

04;11;12

О механизме эрозии электродов при импульсных разрядах в воде с энергией в импульсе ~ 1 Дж

© В.Л. Горячев, А.А. Уфимцев, А.М. Ходаковский

Институт проблем электрофизики РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 18 июля 1996 г.

В работе показано, что эрозия электродов при импульсных разрядах в воде определяется тепловым кавитационным воздействием. Вдув газа ослабляет кавитационное воздействие, упрощает пробой и позволяет использовать массивные электроды.

Электрический разряд в жидкостях широко применяется в различного рода технологиях, связанных с импульсной механической обработкой. В последние годы свойства электрического разряда в воде используют для ее очистки [1]. Промышленное использование этого свойства во многом сдерживается отсутствием конструкции электроразрядной камеры с длительным ресурсом работы электродов. Ресурс работы электродов ограничивается эрозией, что, в первую очередь, относится к острейшему электроду (аноду), инициирующему разряд в конструкции острие–плоскость.

В настоящей работе изложены результаты исследования механизма эрозии электродов при импульсно-периодических разрядах в воде с малой энергией в импульсе (≤ 1 Дж). Установка и методы измерения основных параметров разряда описаны в [1]. Длительность разрядного импульса изменялась от 20 до 200 мкс, частота следования импульсов ~ 50 –100. Амплитудное значение силы тока ~ 25 –30 А, при этом падение напряжения на разрядном промежутке ~ 1000 В. Использовались два типа электродов: проволочные — диаметром 1 мм, выступающие в воду на высоту 1.5–2 мм от изоляционной стенки, и стержневые — диаметром 10 мм, выступающие на высоту 10 мм.

Хорошо известно [2,3], что острейший анод значительно облегчает импульсный пробой жидкости (уменьшая величину пробивного напряжения). Это связано с концентрацией тока вблизи электрода и след-

ствие этого локальным перегревом жидкости около поверхности анода, что приводит к образованию начальной стадии пробоя в виде газового микропузыря. При использовании стержневых массивных электродов этот процесс инициируется путем вдува газа через отверстие диаметром 1.3 мм.

Величина эрозии у проволочных электродов определялась по уменьшению высоты выступающей части электрода с течением времени, а для массивных стержневых путем взвешивания. При этом для повышения точности измерений время работы электрода было не менее 100 часов. В качестве материалов использовались для острийных электродов: медь, сталь, латунь, молибден, вольфрам; для стержневых массивных: медь, сталь и сплавы, содержащие вольфрам и молибден. Состояние поверхности электродов после работы регистрировалось электронным микроскопом. Производилось фотографирование поверхности с коэффициентом увеличения: 15, 200, 350, 500. Из этих фотографий можно сделать качественные выводы о характере разрушения поверхности электродов.

Основные результаты.

1. Для одних и тех же материалов при одинаковой длительности и частоте следования импульсов эрозия острийных (проволочных) электродов на порядок величины больше. Например, удельная эрозия (α) медных: острийного электрода $\sim 4 \cdot 10^{-7}$ (кг/С), массивного $\sim 2.5 \cdot 10^{-8}$; а стальных: острийного $\sim 1.5 \cdot 10^{-7}$, массивного $\sim 3.6 \cdot 10^{-8}$.

2. Увеличение длительности импульса (τ) приводит к увеличению удельной эрозии, при этом зависимость близка к линейной (см. таблицу № 1).

Таблица 1.

Материал	α , кг/с	τ , мкс
Медь	$4 \cdot 10^{-7}$	20
	$1.4 \cdot 10^{-6}$	200
Сталь	$1.5 \cdot 10^{-7}$	20
	$1 \cdot 10^{-6}$	200

3. Для острийных электродов величина эрозии зависит от механических свойств материала, а для массивных — практически не зависит.

Обсуждение полученных результатов.

Основной причиной эрозии поверхности электродов при импульсном разряде в воде, так же как и в дуговых пятнах на холодных электродах, является токовый нагрев. Средний диаметр пятен на опыте определяется методом автографа (эрозионные следы). Характерной особенностью разряда в воде по отношению к газовому является возникновение у поверхности острейного электрода микропузыря, который затем кавитирует. При этом есть определенная вероятность, что этот процесс может произойти на поверхности электрода. В случае, когда пузыри создаются искусственно, пробой может инициироваться этими пузырями [3] и влияние кавитации на эрозию становится незначительным. Качественно это объясняет тот факт, что при одних и тех же условиях (величине тока и напряжения, размере дуговых пятен) эрозия острейных электродов на порядок величины больше, чем у массивных с продувом газа. Это подтверждается также фотографиями поверхности электродов. В случае острейных электродов кратеры на поверхности более глубокие и, кроме того, видны следы разбрызгивания жидкого металла. Этого не наблюдается для массивных электродов.

