

12

## Некоторые характеристики электрического взрыва цинковой проволоки

© А.В. Багазеев, Ю.А. Котов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: bagazeev@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2010 г.

Экспериментальным путем определены величины, необходимые для расчета контура электрического взрыва цинковой проволоки и выбора наиболее подходящих условий взрыва, такие как: удельное действие цинка ( $h_b = (0.70 \pm 0.15) \cdot 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}/\text{mm}^4$  в диапазоне  $2 \cdot 10^5 < j_M < 4.5 \cdot 10^5 \text{ A}/\text{mm}^2$ ) и критическая длина проволоки ( $\lambda_{cr} = 1.8 \cdot 10^3 (\epsilon \nu \cdot 10^{-6})^{0.56}$ ).

Явление электрического взрыва проволоки (ЭВП) заключается во взрывном разрушении при пропускании по ней электрического тока большой плотности ( $10^4 - 10^6 \text{ A}/\text{mm}^2$ ). Разнообразие проявлений ЭВП (вспышка, ударная волна, диспергирование металла и др.) обусловили его использование в различных технических приложениях. В последнее время активно развивается основанный на ЭВП метод получения нанопорошков металлов, сплавов и их химических соединений [1].

Как для изучения фундаментальных характеристик, так и для конкретных приложений ЭВП требуются расчет контура взрыва и выбор наиболее подходящих условий, для чего, в свою очередь, необходимо знать такие характеристики, как удельное действие (термическая стойкость металла при ЭВП) и критическая длина проволоки.

В исследованиях ЭВП понятие удельного действия было введено в работах [2,3], где его определили как

$$h_b = \int_{t_0}^{t_b} \frac{i^2(t)}{S^2} dt, \quad (1)$$

Некоторые характеристики металлов

Металл	$h_b, 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}/\text{mm}^4$	$a \cdot 10^{-3}$	$\beta$
Cu	1.95	1.35	0.36
	2.107		
Al	1.97*	2	0.36
	1.09		
	0.93*		
Ag	1.04*	1.5	0.36
Au	0.523	—	—
Ni	0.732	—	—
	0.75*		
Fe	0.506	—	—
Pt	0.945	—	—
W	0.8*	—	—

*Примечание.* \* — величины определены при плотностях тока в момент его максимума  $j_M \approx 10^5 \text{ A}/\text{mm}^2$ .

где  $i(t)$  — текущее значение тока (А),  $t$  — время (с),  $t_b$  — момент взрыва, за который принимается начало потери проволокой металлической проводимости (с),  $S$  — сечение проволоки ( $\text{mm}^2$ ).

Удобство его использования в расчетах определяется тем, что для большинства металлов удельное действие изменяется слабо по сравнению с введенной энергией в широкой области изменения скорости ввода энергии в металл [4]. Величина  $h_b$  для некоторых металлов была определена в [2,3,5–7] и приведена в таблице.

Зная  $h_b$ , можно найти энергию  $W$ , поглощаемую материалом проволоки при взрыве с паузой тока [1]:

$$W = (h_b W_0 S^2 Z)^{0.5}, \quad (2)$$

где  $W_0 = U_0^2 C / 2$  — энергия, запасенная в батарее конденсаторов с емкостью  $C$ , заряженной до напряжения  $U_0$ ;  $Z = (L/C)^{0.5}$  — волновое сопротивление контура с индуктивностью  $L$ .

Видно, что при

$$W_0 = h_b S^2 Z \quad (3)$$

введенная энергия  $W \approx W_0$ .

Из (3) следует, что можно подобрать диаметр проволоки и параметры контура такими, чтобы вся энергия, запасенная в батарее конденсаторов, за исключением потерь в разрядном контуре, выделялась в материале проволоки („согласованный режим ЭВП“).

