изготовлении деталей сложной конфигурации, прошивки 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 на этот процесс в широких пределах. Изучение процессов, происходящих при пробое жидкости, как основы всего процесса, позволит управлять обработкой значительно более точно, что сделает ее существенно эффективней [2].

Основные положения физики процесса электроэрозионной обработки базируются на фундаментальных исследованиях отечественных и зарубежных ученых [3–6]. На базе этих работ удалось создать широкий спектр технологических процессов, оснастив 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 процесса обработки.

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 быть безоговорочно перенесена на пробой жидкости ввиду ярких особенностей механизма этого явления. Жидкостный пробой характеризуется кардинально другими, по отношению к газовому, значениями работы выхода электронов из

катода. Эмиссия электронов с катода — это стартовый этап пробоя жидкости, от которого во многом зависит дальнейшее протекание разряда через межэлектродный промежуток. Это происходит из-за нескольких явлений, в том числе проникновения поля в металл, влияния поверхности катода и пространственных зарядов, возникающих под действием сил с учетом нелинейной поляризации среды. Кроме того, важной особенностью импульсного пробоя в жидкости является влияние материала электродов на электрическую прочность 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, $k = b \cdot \lambda$ (b — постоянная Керра, λ — длина волны света).

Это равенство дает возможность учета влияния нелинейной поляризации среды в сильном поле электрона и его электрического изображения на эмиссию из металла в жидкость. В сильных полях второе слагаемое 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$z_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{sh} \frac{1}{3} \left[\operatorname{arsh} \left(3.4 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{k}{n_0}} \left(\frac{W_0}{n_0} \right)^2 \right) \right]. \quad (10)$$

Полученная формула (10) позволяет рассчитать работу выхода электронов для конкретных условий металл–жидкий диэлектрик (металл катода–диэлектрическая жидкость) в процессе электроэрозионной обработки. Результаты расчета показали, что уменьшение работы выхода электронов из металла в жидкость, вследствие нелинейного изменения ε жидкости в поле электрона и его изображения тем больше, чем больше работа выхода из металла в вакуум и постоянная Керра.

Большим количеством экспериментальных данных установлено [4,5,7], что при приложении к межэлектродному промежутку (МЭП), заполненному диэлектрической жидкостью, определенного напряжения U_{brkdw} , 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

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

где a — расстояние между электродами.

При прочих равных условиях величина U_{brkdw} 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 паро-газо-плазменной 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. Газо-разрядную 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 с 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 $eU = m_e \gamma_{ei}$. Плотность тока в плазме $j = neu$. Следовательно:

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

Данное выражение можем принять как интерпретацию закона 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 \mathbf{B} , представляет собой окружность с радиусом $\rho = \frac{mv_{\perp} c}{qB}$, где v_{\perp} поперечная составляющая скорости частицы. Это — так называемая ларморовская окружность. Вращение по этой окружности происходит с ларморовской частотой $\omega_B = \frac{qB}{mc}$. При этом вдоль силовых линий частица движется с постоянной скоростью v_{\parallel} .

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 вектору магнитной индукции \mathbf{B} .

Область распространения плазменного столба в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, ограничена плоскостью, по которой равновесие осуществляется электродинамическими силами, возникающими 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 [8].

Отрыв электрона от атома (ионизация атома) требует определенной энергии ионизации W_e , 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_e . Условие $W \geq W_e$ выражает энергетику процесса ионизации как эндотермического процесса. Процессы ионизации предшествует также эндотермический процесс диссоциации многоатомных молекул газа, протекающий с поглощением энергии диссоциации W_A . Практически эти процессы начинают происходить при температурах газовой атмосферы $\dot{O} > 2000 - 3000$ 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, ввиду их высокой подвижности. Возрастающая кинетическая энергия электронов $\Delta \bar{E}_a$ частично превращается в тепловую энергию, повышая энтальпию газа $W_{\dot{\gamma}}$ при нагреве до $10^3 - 10^4$ К и вызывая диссоциацию многоатомных молекул газа с затратой энергии W_A . Другая часть энергии электромагнитного поля аккумулируется в ионизированном газе в виде $W_{\dot{E}}$. Поэтому суммарные энергозатраты W_{Σ} со стороны электромагнитного поля на создание электрического разряда в газах равны

