Учёные записки
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета
№ II-1 (22)
2015

Линёв А. С., Сарилов М. Ю.
A. S. Linyov, M. Yu. Sarilov

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

THE IMPACT OF ELECTROSPARKING ON THE EFFECTIVENESS OF ED MACHINING OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS

Линёв Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: uranus_123@mail.ru
Mr. Alexander S. Linyov - PhD student, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia Komsomolsk-on-Amur). E-mail: uranus_123@mail.ru

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru
Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru

Аннотация. Представлена общая картина пробоя и его влияние на процесс электроэрозионной обработки. Сделан акцент на явления, возникающие при обработке алюминиевых и титановых сплавов.

Summary. The paper offers an overall picture of the effect of breakdown and its impact upon the process of EDM machining. The emphasis is laid on the phenomena that occur in the processing of aluminum and titanium alloys.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, искровой пробой, температура плавления, теплопередача, единичная лунка, электрод-заготовка, алюминиевые и титановые сплавы.

Key words: spark machining, spark breakdown, melting point, heat transfer, individual pit, electrode blank, aluminum and titanium alloys.

УДК 621.9.048

Введение

Электроэрозионная обработка в современных единичном, мелко- и среднесерийном производствах всё чаще и чаще получает приоритет в использовании, нежели другие способы обработки. Тому есть несколько причин. Во-первых, имеется тенденция на увеличение конструктивной и, соответственно, геометрической сложности деталей машин и аппаратов. Это вызвано совершенствованием и оптимизацией конструкций деталей, а также необходимой экономией дорогостоящего материала заготовки. Во-вторых, неизбежное повышение эксплуатационных характеристик, предъявляемых к ответственным деталям, ведет к практике применения в конструкциях материалов с высокими значениями твёрдости, химической инертности к действию окружающей среды, прочности по различным видам нагружения и т. п. Как раз применение материалов с высокой и сверхвысокой твёрдостью не позволяет обрабатывать такие материалы резанием, а рекомендуется применять электроэрозионную обработку (ЭЭО). В-третьих, с момента открытия ЭЭО в 1943 году супругами Лазаренко по

настоящее время процесс электроискрового пробоя (ЭИП) постоянно изучался и совершенствовался сам процесс ЭЭО. Современная теория и практика ЭЭО имеет в своем арсенале большое количество технологических основ и рекомендаций, что позволяет стабильно получать прогнозируемо отличные результаты по качеству получаемой поверхности и производительности при соблюдении высочайших требований точности изготовления деталей. В некоторых случаях возможно достигнуть безызносной обработки (износ электрода-инструмента ≈ 0 %).

Практическая значимость исследования заключается в приведенных рекомендациях по обработке наиболее распространенных в авиакосмической и судостроительной отраслях промышленности типов конструкционных материалов: алюминиевых и титановых сплавов. [3].

Научная новизна заключается в описанном теоретически и подтвержденном экспериментально явлении появления так называемых «усов», которые влияют на результативность пробоя, тепловые явления на электродах и производительность процесса в целом.

Непосредственно на формирование поверхности электрода-заготовки влияет распределение энергии импульса. Самым подробным образом это было рассмотрено в [1]. Так, выделяющаяся энергия при импульсе может быть найдена по формуле

$$W_{\text{и}} = e\int_0^{t_{\text{и}}} i(t)dt,$$

где e – напряжение на промежутке (≈ 20 В); $i(t)$ – ток через промежуток; $t_{\text{и}}$ – длительность импульса.

В свою очередь, распределение энергии по электродам может быть найдено из выражения

$$W_{\text{э}} = W_{\text{и}} - W_{\text{с}} = \int_0^{t_{\text{и}}} u(t)i(t)dt - \int_0^{t_{\text{и}}} u_{\text{с}}(t)i(t)dt,$$

где $W_{\text{э}} = W_{\text{а}} + W_{\text{к}}$ – энергия, выделяющаяся на аноде и катоде; $u(t)$ – напряжение в процессе пробоя; $u_{\text{с}}(t)$ – напряжение в канале разряда.

