

03;04

О роли экзотермической химической реакции при взрыве проволоки в жидкости

© В.П. Кортходжия

Институт физики им. Э.Л. Андроникашвили АН Грузии, Тбилиси
E-mail: lado@iph.hepi.edu.ge

*Поступило в Редакцию 7 февраля 2003 г.
В окончательной редакции 25 апреля 2003 г.*

Показано, что при взрыве проволоки в воде, когда имеет место экзотермическая химическая реакция, из-за выделения большого количества тепла происходит термическая ионизация продуктов реакции. Создается плотная плазма, и в системе образуется энергия порядка или больше энергии, которая была запасена в конденсаторной батарее вначале.

Электрический взрыв проволоки мощным импульсом тока — удобный инструмент для фундаментальных исследований различных физических явлений при высоких плотностях энергии. Есть много технических приложений электрического взрыва проволок, в частности, для создания импульсного давления при взрыве проволоки в жидкости [1–3], для синтеза очень мелкого — наноразмерного порошка [4] и т. п.

Поскольку взрыв проволоки в жидкости является одним из способов создания импульсного давления, необходимо выяснить, насколько этот способ является эффективным. Для этого надо определить, какая часть энергии, запасенной в конденсаторной батарее, вкладывается в разряд. С этой целью проводилось осциллографирование параметров разряда — тока и напряжения. Затем с целью определения энергии, вложенной в разряд, проводилось их численное интегрирование.

Особо следует выделить взрыв проволоки в жидкости, когда происходит химическая реакция между металлом и жидкостью, в которой произошел взрыв [3,5]. При взрыве проволоки в воде, как правило, образуются оксиды металлов и выделяется большое количество тепла — эти реакции экзотермические.

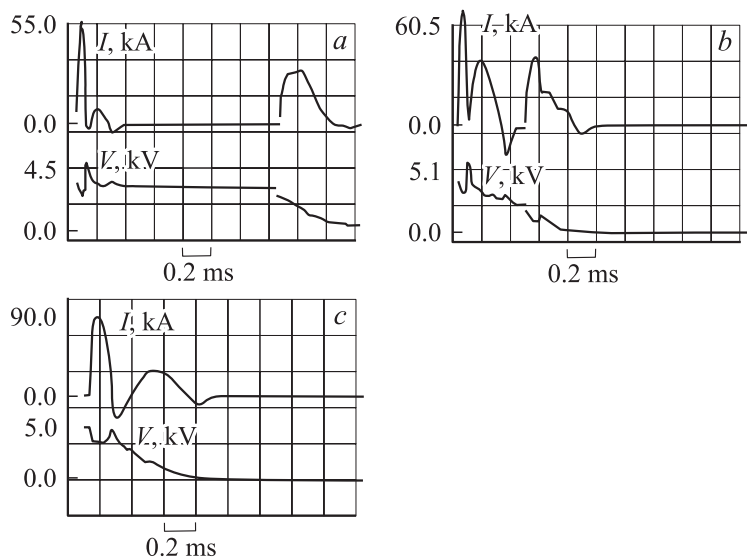
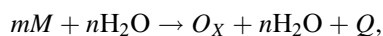


Рис. 1. Взрыв алюминия (*a, b*) и титана (*c*) в воде: *a* — $V = 4.6 \text{ kV}$, *b* — $V = 5.1 \text{ kV}$, *c* — $V = 5.0 \text{ kV}$.

В общем случае эти реакции имеют вид



где M — масса взрываемого металла, O_X — масса оксида, Q — теплота реакции.

В воде взрывались алюминиевые, титановые, танталовые, вольфрамовые, молибденовые проволоки различных диаметров, их длина 23 см. Использовался разрядник тригатронного типа [6] с графитовыми электродами [6].

На рис. 1 приведена осциллограмма тока (верхняя осциллограмма) и напряжения (нижняя осциллограмма) взрыва в воде алюминиевой (рис. 1, *a, b*) и титановой проволок (рис. 1, *c*). Из осциллограмм видно, что после прохождения тока через металл (первый левый импульс) с некоторой паузой, а иногда без паузы — это зависит от величины напряжения, до которого заряжена конденсаторная батарея, — возникает импульс тока (правый крайний импульс). Он связан с прохождением

тока в продуктах химической реакции. Можно проследить, как этот импульс тока с увеличением напряжения сдвигается влево (рис. 1, *a, b*). Причиной этого является то обстоятельство, что после химической реакции в течение некоторого времени образуется цилиндр, соосный взрывающейся проволоке. Его образование связано с тем, что часть воды вошла в химическую реакцию. Цилиндр заполнен продуктами реакции. Давление и температура в нем из-за выделения большого количества тепла экзотермической химической реакции высокие. Поэтому до тех пор пока давление не упадет до значения, при котором может быть пробита эта смесь, ток по продуктам реакции не проходит. Это хорошо видно на рис. 1, *a*.

