

УДК 621.9.048

## МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОБОЯ В ВОДЕ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ И ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Линёв А.С., Сарилов М.Ю.

*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,  
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: sarilov@knastu.ru*

Приведены основные причины применения электроэрозионной обработки в современном машиностроении и в авиакосмической области в частности. Также сделан акцент на применении в данной области промышленности алюминиевых и титановых сплавов и особенностях, выявленных при их обработке. Для теоретического интерпретирования полученных экспериментальных данных приведен механизм пробоя на алюминиевые и титановые сплавы с учетом процессов извлечения электронов с поверхности металла, а также выяснения особенностей инжектирования полученных зарядов в рабочую жидкость. Краткое описание возможных процессов взаимодействия нейтральных частиц и электронов, движущихся под действием внешнего магнитного поля. Процесс наглядно проиллюстрирован графическими изображениями с указанием траекторий движения как легких электронов, так и тяжелых ионов, полученных в результате ионизации канала разряда. В итоге по результатам проведенного анализа процесса и физико-химических свойств базовых элементов исследуемых сплавов титана и алюминия было сделано предположение относительно возможного характера пробоя на данные виды материалов.

**Ключевые слова:** электрическая эрозия, алюминий, титан, теплота, рабочая жидкость

## ERODING BREAKDOWN MECHANISM IN WATER FOR ALUMINIUM AND TITANIUM ALLOYS

Linev A.S., Sarilov M.Y.

*FGBOU VPO «Komsomolsk-on-Amur State Technical University»,  
Komsomolsk-on-Amur, e-mail: sarilov@knastu.ru*

The main reason for using electrical discharge machining in modern engineering and aerospace field in particular. Also focuses on the application in this area industry is aluminum and titanium alloys and characteristics identified in their processing. For the theoretical interpretation of the experimental data shows the breakdown mechanism for aluminum and titanium alloys, taking into account the process of extracting electrons from the metal surface, as well as determine the characteristics of the obtained injecting charges into the working fluid. Brief description of the possible interactions between neutral particles and electrons moving under the influence of an external magnetic field. The process is illustrated graphically graphic images showing the trajectories of movement as light electrons and heavy ions produced by ionization of the discharge channel. As a result, the results of the analysis process and physico-chemical properties of the basic elements of the alloys: aluminum and titanium, it has been suggested regarding the possible breakdown character of these types of materials.

**Keywords:** electric erosion, aluminum, titanium, heat, working fluid

Электроэрозионная (электроискровая) обработка характеризуется рядом очень важных преимуществ перед той же лезвийной обработкой. К достоинствам электроэрозионной обработки (ЭЭО) можно отнести:

- высокую точность;
- хорошее качество поверхности после обработки;
- независимость от твердости заготовки;
- возможность обработки деталей низкой жесткости.

Однако ЭЭО имеет и свои недостатки. Совокупность достоинств и недостатков данного метода обработки металлов предопределили преимущественные области применения: высокоточное машиностроение, авиакосмическая техника, приборостроение, судовые производства и т.д. И так уж совпало, что приоритетными материалами в этой области из-за своих качеств стали сплавы на основе алюминия и титана. От качества обработки этих двух групп материалов во многом и зависит работоспособ-

ность ответственных узлов аппаратов в указанной области.

Если при совершенствовании процесса лезвийной обработки рассматривается лезвийный клин как обрабатывающий элемент, то при рассмотрении ЭЭО необходимо рассматривать единичный импульс (искру) как инструмент обработки. Процесс образования, развития и функционирования искры до конца не изучен ввиду сложности наблюдения этого явления из-за его малого размера и высокой скорости развития. Однако все ранее произведенные работы по изучению искрового пробоя жидкого диэлектрика, как правило, не делали принципиальных различий между обрабатываемыми материалами, а если и делали, то производили лишь констатацию факта отличий, не объясняя в сущности причин отличия данного аспекта обработки от общепринятой теории.

Однако такие отличия все же имеются. На рис. 1 показаны изменения температуры заготовки в процессе обработки от изме-

нения основных параметров процесса обработки (скважность и частота следования импульсов).

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 теплоемкость, что должно способствовать теплоотводу от области обработки. Но этого не происходит, что свидетельствует о значительных отличиях механизма пробоя на алюминиевый сплав.