Передача энергии разряда электродам обусловливается движением частиц и молекул, которое можно разделить на два вида: движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля и тепловое движение. Эти два вида движения обеспечивают передачу энергии на электроды в виде:

1) электронной (ионной) компоненты (бомбардировка заряженными частицами). Для анода обозначается $W_{\text{а}}^{\text{е}}$, для катода W_k^i;

2) газокинетической компоненты (термическая бомбардировка частицами, составляющими канал разряда), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{т}}$ – для анода, $W_{\text{к}}^{\text{т}}$ – для катода;

3) факельной компоненты (торможение факелов паров, проступающих на анод и катод с противоположного электрода), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{ф}}$ и $W_{\text{к}}^{\text{ф}}$;

4) лучистой компоненты (тепловое излучение), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{и}}$ и $W_{\text{к}}^{\text{и}}$;

5) объемной компоненты (действие объемного источника тепла), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{об}}$ и $W_{\text{к}}^{\text{об}}$.

Общая энергия, поступающая на анод и катод, в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$W_{\text{а}} = W_{\text{а}}^{\text{е}} + W_{\text{а}}^{\text{т}} + W_{\text{а}}^{\text{ф}} + W_{\text{а}}^{\text{и}} + W_{\text{а}}^{\text{об}},$$
$$W_{\text{к}} = W_k^i + W_{\text{к}}^{\text{т}} + W_{\text{к}}^{\text{ф}} + W_{\text{к}}^{\text{и}} + W_{\text{к}}^{\text{об}}.$$

Для непосредственного расчета энергии, поступившей на электроды, необходимо более подробно рассмотреть каждую из описанных выше компонент.

Электронная компонента. Ток в прианодной области обеспечивается исключительно электронами. Поэтому расчёт $W_{\text{а}}^{\text{е}}$ производят по суммарному действию всех электронов,

пришедших на анод за время $t_и$, т. е. необходимо найти произведение пришедшего на анод электричества и падения напряжения на этом участке:

$$W_a^e = (u_a + \varphi)\int_0^{t_и} i(t)dt,$$

где u_a – величина падения потенциала в прианодной области; φ – работа выхода электрона, В.

И тут было некоторое отступление от классической теории пробоя. Работа выхода – это некоторое количество энергии, необходимое для извлечения электрона из металла [2]. Она зависит от состояния поверхности, её чистоты, шероховатости и др. Энергию связи электрона в металле $e\varphi$ можно трактовать как работу $\frac{e^2}{4a}$ против притягивающей силы изображения $\frac{e^2}{4r^2}$, которую нужно затратить при удалении электрона с расстояния a порядка межатомного расстояния на бесконечность. Так как имеется внешнее вытягивающее поле E, то на электрон действует суммарная сила:

$$F = \frac{e^2}{4r^2} - eE.$$

Начиная с расстояния $r_k = \left(\frac{e}{4E}\right)^{1/2}$, где $F = 0$, и дальше, внешнее вытягивающее воздействие превышает силу притяжения к поверхности [6]. Значит, чтобы выбраться из тела, электрону нужно преодолеть лишь расстояние r_k и энергию притяжения:

$$\int_a^{r_k} F\,dr = \int_a^{r_k}\left(\frac{e^2}{4r^2} - eE\right)dr = \frac{e^2}{4a} - e^{3/2}E^{1/2}.$$

Работа выхода уменьшается по сравнению со случаем отсутствия поля на величину

$$e\Delta\varphi = e^{3/2}E^{1/2}.$$

Это явление называют эффектом Шоттки.

Ионная компонента. Ток на катоде имеет как электронный, так и ионный характер. Поэтому энергию, поступающую на катод, можно записать так:

$$W_k^i = a_к u_к \int_0^{t_и} i_i(t)dt + u_i \int_0^{t_и} i_i(t)dt + \varphi \int_0^{t_и} i_e(t)dt, \quad (1)$$

где $a_к$ – коэффициент аккомодации иона; $u_к$ – падение потенциала в прикатодной области; i_i – ионный ток на катоде; u_i – потенциал ионизации иона (усредненное значение); i_e – электродный ток на катоде.