В таблице приведены результаты численного интегрирования осциллограмм тока и напряжения. Видно, что энергия E^Σ , полученная в результате численного интегрирования осциллограмм тока и напряжения разряда, превышает энергию, запасенную в конденсаторной батарее E_0 . E_S — энергия системы, которую она приобрела после того, как произошла экзотермическая химическая реакция. Из-за выделения большого количества тепла образовавшиеся продукты реакции термически ионизируются (об этом ниже), создается плотная плазма с концентрацией порядка 10^{18} cm^{-3} . Плазма поляризуется и подзаряжает конденсаторную батарею до напряжения примерно 6 кВ. Эта энергия, как правило, превышает ту энергию, которая была запасена в конденсаторной батарее вначале. Величина $\Delta = E^\Sigma - E_0$ этого „излишка“ энергии в случае взрыва алюминиевой и титановой проволок близка к тепловой энергии экзотермических химических реакций. В случае взрыва тугоплавких металлов она больше теплот образования оксидов этих металлов, которые известны автору. Не исключено, что из-за плазмохимических реакций создаются оксиды с большими теплотами образования. Теплоты образования Q взяты из [7], q — теплота химической реакции, рассчитанная на соответствующее количество реагирующего вещества.

Дальнейший анализ осциллограмм дает возможность определить количество заряженных частиц N_i в образовавшейся плазме и оценить температуру и степень ионизации плазмы $\frac{N_i}{N}$. В таблице приведены соответствующие значения. Температура оценивалась по уравнению Саха [8].

Следует отметить некоторые особенности:

1. В случае титановой проволоки диаметром $d_0 = 2 \text{ mm}$ энергии, запасенной в конденсаторной батарее для взрыва титановой проволоки

№	Металл	Масса, g	Энергия конд. батареи E_0 , kJ	Энергия системы E_S , kJ	Теплота хим. реакции q , kJ	Результаты численного интегрирования E^Σ , kJ	$E^\Sigma - E_0$, kJ	$\frac{N_i}{N}$, 10^{-2}	Температура продуктов реакции T , 10^4 К
1.	Al	.31	16.2		19.20	23.36	7.17		
2.	Al	.31	19.9	19.0	19.20	30.37	10.6	< 0.1	
3.	Al	.31	24.7	19.6	19.20	42.00	17.55	0.1	1.0
4.	Mo	0.44	23.5	31.0	3.52	54.45	30.95	0.14	2.3
5.	W	0.613	23.5	33.95	2.76	57.45	33.95	0.244	5.0
6.	Ti	2.08	23.5		65.87	43.55	20.05		
7.	Ti	3.25	23.5		102.9	52.0	28.5		
8.	Ta	.747	23.5	25.5	8.65	46.7	23.2	0.11	0.11
9.	Ta	1.50	23.5	31.95	17.3	53.41	29.90	0.15	0.15

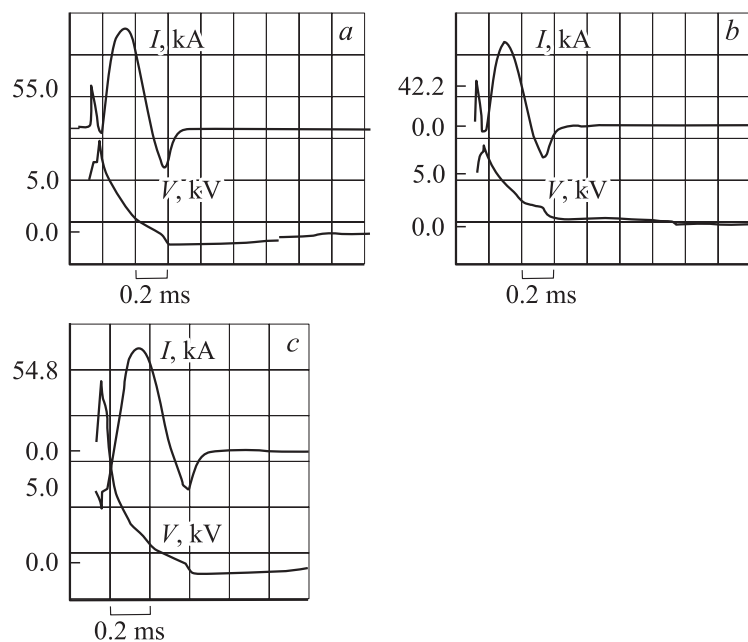


Рис. 2. *a* — Ta, $V = 5.0 \text{ kV}$; *b* — W, $V = 5.0 \text{ kV}$; *c* — Mo, $V = 5.0 \text{ kV}$.

такой массы, недостаточно, если эту энергию рассчитывать по формуле

$$Q = m[c(T_2 - T_1) + q_m + c(T_3 - T_2) + \lambda + \dots],$$

где m — масса металла, q_m — удельная теплота плавления, λ — удельная теплота парообразования, c — теплоемкость, T_1 — начальная температура, T_2 — температура плавления, T_3 — температура испарения. Взрыв происходит только потому, что титановая проволока по мере нагрева входит в химическую реакцию с водой, образуя оксиды.

