

УДК 621.9.047

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБОЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ КАК ИСТОЧНИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

© 2011 А.С. Линёв, М.Ю. Сариллов

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Поступила в редакцию 02.03.2011

Один из способов повышения эффективности применения электроэрозионной обработки является изучение импульсного пробоя в жидкости, который имеет отличный от пробоя в газах механизм. Отличие проявляется в изменении работы выхода электронов из металла катода, влияние материала электродов на процесс пробоя и др. Исследование данных особенностей поможет скорректировать теорию пробоя и существенно повысить применяемость эффект электрической эрозии металлов для обработки металлов.

Ключевые слова: *пробой, электрическая эрозия металла, стример, канал разряда, плазма, газовый пузырь*

Электроэрозионный способ – наиболее совершенный из вариантов обработки металлов на сегодняшний день. Вызвано это тем, что в процессе обработки электрическим током нет преобразования энергии в другой вид: энергия поступает от сети и изменяется лишь количественно, когда как при традиционном резании энергия электрического тока преобразуется в механическую. Обработка при электроэрозионной обработке (ЭЭО) ведется совокупностью разрядов, проходящих между электродом-заготовкой и электродом-инструментом в среде жидкого диэлектрика. Каждый из разрядов вызывает разрушение поверхности каждого из электродов, однако эрозия одного из электродов больше, чем на другом. Этот эффект можно теми или иными способами увеличивать, делая износ электрода-заготовки более интенсивным, а в некоторых случаях и вообще исключая износ инструмента. Преимуществом ЭЭО является независимость твердости металла заготовки на процесс обработки, а также поверхностное упрочение, которое имеет место в связи с тепловыми явлениями, возникающими в канале разряда. В настоящее время стоит проблема по совершенствованию технологии обработки с целью увеличения производительности способа и качества получаемых поверхностей.

Усовершенствование процесса электроэрозионной обработки не может происходить

без исследования самого процесса пробоя в жидком диэлектрике, который используется в качестве рабочей жидкости. 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. Однако теория, разработанная в данных разделах физики, не может быть безоговорочно перенесена на пробой жидкости ввиду ярких особенностей механизма этого явления. Первое отличие жидкостного пробоя от газового – это разные значения работы выхода электронов из катода. Это происходит из-за нескольких явлений: изменение работы выхода вследствие проникновения поля в металл, влияние поверхности катода и пространственных зарядов под действием сил электрического изображения с учетом нелинейной поляризации среды.

Рассмотрим данные каждое явление в отдельности. Работы по нелинейным эффектам в жидких диэлектриках в сверхсильных электрических полях [2] 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

Линёв Александр Сергеевич, бакалавр техники и технологий. E-mail: uranus_123@mail.ru

Сариллов Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств». E-mail: sarilov@knastu.ru

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

$$W = W_0 \epsilon^{-1} \quad (2)$$

где W_0 – работа выхода электронов из металла в вакуум, $\epsilon = n^2$. 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:

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

где

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

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

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

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

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

где

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

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

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

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

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

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 жидкости в поле электрона и его изображения тем больше, чем больше работы выхода из металла в вакуум и постоянная Керра. Значения работы выхода электронов в условиях опыта могут существенно отличаться от истинных фотоэлектрических величин для данного металла катода. В результате механической полировки и последующего пребывания на воздухе на поверхности электродов образуется окисная пленка, а при помещении их в углеводородные жидкости еще и диэлектрическая пленка из воскообразных продуктов разложения жидкости. Эта пленка изменяет потенциальный барьер (рис. 1).

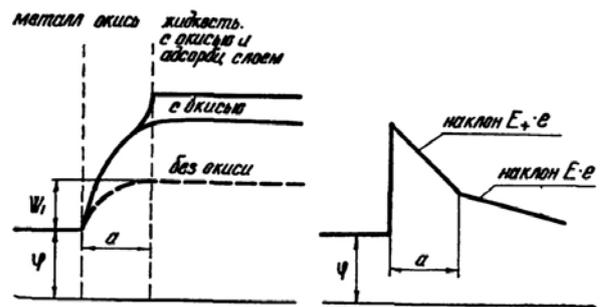


Рис. 1. Изменение потенциального барьера под действием окисного слоя адсорбционного слоя на окиси (а) и под действием пространственного заряда положительных ионов (б)

В определенных условиях окисная пленка на катоде может вызывать и обратный эффект. Положительные ионы, образующиеся в жидкости, оседая на поверхности окисной пленки, создают поверхностно заряженные слои. Увеличивая напряженности поля у катода, эти слои повышают интенсивность электронной эмиссии и ток проводимости в сильных полях. Для вакуума это влияние становится существенным лишь при полях $\sim 10^8$ В/см. Для жидкостей с большой ϵ при импульсном воздействии напряжения, когда средняя напряженность поля в промежутке $E_{cp} \sim 10^6$ В/см, поле у поверхности металла может достигать $\sim 10^8$ В/см вследствие непрерывности нормальной составляющей электрической индукции ($E_0 = D = \epsilon E_{cp}$) и усиление поля на микроостриях катода. Для корректного учета