Первое слагаемое в выражении (1) – кинетическая энергия, полученная от торможения ионов на катоде, второе – энергия их нейтрализации, третий – потери энергии при испарении «электронов »

Газокинетическая компонента. Плотность кинетической энергии частиц находится из выражения

$$\omega_т = \frac{1}{2}\xi nkT_г - \frac{1}{2}\xi nkT_0 = \frac{1}{2}\xi(p(t) - p_0),$$

где $\omega_т$ – удельная энергия теплового движения; ξ – число ступеней свободы; n – число частиц в единице объема; k = 1,38·10^{-23} Дж/К – газокинетическая константа Больцмана, $T_г$ – температура газа; T_0 – начальная температура; p – давление газа при температуре $T_г$; p_0 – начальное давление.

$p(t)$, являясь функцией от времени, может быть заменено на некоторое постоянное значение $p_{эф}$. Тогда выражение для общего количества энергии теплового движения частиц в объеме столба разряда может быть записано таким образом:

$$\Omega_{\text{т}} = \frac{1}{2}\xi(p_{\text{эф}} - p_0)v_{\text{с}},$$

где $\Omega_{\text{т}}$ – энергия теплового движения газа в объеме столба разряда; $v_{\text{с}}$ – объем столба газа.

Электродам передается лишь часть тепловой энергии, и если считать газ одноатомным, а поверхности электродов получают одинаковое количество тепловой энергии, то на единицу площади поверхности электрода приходится

$$W_{\text{а}}^{\text{т}} = \frac{3}{2}b(p_{\text{эф}} - p_0)v_{\text{с}},$$

$$W_{\text{к}}^{\text{т}} = \frac{3}{2}b(p_{\text{эф}} - p_0)v_{\text{с}},$$

где b – коэффициент передачи энергии, $0 < b < 1$.

Факельная компонента. Под действием разряда поверхность электродов мгновенно ($10^{-6} - 10^{-7}$ с) разогревается до температуры кипения и выше, что приводит к выбросу паров факелов со скоростями, значительно превышающими скорость звука. Доходя до противоположного электрода, струя факела передает тепловую энергию поверхности. Удельный тепловой поток в этом случае

$$q_c = \alpha[T^* - T_{\text{п}}],$$

где q_c – поток тепла, подводимый струей факела к поверхности электрода; α – коэффициент теплопередачи; T^* – температура торможения; $T_{\text{п}}$ – температура поверхности электрода.

Температуру торможения T^* по гидродинамическим закономерностям можно записать как

$$T^* = T_{\text{г}}\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right);\ k = \frac{c_p}{c_v},$$

где $T_{\text{г}}$ – температура факела; M – число Маха (отношение скорости факела к скорости звука); c_p, c_v – теплоемкость газа факела соответственно при постоянном давлении и объеме.

Коэффициент теплопередачи α для турбулентного потока определяется

$$\alpha = \frac{k}{2}c_p\rho_{\text{г}}\vartheta_{\text{г}}k_f,$$

где k – коэффициент, учитывающий размерность входящих величин; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа; $\vartheta_{\text{г}}$ – скорость газа; k_f – коэффициент трения.

Если считать температуру газа постоянной и равной некоторой величине эффективного значения, то в первом приближении полное количество энергии, подаваемое на поверхность анода, можно записать следующим образом:

$$W_{\text{а}}^{\text{ф}} = \frac{k}{2}c_p\rho_{\text{кф}}\vartheta_{\text{кф}}k_f\left[T_{\text{г}}\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right) - T_{\text{п}}\right]s_{\text{а}}t_{\text{кф}},$$

где $W_{\text{а}}^{\text{ф}}$ – энергия, передаваемая катодным факелом аноду; $\rho_{\text{кф}}$ – плотность газа катодного факела; $\vartheta_{\text{кф}}$ – скорость катодного факела; $s_{\text{а}}$ – площадь поверхности торможения факела об анод; $t_{\text{кф}}$ – время действия катодного факела.