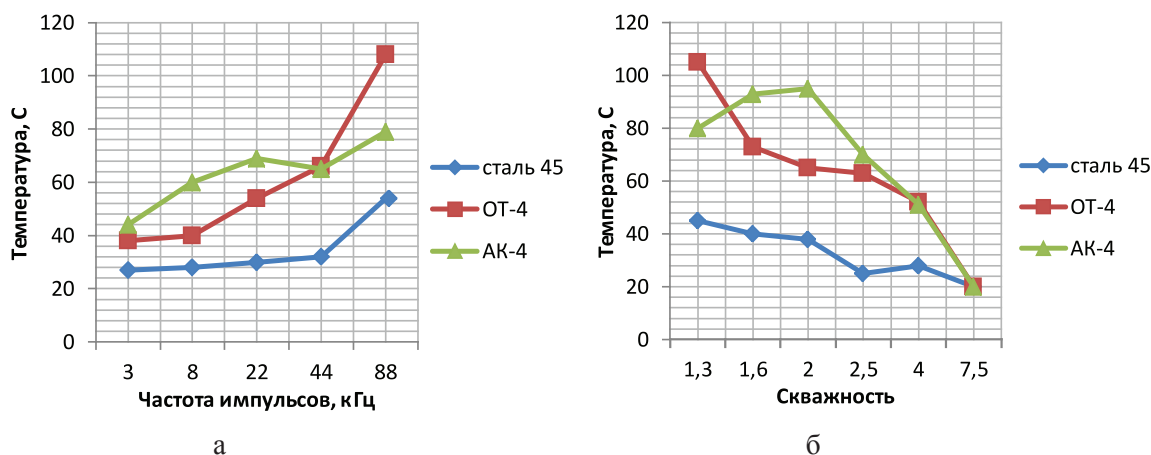


Рис. 1. Зависимость температуры от изменения:  
а – частоты импульсов; б – скважности

Целью работы стало выявление механизма пробоя на титановые и алюминиевые сплавы в жидком диэлектрике при электроэрозионной обработке. Предлагаемый механизм пробоя включает все основные стадии из классической теории пробоя в жидком диэлектрике. Для простоты описания введем некоторые уточнения. Так, для простоты пояснения в качестве диэлектрика выберем дистиллированную воду, а схему обработки выберем прямую (электрод-инструмент катод, а электрод-заготовка анод).

Большое количество физико-химических процессов начинается сразу после приложения на межэлектродный промежуток соответствующего напряжения пробоя, т.е. электромагнитного поля. Сразу после появления ЭДС появляются микротоки проводимости. Они обусловлены наличием в диэлектрической жидкости свободных носителей зарядов. Такими носителями могут стать как свободные легкие электроны, так и тяжелые ионы жидкости, которые постоянно существуют по ряду причин (тепловое взаимодействие молекул, солнечное излучение, радиация и пр.). Однако все это не сильно сказывается на общей картине пробоя, т.к. количество этих носителей крайне мало и развитие канала разряда в результа-

те их упорядоченного движения не возникает. Более важным с точки зрения пробоя является процесс вырывания электронов с поверхности катода под действием внешнего поля.

Для извлечения электрона из металла требуется затратить некоторое количество энергии, минимальное количество которой называется работой выхода [1]. Она зависит от состояния поверхности ее частоты, шероховатости и др. Энергию связи электрона в металле можно трактовать как работы  $\frac{e^2}{4a}$  против притягивающей силы изображения  $\frac{e^2}{4r^2}$ , которую нужно затратить при удалении электрона на расстояние порядка межатомного расстояния на бесконечность. Так как имеется внешнее вытягивающее поле  $E$ , 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. 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

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

Это явление называют эффектом Шоттки.

Еще одно замечательное явление наблюдается при наличии оксидной пленки на поверхности металла. Наличие пленки данного рода на алюминиевых и титановых сплавах считается нормальным, учитывая высокую химическую активность этих металлов. В [2] сделано предположение, что

наличие оксидной пленки вызывает «налипание» свободных положительных ионов из жидкости, что в свою очередь образует пространственный положительный заряд, который создает дополнительное электрическое поле, снижая работу выхода с поверхности металла. По результатам многократных экспериментов была составлена схематичная интерпретация явления (рис. 2).