эффекта проникновения поля в металл при полях $\sim 10^8$ В/см необходимо обосновать применимость уравнения

$$\Delta e\varphi = \frac{eE_0}{\chi} e^{-\chi x}$$

где $\Delta e\varphi$ – изменение уровня Ферми при наличии поля у поверхности металла, $E_0 = \varepsilon E_{cp}$, χ – константа экранирования Томаса-Ферми. Проникновение поля в металл изменяет энергию электронов на уровне Ферми следующим образом:

$$e\varphi_i(E) = -e\varphi_i(0) + \Delta e\varphi_0$$

$e\varphi_i(E)$ и $e\varphi_i(0)$ – энергии электронов на уровне Ферми при наличии поля и без него соответственно; $\Delta e\varphi_0$ – значение $\Delta e\varphi$ при $\chi=0$. Тогда работу выхода электронов из металла в жидкость при наличии внешнего поля можно записать

$$W_0' = -W_0 + \Delta e\varphi_0 = -W_0 + e\varepsilon E_{ch} \chi^{-1}$$

По результатам экспериментов для полярных жидкостей снижение работы выхода электронов из металла вследствие проникновения поля становится существенным уже при полях $\sim 10^4$ В/см. Эмиссия электронов с катода – стартовый этап пробоя жидкости, от которого, бесспорно, во многом зависит дальнейшее протекание разряда через межэлектродный промежуток, а потому весьма важно иметь уравнения способные описать этот процесс.

Следующей рассмотренной особенностью импульсного пробоя в жидкости станет влияние материалов электродов на электрическую прочность среды. Вследствие взрывного разрушения электродов и поступления их материала в плазму развивающегося разряда следует ожидать существования связи электрической прочности жидкостей в коротких промежутках (какие и присущи ЭЭО) с термодинамическими характеристиками материала электродов; в условиях однородного поля – со свойствами материала анода. С целью проверки этого предположения и оценки роли взрывного разрушения электродов в импульсном пробое жидкостей выполнены измерения импульсной электрической прочности очищенной воды ($\rho=10^4$ Ом·см) и гексана при различных материалах электродов [1]. Полусферические электроды диаметром 0,2 см изготавливались из нержавеющей стали, молибдена, алюминия, меди и свинца. Длина разрядного промежутка в воде составляла $2,92 \cdot 10^{-2}$ см, в гексане – $1,9 \cdot 10^{-2}$ см. Измерения выполнены на прямоугольном импульсе с фронтом $\tau_{\phi}=10$ нс.

Время разряда в каждом случае поддерживалось примерно постоянным и равным 500 нс. Для каждой пары электродов выполнено 30 измерений. Электроды заменялись через 10 пробоев. Для электродов из различных материалов режим полирования и время между окончанием полирования и измерениями обеспечивались неизменными ($t \approx 5$ мин). Из полученных результатов следует, что

1. основное влияние на электрическую прочность жидкости оказывает материал анода;
2. изменение в широких пределах термодинамических свойств материала электродов незначительно изменяет электрическую прочность жидкостей;
3. существует тенденция к уменьшению электрической прочности жидкостей при уменьшении теплоты сублимации и испарения материала анода.

Исключением в этом ряду является алюминий, имеющий высокую удельную теплоту сублимации и испарения, но обеспечивающий относительно низкие значения электрической прочности разрядного промежутка. Наиболее вероятной причиной этой аномалии является искажение поля в промежутке «усами», образующимися из окисной пленки при разрушении ее во время разряда. Анализ состояния электродов в процессе измерений показывает, что на алюминиевых электродах последующие разряды осуществляются 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.

Выводы: результаты исследования влияния материала электродов на импульсную электрическую прочность жидкостей подтверждают тепловую природу разрушения электродов и указывают на важную роль в пробое продуктов разрушения, поступающих в плазму развивающегося разряда. Можно предположить, что пары и макрочастицы металла электрода, имеющие малые, по сравнению с жидкостью, потенциалы ионизации (5-8 эВ), ионизируются в плазме разряда и тем самым увеличивают ее проводимость и облегчают пробой. Все рассмотренные процессы могут помочь скорректировать теорию электроэрозионной обработки и сделать процесс более устойчивым и производительным, а так же позволит получать более качественные поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ушаков, В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В.Я. Ушаков // Томск. Изд-во ТГУ, 1975. 258 с.
2. Райзер, Ю.П. Действие лазерного излучения. Сб. статей / Ю.П. Райзер // М.: Мир, 1968. 390 с.

RESEARCH THE BREAKDOWN OF DIELECTRIC LIQUID AS THE SOURCE OF PERFECTION THE ELECTROEROSIVE PROCESSING

© 2011 A.S. Linyov, M.Yu. Sarilov

Komsomolsk-on-Amur State Technical University

One of ways to increase the efficiency of electroerosive processing application is studying the pulse breakdown in a liquid which has different mechanism from breakdown in gases. Difference is shown in change of exit work of electrons from cathode metal, influence of material of electrodes on process of breakdown, etc. Research of the given features will help to correct the theory of breakdown and is essential to raise applicability effect of electric erosion threew-lov for processing of metals.

Key words: breakdown, electric erosion of metal, streamer, category channel, plasma, gas bubble

Alexander Linyov, Bachelor of Technics and Technologies.

E-mail: uranus_123@mail.ru

Mikhail Sarilov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Machines and Devices for Chemical Industry".

E-mail: sarilov@knastu.ru