Аналогичным способом определяется и факельная компонента на катоде.

Лучистая компонента. Газ, находясь в канале разряда при высокой температуре ($10^4 - 10^5$ К), способен передать часть тепловой энергии в виде излучения. Количество этой энергии, полученное анодом или катодом, в этом случае может быть найдено по закону Стефана-Больцмана:

$$W^{\text{и}} = \delta\varepsilon\sigma T_{\text{эф}}^4 S t_{\text{и}},$$

где δ – коэффициент поглощения света поверхностью металла; ε – коэффициент черноты плазмы разряда; $\sigma = 5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/(м$^{-2}$·К$^{-4}$) – постоянная Стефана – Больцмана; S – площадь излучателя; $t_{\text{и}}$ – время действия.

Объемная компонента. Это, как правило, то количество энергии, которое выделяется в объеме зоны растекания за счет эффекта Джоуля-Ленца в непосредственной близости от анодного и катодного пятен. Величина этой энергии примерно равна как для анода, так и для катода, и может быть записана как

$$W_{\text{а}}^{\text{об}} = \int_0^{t_{\text{и}}} I^2(t) R_{\text{эф}} dt,$$

где $R_{\text{эф}}$ – омическое сопротивление зоны растекания тока.

Определив значение и удельный вес каждой компоненты разряда, а также и решив уравнение теплопроводности, можно с определенной степенью точности определить то количество металла, которое будет удалено с поверхности электрода за единичный импульс [1], [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho c(T)}\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right] + \frac{1}{\rho c(T)}\frac{\partial \lambda(T)}{\partial T}\left[\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right],$$

где T – температура материала электрода; t – текущее время; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности в направлениях r и z при заданной температуре; $\rho c(T)$ – удельная объемная теплоемкость материала при заданной температуре.

Для подтверждения приведенных закономерностей были проведены экспериментальные исследования на различных видах материалов, чаще всего применяемых в передовых отраслях промышленности.