$$W_{\Sigma} = W_{\dot{\gamma}} + W_A + w_{\dot{E}}. \quad (15)$$

В ионизированном газе, наряду с процессами ионизации, происходит нейтрализация заряженных частиц вследствие процесса рекомбинации. При рекомбинации выделяется энергия, эквивалентная $W_{\dot{E}}$, 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 передачей тепловой энергии 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 $\Delta\tilde{E}_a = aU_{\tilde{E}}$, где $U_{\tilde{E}}$ — падение напряжения в катодной области дугового разряда. Величина $\Delta\tilde{E}_a$ должна быть достаточной для ионизации нейтральных частиц межэлектродного промежутка, т.е. $\Delta\tilde{E}_a \geq W_{\tilde{e}}$. Падение напряжения $U_{\tilde{E}}$ 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, при этом они испытывают торможение на своем пути в результате взаимодействия с ионами, свободными и связанными электронами, вследствие чего и происходит разогрев поверхности электродов. Аналогичный процесс происходит и при электроэрозионной размерной обработке в межэлектродном промежутке [7,9].

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 ОТ-4, алюминиевый сплав АК-4. Результатами исследований стали выводы о факторах, влияющих на изменение температуры в процессе электроэрозионной обработки [10]. Кроме этого, в качестве результатов были приведены экспериментальные закономерности, полученные в результате обработки вышеназванных материалов.

Как видно из приведенных рис. 1, 2, ситуация с концентрацией тепловой энергии в алюминиевом сплаве схожа с титановым сплавом, а подчас даже несколько больше. Это весьма парадоксальное явление ввиду того, что коэффициент удельной теплопроводности у алюминия на порядок больше, чем у титана, и почти в 3 раза больше, чем у стали, к тому же у алюминиевого сплава очень высокая удельная теплоемкость. Все это свидетельствует о том, что процесс пробоя у алюминия и его сплавов имеет свои характерные особенности, вызывающие концентрацию тепловой энергии в зоне

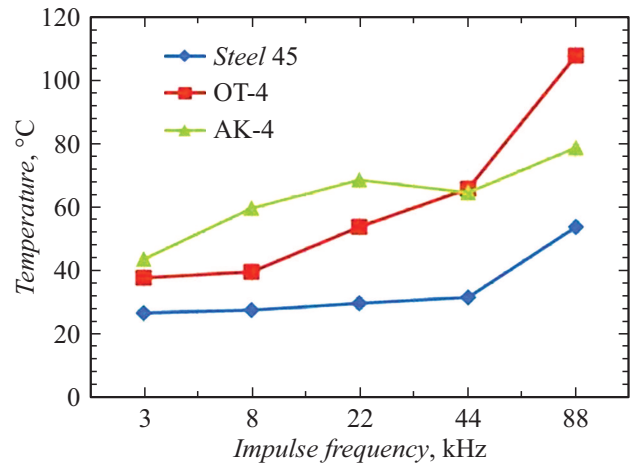


Рис. 1. Зависимость температуры от частоты импульсов.

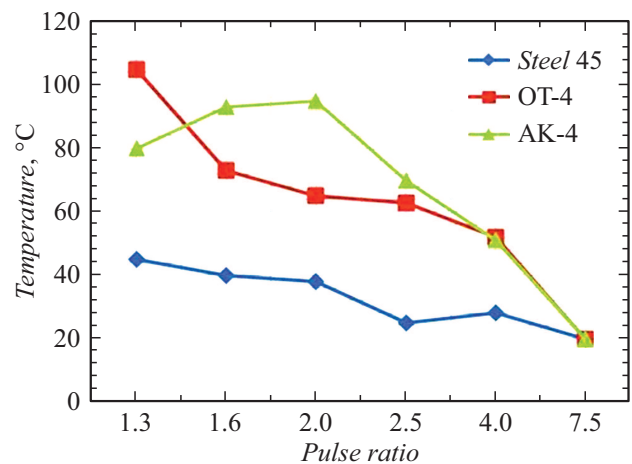


Рис. 2. Зависимость температуры от скважности.

обработки. Логично предположить, что данный факт вызван влиянием материала электрода на процесс пробоя.