Итак, судить о количестве эмитированных электронов из металла катода можно по концентрации электронов в материале, интенсивности электрического поля и наличия оксидной пленки на поверхности металла. Теперь, когда в прикатодной области имеется некоторое количество эмитированных электронов. Под действием электрического поля они начинают двигаться в сторону анода, сталкиваясь при этом с окружающими их молекулами и передавая им часть кинетической энергии полученной от поля.

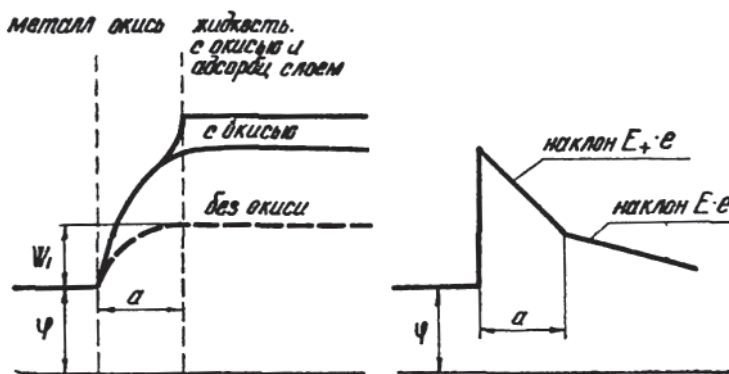


Рис. 2. Влияние оксидной пленки на работы выхода электрона с поверхности металла

Различают 2 типа столкновений электрона с частицами жидкости: упругое и неупругое (ионизационное). Упругие столкновения характеризуются законом сохранения импульса. Так, электрон, преодолевая расстояние свободного пробега, отдает запасенный от внешнего поля импульс (или часть импульса) неподвижной молекуле. Молекула жидкости условно неподвижна ввиду того, что  $v_e \gg v_m$ . Длина свободного пробега составляет:

$$l = \frac{v}{N\sigma} = \frac{1}{N\sigma} \quad (1)$$

где  $v$  – скорость движения электрона (зависит  $E$ );  $N$  – частота столкновений;  $N$  – плотность жидкости;  $\sigma$  – площадь эффективного сечения молекулы (табличное значение).

В результате столкновения незначительно повышается средняя скорость движения молекул в прикатодной области. Упругие столкновения продолжают до того момента, пока электроны не разгонятся до

такой скорости, при которой смогут совершать неупругие соударения с молекулами жидкости, т.е. ионизировать.

Неупругие соударения электронов начинаются с того момента, когда электрон за время свободного пробега  $l$  приобретает импульс, достаточный для ионизации молекулы, встретившейся у него на пути. Тогда, попадая в площадь эффективного сечения, электрон выбивает электрон молекулы, тем самым ионизируя молекулу. В результате такого столкновения получаются 2 электрона, которые под действием внешнего поля вновь ускоряются, и один «тяжелый» ион молекулы, который начинает движение, противоположное электронному направлению, так же ускоряясь в электрическом поле. Не набрав достаточной массы, электроны будут в незначительной мере увеличивать тепловую скорость движения других молекул, или, набрав достаточный импульс, продолжат ионизационное воздействие на молекулы жидкости, тем самым

порождая развитие канала разряда в виде стримера. Полученный же в результате столкновения ион молекулы из-за своей инерциальной (массы) не сможет набрать достаточного импульса для ионизации, будет повышать тепловую скорость движения частиц жидкости. Однако в отличие от электронов масса иона значительно больше, поэтому его вклад в повышение температуры жидкости более высок. Встречая молекулы жидкости на своем пути, ион повышает их скорость, тем самым повышая температуру жидкости. Благодаря локализации данного процесса в пространстве, в определенной области часть жидкости меняет свое агрегатное состояние с жидкого на газообраз-

ное. Этот факт подтверждается всеми экспериментами (как правило, на поверхности катода происходит образование пузырьков газа). Данный переход сильно влияет на дальнейшее развитие разряда, так как плотность газа значительно ниже плотности жидкости. А из (1) видно, что при снижении плотности повышается длина пробега, что при наличии внешнего магнитного поля означает, что за длину свободного пробега электрон наберет большую скорость и больший импульс, а значит, с большей вероятностью сможет ионизировать другие молекулы жидкости и процесс повторится. Рис. 3 хорошо показывает процесс движения электронов и ионов в воде [3].