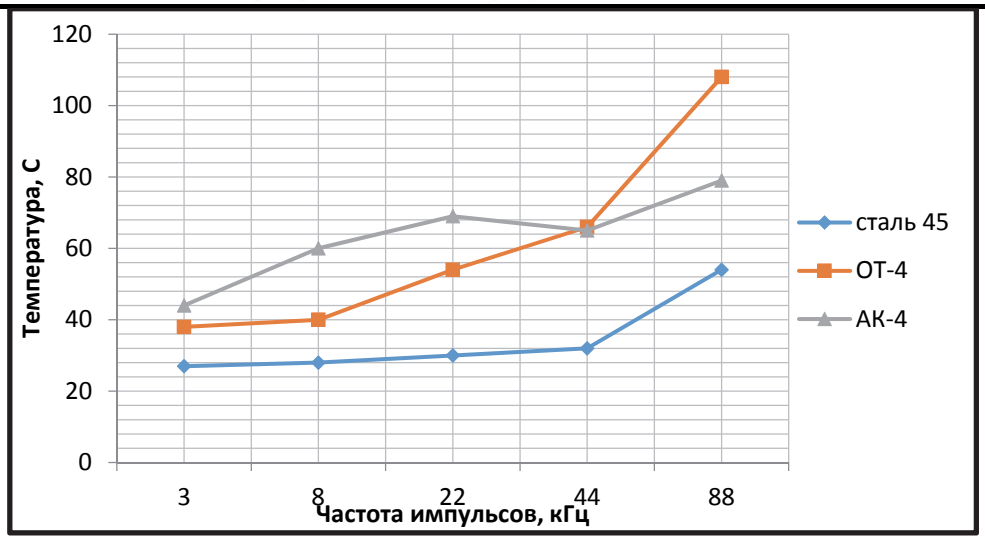
Методика и материалы

Проведя обработку стали 45, алюминия АК-4 и титана ОТ-4 с замером температуры электрода-инструмента, были получены графики, представленные на рис. 1. Обработку производили на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ 40-440М (рис. 2). В качестве материала электрода были использован электрод из меди М1. Также исследования проводились на настольном прецизионном электроэрозионном копировально-прошивочном комплексе ДГТ-ЭП-03. В этом случае были использованы медь и графит в качестве электродов-инструментов (ЭИ) и также сталь 45, АК-4 и ОТ-4 в качестве электродов-заготовок (ЭЗ).

Расчет по представленному уравнению теплопроводности также подтверждает, что результаты обработки алюминия в большей степени, а титана в меньшей не укладываются в представленную теорию. Тогда была выдвинута гипотеза о некоторых особенностях, которые сопровождают процесс ЭЭО этих материалов. Сделано предположение, аналогичное [5], о том, что в процессе разряда, когда объем удаленного из лунки материала достигает определенной величины, появляется вероятность образования «усов» – образований на основе материала электрода, чья длина превышает ширину и толщину и которые способствуют следующему пробою, эффективно сокращая межэлектродный промежуток.

Как видно из графиков, температура алюминиевого сплава АК-4 и титанового сплава ОТ-4 значительно превышает температуру при обработке при тех же режимах стали 45 (электроэрозионная обрабатываемость которой принята в теории за 1). Однако если для титанового сплава данное явление можно объяснить большей плотностью, более низкой теплопроводностью, более высокой теплоемкостью, что в совокупности приводит к концентрации тепловой энергии в области контакта материала заготовки с каналом разряда, то для алюминиевого сплава такое явление подобным образом объяснено быть не может. Алюминий имеет высокую теплопроводность и низкую теплоёмкость, что должно способствовать теплоотводу от области обработки. Но этого не происходит, что свидетельствует об значительных отличиях механизма пробоя на алюминиевый сплав.

а)



б)

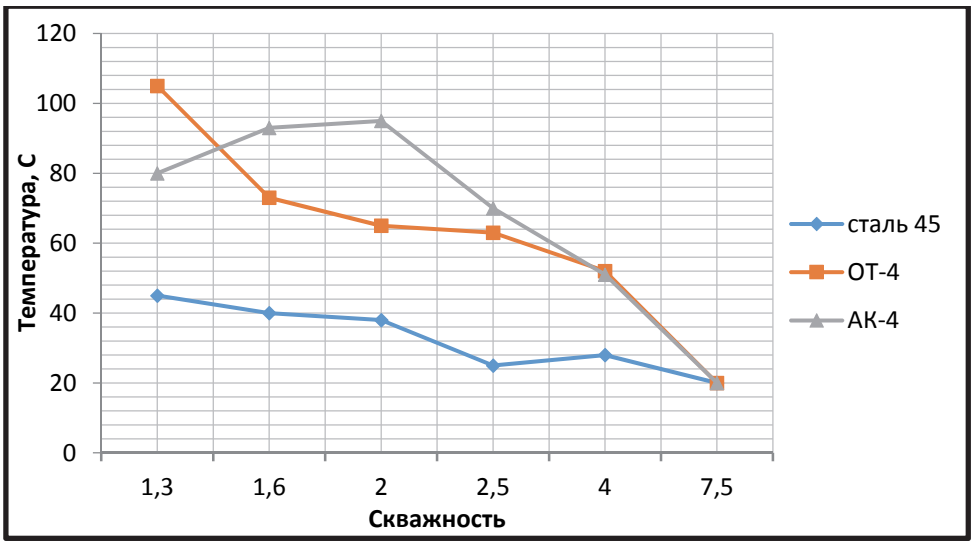


Рис. 1. Зависимость температуры электрода-инструмента от изменения:
а – частоты импульсов; б – скважности