При проведении исследований ЭВП возникает потребность в определении условий, при которых режим с паузой тока — временем от момента окончания взрыва до начала дугового разряда через столб расширяющихся продуктов взрыва (объемный разряд) — переходит в режим с разрядом по его поверхности (взрыв с нулевой паузой тока). Это позволяет оценить максимально возможный перегрев материала проволоки в имеющемся контуре, определяемый как отношение введенной в проволоку энергии к энергии сублимации материала, или выбрать необходимые параметры контура для обеспечения необходимого перегрева. В [8] с помощью критериев подобия и первичных параметров контура и взрывающейся проволоки был определен параметр  $\lambda_{cr}$  (критический), связанный с длиной проволоки  $l$  как  $\lambda = l/(d^2\sqrt{LC})$  ( $\text{mm}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ ), при котором пауза тока равна нулю:

$$\lambda_{cr} = a(\varepsilon v \cdot 10^{-6})^\beta, \quad (4)$$

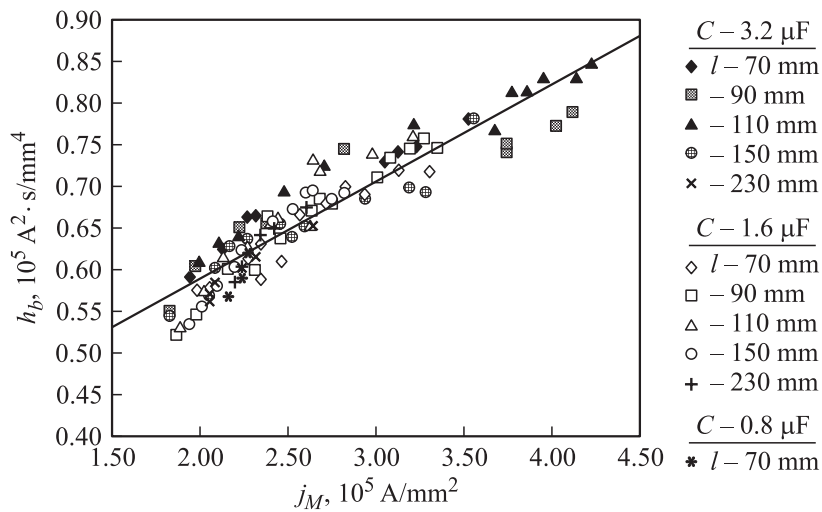
где  $\varepsilon = (CU_0^2)/(d^4\sqrt{LC})$  ( $\text{J}/\text{mm}^4 \cdot \Omega$ ),  $v = (\sqrt{LC})/d$  ( $\text{s}/\text{mm}$ ),  $d$  — диаметр проволоки ( $\text{mm}$ ),  $a$  и  $\beta$  зависят от материала проводника.

Значения  $a$  и  $\beta$  для исследованных на данный момент материалов (Cu, Al, Ag) [8,9] приведены в таблице. В настоящий момент отсутствуют данные по удельному действию и критической длине проволоки для цинка. Нахождению этих параметров посвящена данная работа.

Эксперименты проводились на установке с батареями конденсаторов емкостью 0.4–3.2  $\mu\text{F}$  при значениях индуктивности контура 0.4–1.4  $\mu\text{H}$ . Взрывы осуществлялись в воздухе при атмосферном давлении. Энергия, введенная в проволоку, определялась по осциллограммам тока, согласно [10].

Диаметр проволоки  $d = 0.38 \text{ mm}$  оставался постоянным, длина проволоки  $l$  изменялась от 70 до 230  $\text{mm}$ , а напряжение  $U_0$  — от 12 до 35  $\text{kV}$ .

Полученные данные по удельному действию Zn приведены на рис. 1. Видно, что величина  $h_b$  изменяется пропорционально максимальной плотности тока  $j_M$ . В исследованной области параметров с погрешно-



**Рис. 1.** Зависимость удельного действия для Zn от максимальной плотности тока в проволоке при разных значениях емкости конденсаторной батареи и длины проволоки.

стью  $10\% h_b$  определяется уравнением:

$$h_b (\text{A}^2\text{s}/\text{mm}) = 0.36 \cdot 10^5 + 0.12 j_M (\text{A}/\text{mm}^2), \quad (5)$$

где  $j_M$  изменяется от  $2 \cdot 10^5$  до  $4.5 \cdot 10^5 \text{ A}/\text{mm}^2$ .