2. При взрыве алюминиевой проволоки „излишек“ энергии тем больше, чем больше напряжение, до которого вначале заряжена конденсаторная батарея.

3. „Излишек“ энергии над запасенной в конденсаторной батарее энергией при взрыве танталовой, вольфрамовой, молибденовой проволок (рис. 2) не может быть объяснена теплотой образования тех оксидов

этих металлов, которые известны автору (они и указаны в таблице). Повидимому, из-за плазмохимических реакций образуются другие оксиды с большей теплотой образования.

Теперь о механизме явления. Его лучше всего пояснить на примере рис. 1, а.

На осциллограмме тока наблюдаемый левый высокий пик соответствует прохождению тока через алюминиевую проволоку. Амплитуда тока порядка 55 кА. Металл плавится, и в нем развивается магнито-гидродинамическая неустойчивость типа перетяжки [9], приводящая к разбеганию жидкого металла на отдельные участки. Это хорошо прослеживается на фотографиях, полученных с помощью сверхскоростного фоторегистратора [3]. Оставшегося после расплавления металла напряжения на разрядном промежутке недостаточно для испарения металла, поэтому ток через расплавленный металл прекращается. В момент разрушения проводника благодаря реакции электрического контура на разрядном промежутке возникает перенапряжение. Его достаточно, чтобы зажглась дуга между отдельными участками расплавленного металла, и металл испарился.

По мере нагрева алюминиевой проволоки происходит экзотермическая химическая реакция алюминия с водой



где $Q = 1672 \text{ kJ/m}$ — теплота реакции, Q — теплота химической реакции на моль реагирующего вещества.

Продукты реакции ионизируются ультрафиолетовым излучением, сопровождающим взрыв проволоки. Кроме того, происходит их термическая ионизация из-за того, что выделяется большая тепловая энергия и температура продуктов реакции высокая (порядка 10^4 K , см. таблицу). Образовавшаяся плазма, граничащая со стенкой, поляризуется. Ток разряда меняет знак, он становится отрицательным и подзаряжает конденсаторную батарею примерно до 5.0 кВ. В момент времени $t = 0.4 \text{ ms}$ напряжение на разрядном промежутке примерно 4.5 кВ, в конденсаторной батарее запасена энергия 19.0 кДж. Начиная с $t = 0.4 \text{ ms}$ до $t = 1.48 \text{ ms}$ ток равен нулю, а напряжение на конденсаторной батарее немного понижается. Через плазму из продуктов химической реакции при этом значении напряжения ток не может пройти, так как давление высокое [2,3]. С течением времени давление понижается, и начиная с $t = 1.48 \text{ ms}$ ток проходит плазму из

продуктов химической реакции. Конденсаторная батарея почти полностью разряжается. Численное интегрирование осциллограмм тока и напряжения в этой части (рис. 1, *a*) дает энергию примерно 10.6 kJ, что сопоставимо с энергией, запасенной в конденсаторной батарее — 19.0 kJ.

Как видно из осциллограмм тока и напряжения в случае взрыва тугоплавких металлов, ток по продуктам химической реакции сразу проходит. Это обусловлено тем, что, когда эти металлы испарились, т. е. к моменту времени примерно $t = 0.2$ ms, напряжение на разрядном промежутке достигло 6 kV. Этого значения напряжения достаточно, чтобы ток прошел через плотную плазму из продуктов химической реакции. Во всех случаях в осадок выпадают оксиды металлов.

При взрыве проволоки в воде, когда имеет место экзотермическая химическая реакция, выделяется большое количество тепла. В результате этого температура продуктов химической реакции высокая, происходит их термическая ионизация, создается плотная плазма из продуктов экзотермической химической реакции. Плазма поляризуется, и в системе образуется энергия, которая порядка или больше энергии, которая была запасена в конденсаторной батарее. Численное интегрирование осциллограмм тока и напряжения разряда дает значения, сопоставимые с энергией системы, которую она приобрела после взрыва проволоки.

Автор приносит благодарность проф. З. Саралидзе, В. Бережани, И. Мурусидзе за конструктивную критику и полезную дискуссию.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ G-663.

Список литературы

- [1] *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. думка, 1986. 401 с.
- [2] *Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Тактакишвили М.И.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 4. С. 41–43.
- [3] *Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 13. С. 10–14.
- [4] *Файл* <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIIIPT/en/15e-Sedoi.doc>
- [5] *Электрический взрыв проводников* / Пер. с англ. Под ред. А.А. Рухадзе и И.С. Шпигеля. М.: Мир, 1965. С. 239–259.

- [6] *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, С. 90.
- [7] *Краткая химическая энциклопедия.* М.: Сов. энциклопедия. 1961–1967. Т. 1–5.
- [8] *Чен Ф.* Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987. 206 с.
- [9] *Абрамова К.Б., Златин Н.А., Перегуд Б.П.* // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. В. 6 (12). С. 2005–2022.