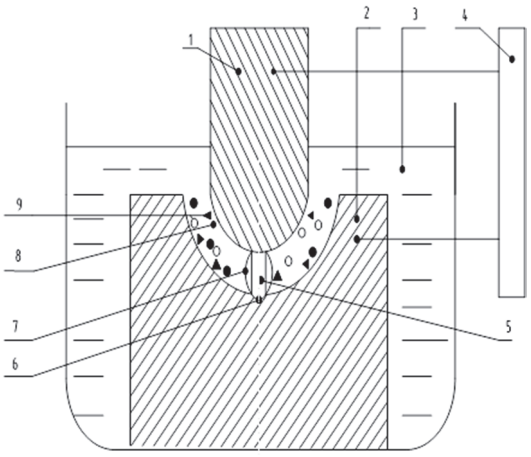


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – РЖ; 4 – генератор; 5 – канал заряда; 6 – лунка образования разрядом;
7 – газовый пузырь; 8 – частицы металла (шлам); 9 – продукты пиролиза

Дальнейшие исследования единичного импульса производились с использованием настольного прецизионного электроэрозионного копировально-прошивочного комплекса ДГТ-ЭП-03 (рис. 3, *а*), а также микроскопа Neophot 2 с максимальным увеличением ×1000 (рис. 3, *б*).

а) б)

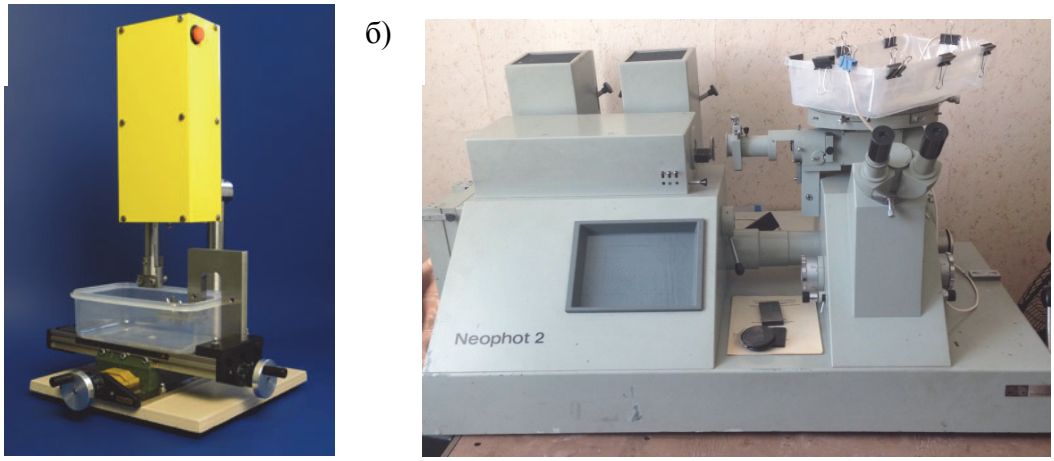


Рис. 3. Приборы для исследования единичного импульса:
а – ДГТ-ЭП-03; б – Neophot 2

Результаты и обсуждение

После того как были получены и обработаны результаты обработки трех видов материалов (сталь, алюминиевый и титановый сплавы) были проведены исследования по подтверждению выдвинутой гипотезы на единичном импульсе. Пробой производился между параллельными плоскостями электродов с минимальной обработкой для получения условий максимально приближенных к условиям обработки. На рис. 4 представлены фотографии с микроскопа при одном пробое из множества полученных на воздухе.