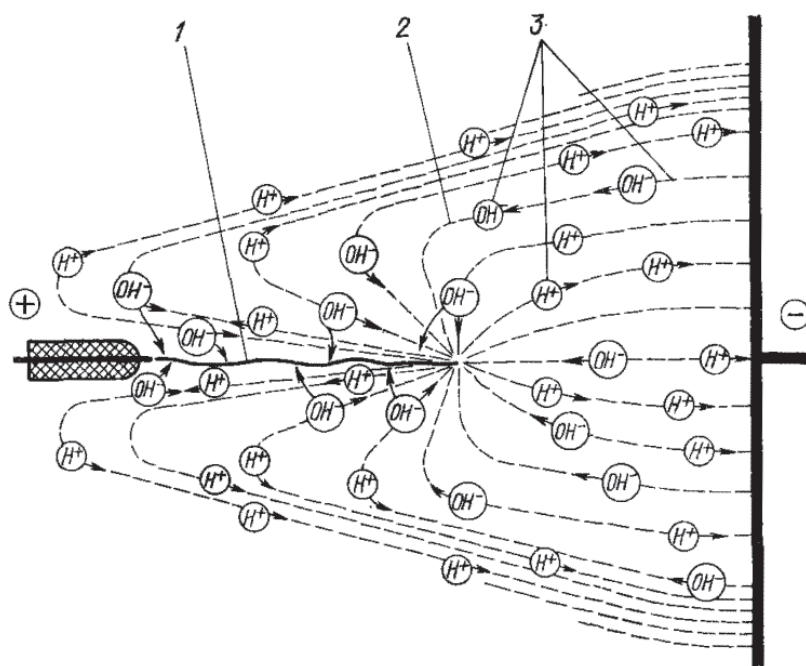


Рис. 3. Схематичное представление о развитии канала разряда:  
1 – растущий стример; 2 – силовые линии поля; 3 – направление движения иона

Как правило, стример проходит уже не столько в жидкости, сколько в газо-жидкостной среде. Скорость стримера чрезвычайно велика и порой достигает  $10^7$  м/с. Развитие основного же канала разряда происходит значительно медленнее. Канал развивается по пути прохождения стримера (в слабоионизированной плазме), который в свою очередь, пересекая межэлектродный промежуток (МЭП), рассеивается в прианодной области из-за объемного положительного заряда ионов.

Когда происходит замыкание канала разряда на аноде, то в канале разряда находится низкотемпературная плазма, которая за счет приложенной разности потенциалов начинает расширяться, продолжая ионизи-

рование окружающего слоя. Повышение давления и температуры вызывает ускоренное увеличение диаметра канала разряда. В это же время происходит нагрев поверхности катода и анода от соприкосновения с каналом разряда. Высокая температура и давление за короткий срок расплавляют и испаряют небольшое количество металла. Практическая мгновенность происходящего нагрева минимизирует количество теплоты, отведенное от электрода-заготовки за счет теплопроводности и излучения.

В момент прекращения подачи напряжения на МЭП расширение канала постепенно замедляется и по истечении некоторого количества времени начинает резкое сужение (так называемое «схлопывание»)



под действием давления окружающей канал жидкости. Некоторое количество расплавленного и испаренного металла втягивается разреженностью, образовавшейся на месте канала разряда. При этом происходит чрезвычайно быстрое охлаждение этого объема

металла. В результате этого, а также высокой пластичности и химической активности частицы металла (в частности, алюминия) окисляются и сплавляются в так называемые окисленные усы [4]. Схематичное представление данного процесса отображено на рис. 4.