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

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 материа-

Коэффициенты регрессии, входящие в уравнение (16)

Коэффициент	Титановый сплав ОТ-4			Алюминиевый сплав АК-4		
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_1	Y_2	Y_3
C_0	101.75	8.25	2.325	404.188	5.125	4.45625
C_1	11.125	-1.125	0.0125	24.1875	-0.5	0.01875
C_2	44.5	0.25	0.025	21.6875	0.125	0.23125
C_3	-39.25	1.25	0.5	13.1875	0.25	0.24375
C_4	74.5	0.375	0.6125	140.938	1.75	0.85625
C_{12}	22.625	0.375	-0.0125	18.9375	0.0	0.06875
C_{13}	-7.375	0.375	0.1125	8.6875	0.125	0.15625
C_{14}	8.875	0.5	-0.075	-14.3125	-0.625	-0.15625
C_{23}	-14.5	-1.25	0.15	11.4375	0.25	0.31875
C_{24}	34.25	0.875	0.1125	-7.5625	0.25	0.00625
C_{34}	-37.0	0.125	0.1125	-69.0625	-0.125	-0.13125
C_{123}	-21.375	0.375	-0.0125	-11.3125	0.125	-0.04375
C_{124}	19.875	-1.0	0.0	-1.5625	-0.125	-0.03125
C_{134}	-7.625	0.25	0.05	-18.3125	0.0001	0.10625
C_{234}	-16.75	0.625	0.1125	-8.3125	-0.125	0.21875
C_{1234}	-23.625	-0.25	0.075	-9.8125	0.5	0.08125

лов 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 был 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, нами были выбраны, исходя из условия совместимости и отсутствия линейной корреляции, следующие факторы: X_1 — количество гребней в импульсе, X_2 — количество силовых транзисторов в схеме, X_3 — скважность, X_4 — частота следования импульсов. Выделенная для исследования совокупность факторов полностью удовлетворяет требованиям совместимости и отсутствия линейной корреляции. Необходимо отметить, что изменяя количество силовых транзисторов в схеме генератора и количество гребней в импульсе, мы изменяем подводимую в межэлектродный промежуток мощность. Следовательно, скважность и частота следования импульсов — основные параметры электроэрозионной размерной обработки.

В качестве результирующих функций были приняты: Y_1 — производительность обработки, Y_2 — массовый

износ электрода-инструмента, Y_3 — шероховатость обработанной поверхности.

Функции Y_1 , Y_2 и Y_3 были представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 Y_{1,2,3} = & C_0 + C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2 + C_3 \cdot X_3 + C_4 \cdot X_4 \\
 & + C_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + C_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + C_{14} \cdot X_1 \cdot X_4 \\
 & + C_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + C_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 + C_{34} \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 & + C_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + C_{124} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 \\
 & + C_{134} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 & + C_{234} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + C_{1234} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Значения входящих в (16) коэффициентов регрессии C_1 – C_{1234} , полученные при обработке ОТ-4 и АК-4, представлены в таблице.

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

Заключение

Проведенный анализ процессов, проходящих 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. Выявлены причины, определяющие ту или иную поляризованность электроэрозионной обработки.

Химические реакции, возникающие под электрическим воздействием, протекают одновременно в жидкостной и плазменной фазах. Химические процессы в плазменной и в жидкой фазах существенно отличаются друг от друга: в жидкой фазе развивается цепной радикальный процесс, а в газовой фазе — плазмохимический, характеризующийся первоначальной фрагментацией и последующей рекомбинацией образованных фрагментов.

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

Список литературы

- [1] *Ojha K., Garg R.K., Singh K.K.* // J. Minerals & Materials Characterization & Engineer. 2010. Vol. 9. N 8. P. 709–739.
- [2] *Бурдасов Е.Н., Сарилов М.Ю.* // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 344–348.
- [3] *Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р.* Физические основы электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1977. 43 с.
- [4] *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.
- [5] *Красюк В.А.* О физических процессах, лежащих в основе электрических методов обработки. Электрические методы обработки. М.: Маш. Из. 1951. 155 с.
- [6] *Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И.* Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: АН СССР, 1958. 300 с.
- [7] *Сарилов М.Ю., Злыгостев А.М.* // Вестник ТОГУ. 2011. № 2. С. 43–50.
- [8] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Физматгиз, 1958. 907 с.
- [9] *Сарилов М.Ю., Линева А.С.* // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. № 1. С. 570–574.
- [10] *Сарилов М.Ю., Загалеев М.Р., Александров А.В.* // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. № 1. С. 627–631.