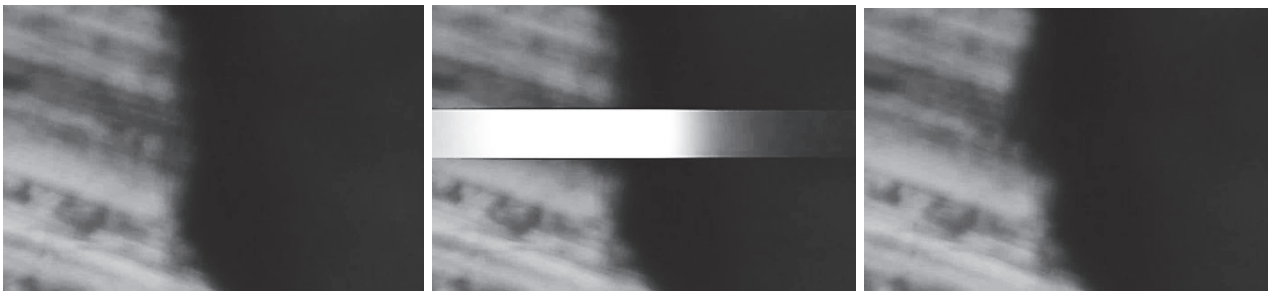


Рис. 4. Прохождение импульса между медным ЭИ и алюминиевым ЭЗ
(увеличение в 1000 раз)

Как видно из фото, отсутствуют какие-либо образования на краях лунки, которые могут как-либо влиять на процесс пробоя в последующем. Также можно заметить, что объем лунки имеет небольшое значение, по отношению с теми, которые получаются в результате пробоя в жидком диэлектрике.

Тогда были проведены эксперименты на тех же материалах, но уже в жидкости. На рис. 5 показаны результаты при пробое на алюминий. В качестве жидкого диэлектрика, заполняющего зазор, применялась дистиллированная вода.