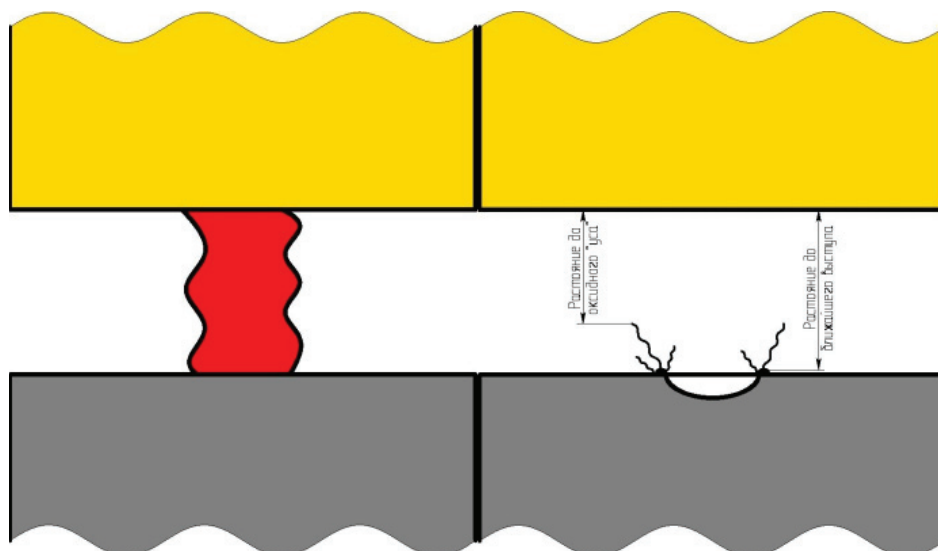


Рис. 4. Упрощенное представление пробоя на алюминиевый сплав

Ввиду схожести характеристик алюминия и титана (химическая активность, особенно при высоких температурах) сделано предположение об идентичности процесса пробоя на сплавы обоих этих металлов. Естественно, титановый сплав будет иметь отличия в механизме. Так, большая удельная теплота плавления и низкая теплопроводность не позволят разогреть достаточное большое количество материала, в результате чего длина окисдного уса будет значительно меньше. Однако даже незначительное сокращение межэлектродного промежутка в значительной мере может повлиять на процесс обработки и соответственно на конечный результат.

Использование предложенного механизма позволит скорректировать процесс ЭЭО алюминиевых и титановых сплавов с целью повышения эффективности обработки и качества конечного результата.

#### Список литературы

1. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда: учеб. руководство: для вузов. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
2. Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 258 с.
3. Базелян, Э.М. Искровой разряд: учеб. пособие: для вузов / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.
4. Линёв, А.С., Сариллов, М.Ю., Злыгостев, А.М. Роль плазменного канала и механизмы теплопередачи в процессе электроискровой обработки // Науки о природе и технике:

Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета. – 2011. – № 6 – 1(2). – С. 57–63.

5. Линёв А.С., Сариллов М.Ю. Структура материалов после электроэрозионного воздействия // Материалы международного научного форума студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатского-Тихоокеанского региона. – Владивосток: Инженерная школа ДВФУ, 2012. – С. 790–794.

#### References

1. Rajzer Y.P. Fizika gazovogo razryada: ucheb. rukovodstvo: dlya vuzov. M.: Nauka, 1992. 536 p.
2. Ushakov V.Y. Impul'snyj ehlektricheskiy proboj zhidkostej / V.YA. Ushakov // Tomsk. Izd-vo TGU, 1975. 258 p.
3. Bazelyan, E.M. Iskrovoy razryad: Ucheb. posobie: dlya vuzov. / E.M. Bazelyan, Y.P. Raj-zer. M.: Izd-vo MFTI, 1997. 320 p.
4. Linyov, A.S., Sarilov, M.YU., Zlygostev, A.M. Rol' plazmennogo kanala i mekhanizmy teploperedachi v protsesse ehlektoiskrovoy obrabotki Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure tekhnicheskogo universiteta «Nauki o prirode i tekhnike». 2011. no. 6 1(2). pp. 57–63.
5. Linjov A.S., Sarilov M.Ju. Struktura materialov posle jelektroerozionnogo vozdejstvija. – Materialy mezhdunarodnogo nauchnogo foruma studentov, aspirantov i molodyh uchenyh stran Aziatskogo-Tihookeanskogo regiona. Vladivostok: Inzhenernaja shkola DVFU. 2012. pp. 790– 794.

#### Рецензенты:

Еренков О.Ю., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Химическая технология и биотехнология», ФГБОУ ВПО «ТОГУ», г. Хабаровск;  
Черномас В.В., д.т.н., профессор, зав. лабораторией «Проблемы металлотехнологий», ИММ ДВО РАН, г. Хабаровск.

Работа поступила в редакцию 27.05.2013.