Для количественных оценок обнаруженных закономерностей были рассмотрены две математические модели.

Первая модель описывает тепловую эрозию с поверхности дугового пятна [4]. Из численного решения нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазовых переходов при заданной величине плотности потока энергии определялась величина эрозии с поверхности пятна. Плотность потока энергии бралась из экспериментальных осциллограмм напряжения и тока. Радиус пятна определялся методом автографа. Величина эрозии вычислялась как интеграл от плотности потока испаряющихся атомов за время действия импульса. Плотность потока испаряющихся атомов представлялась формулой:

$$I = P_0 \sqrt{m / (2\pi kT)} kT Q^{-1} (1 - \exp(-Q / (kT))),$$

где P_0 — давление насыщения, m — масса атома металла, Q — теплота испарения на атом, формула аналогична приведенной в [5].

Основные результаты расчета сводятся к следующему:

— за время действия импульса прогревается по глубине область $\sim (\lambda\tau / (\rho C_p))^{1/2}$, где λ — коэффициент теплопроводности материала, ρ — плотность материала, C_p — удельная теплоемкость, τ — длительность импульса;

— за это же время температура поверхности для всех рассмотренных веществ (медь, сталь, вольфрам) достигает температуры кипения. Для меди и стали это время составляет ≈ 3 мкс, для вольфрама ≈ 10 мкс;

— после достижения температуры кипения величина эрозии со временем возрастает линейно.

Некоторые результаты расчета величины эрозии представлены в таблице № 2.

Таблица 2. Величина эрозии за один импульс

Материал	Величина эрозии, кг, эксперимент	Величина эрозии, кг, расчет
Медь	$1 \cdot 10^{-11}$	$5.5 \cdot 10^{-12}$
Сталь	$2 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12}$
Вольфрам	$2 \cdot 10^{-11}$	$9.4 \cdot 10^{-12}$

Если учесть, что результаты расчета во многом зависят от задания величин размера пятна и приэлектродного падения напряжения, то согласие с экспериментом — это, в первую очередь, относится к сравнительной характеристике эрозии меди и вольфрама — можно считать удовлетворительным.

Влияние газовых пузырей на распределение напряженности электрического поля в жидкости рассматривалось в следующей модели. В бесконечной слабопроводящей среде (воде) находится сферическая полость (газовый пузырь). Внешнее электрическое поле однородное. Диэлектрические и проводящие свойства среды и пузыря в общем случае различны. Из расчета следует, что в предпробойной стадии, когда электропроводность внутри пузыря практически равна нулю, поле вне пузыря ослабляется, а внутри него усиливается: $E = 3E_0\varepsilon/(1 + 2\varepsilon) \approx 1.5E_0$, где $\varepsilon = \varepsilon_w/\varepsilon_g$; $\varepsilon_w, \varepsilon_g$ — относительные диэлектрические проницаемости соответственно воды и газа в пузыре; E_0 — напряженность внешнего поля.

Таким образом, при наличии пузырей в воде пробой и зарождение стримера с большой вероятностью произойдет в газовом пузыре. Это означает, что кавитационное воздействие на поверхность электрода практически отсутствует и величина эрозии для массивного электрода с

продувом газа существенно меньше, чем в случае острейшего электрода без продува газа.

Основные выводы

1. Эрозия электродов при импульсных разрядах в воде определяется двумя воздействиями: тепловым и кавитационным.

2. Кавитационное воздействие можно существенным образом ослабить за счет вдува газа через отверстие в электроде.

3. Вдув газа позволяет использовать массивный электрод, так как пробой инициируют газовые пузыри при тех же или даже меньших величинах пробивного напряжения.

Список литературы

- [1] Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Федюкович В.Н. // ТВТ. 1996. № 5 (в печати).
- [2] Кривицкий В.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова Думка, 1986. 344 с.
- [3] Коробейников С.М., Янин Э.В. Пузырьковая модель зажигания разряда в жидкости при импульсном напряжении. Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности. Николаев, 1988. Ч. 1. С. 37–38.
- [4] Горячев В.Л., Ходаковский А.Н. Модель процесса эрозии электрода плазмотрона // Физика низкотемпературной плазмы. Материалы конференции. Петрозаводск, 1995. Ч. 2. С. 186–188.
- [5] Смирнов В.М. // УФН. 1994. Т. 164. № 7. С. 665–703.