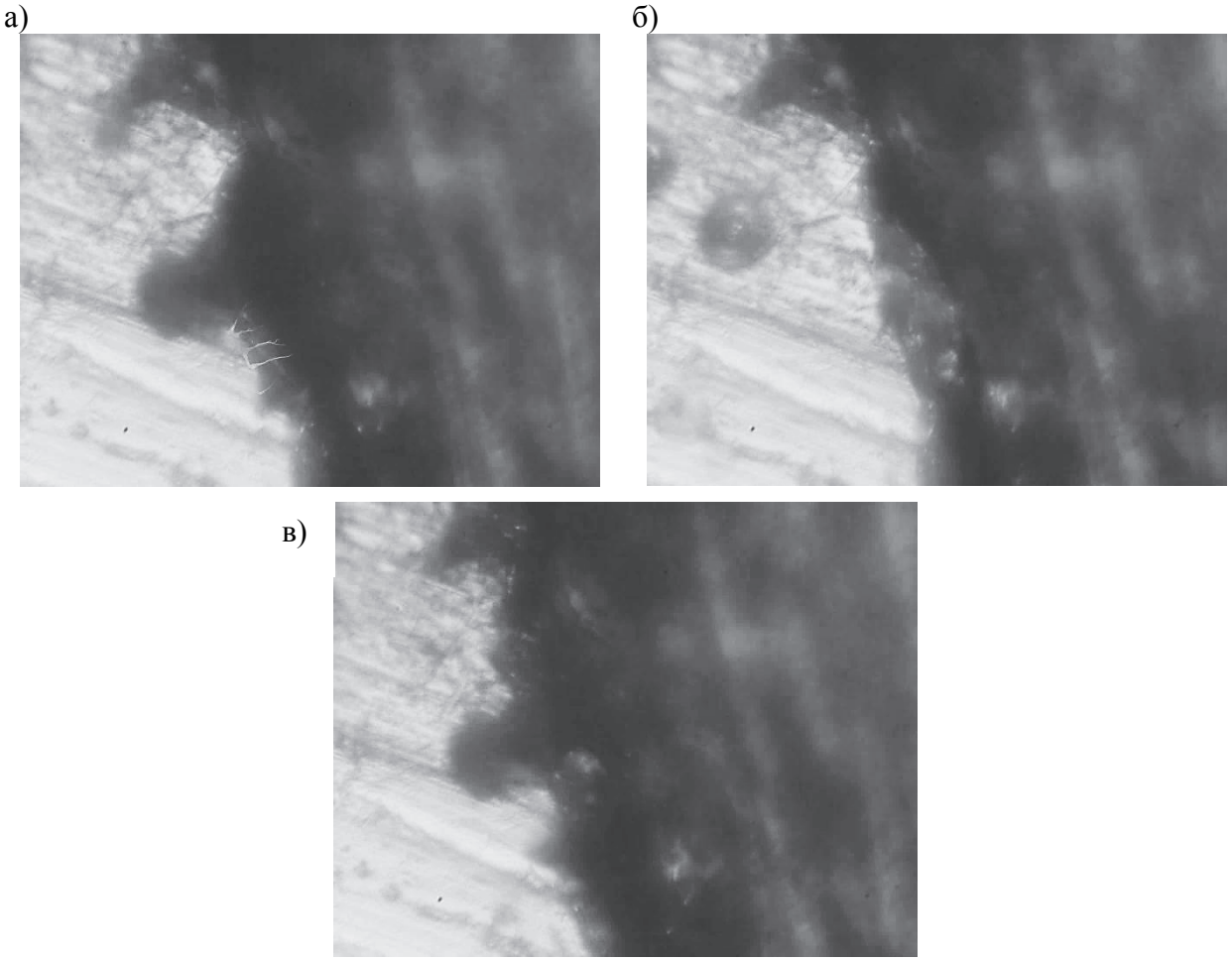


Рис. 5. Пробой в жидком диэлектрике:
а – до первого пробоя; б – после первого пробоя; в – после второго пробоя
(увеличение в 1000)

Как видно на рис. 5, *б* справа от первого кратера имеются нитевидные образования, предположительно и являющиеся «усами». Как описывалось ранее, они сокращают расстояние между электродами, за счет чего количество холостых импульсов сокращается, а именно они переходят в разряд рабочих. Соответственно растет количество выделяющейся энергии в процессе обработки. Тем самым можно объяснить наблюдаемые тепловые явления при обработке алюминия и титана. Как видно из хронологии следования снимков (рис. 5, *б* и рис. 5, *в*) следующий пробой произошел как раз в месте образования «усов».

Появление образований, как правило, зависело от энергии импульса, объема получаемой лунки, движения рабочей жидкости между поверхностями электродов и состоянием электродов до и после первого пробоя. К сожалению, пока не удалось выявить теоретические закономерности появления «усов» ввиду большого количества факторов, влияющих на процесс их появления.

Образование «усов» на алюминии происходило в разы чаще, нежели при титане. Это вполне укладывается в данную теорию, так как химическая активность титана при одних и тех же значениях температуры ниже, чем у алюминия, к тому же частицы титана тяжелее.

Образование «усов» на стали не происходило вовсе за всё время проведения экспериментов. Обладая низкой химической активностью и коротким промежутком времени, отведенном на процессы, по результатам которых могут образоваться «усы», процесс пробоя на сталь не вызывает отклонений от общей теории пробоя.

Выводы

1. Были внесены уточнения в теорию процесса пробоя между двумя электродами в жидком диэлектрике

2. Были получены экспериментальные данные по тепловым явлениям на электродах-заготовках из различных материалов в процессе обработки на разных режимах.

3. Была вдвинута и подтверждена экспериментально гипотеза о существовании нитевидных образований после пробоя, которые оказывают влияние на последующий пробой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б. Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 41 с.
2. Линёв, А. С. Механизм электроэрозионного пробоя в воде на алюминиевые и титановые сплавы / А. С. Линёв, М. Ю. Сарилов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6 (часть 6). – С. 1349-1353.
3. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2004. – 736 с.
4. Сарилов, М. Ю. Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта : автореф. дис. … д-ра техн. наук (05.03.01) / Сарилов Михаил Юрьевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 43 с.
5. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда : учеб. руководство: для вузов / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
6. Сарилов, М. Ю. Роль плазменного канала и механизмы теплопередачи в процессе электроискровой обработки / М. Ю. Сарилов, А. С. Линев, А. М. Злыгостев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № II-1(6). – С. 57-63.