Для оценочных расчетов энергии  $h_b$  цинка можно принять постоянным, равным среднему значению  $(0.70 \pm 0.15) \cdot 10^5 \text{ A}^2\text{s}/\text{mm}^4$ .

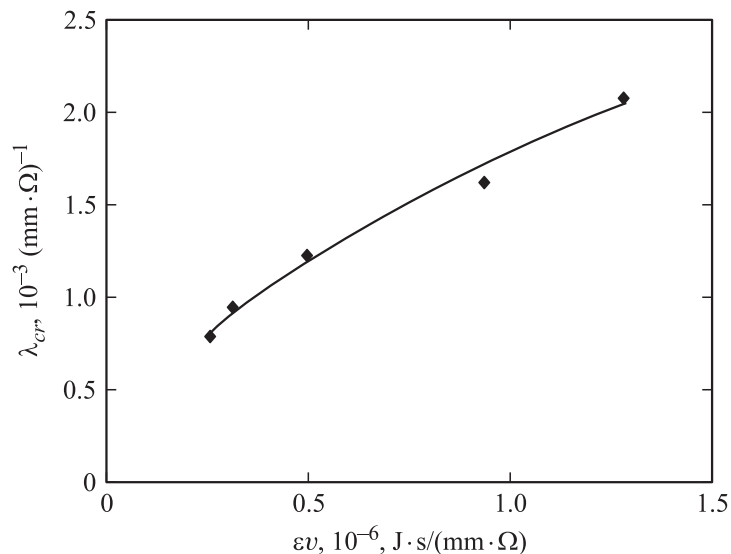
Нами было получено пять точек по критической длине (рис. 2) в диапазоне произведения  $\epsilon\nu = (0.06-1.3) \cdot 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{s}/(\text{mm} \cdot \Omega)$ . Полученные точки с погрешностью  $\pm 7\%$  описываются уравнением

$$\lambda_{cr} = 1.8 \cdot 10^3 (\epsilon\nu \cdot 10^{-6})^{0.56}, \quad (6)$$

что отличается от полученного ранее для Cu, Al и Ag (см. таблицу) как коэффициентом  $a$ , так и показателем степени  $\beta$ .

Таким образом, в данной работе определено:

— удельное действие Zn при электрическом взрыве цинковой проволоки  $h_b = (0.70 \pm 0.15) \cdot 10^5 \text{ A}^2 \text{ s}/\text{mm}^4$  в диапазоне  $2 \cdot 10^5 < j_M < 4.5 \cdot 10^5 \text{ A}/\text{mm}^2$ ,



**Рис. 2.** Зависимость критической длины проволоки от произведения  $\epsilon v$ .

— параметры  $a$  и  $\beta$  в уравнении для критической длины цинковой проволоки равны  $1.8 \cdot 10^3$  и  $0.56$  соответственно.

Полученные результаты могут быть использованы при расчете контура взрыва для получения нанодисперсных порошков цинка и его химических соединений методом ЭВП и в других приложениях.

Работа выполнялась в рамках и при финансовой поддержке программы президиума РАН.

## Список литературы

- [1] Kotov Yu.A. // J. Nanoparticle Research. 2003. V. 5 (5–6). P. 539–550.
- [2] Anderson G.W., Neilson F.W. // Exploding Wires. V. 1 Proc. of 1<sup>st</sup> Conf. on the Exploding Wire Phenomenon. Boston. USA. 24–27 March, 1959. New York: Plenum Press, 1959. P. 97–103.

- [3] *Snare E.C., Neilson F.W.* // Exploding Wires. V. 1 Proc. of 1<sup>st</sup> Conf. on the Exploding Wire Phenomenon. Boston, USA. 24–27 March, 1959. New York: Plenum Press, 1959. P. 83–96.
- [4] *Чемезова Л.И.* // Дис. . . . канд. техн. наук. Томск, 1987.
- [5] *Snare E.C.* // J. Appl. Phys. 1966. V. 32. P. 1043–1044;
- [6] *Kotov Yu.A., Samatov O.M., Sedoi V.S.* et al. // Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Megagauss Fields and Pulsed Power Systems. Novosibirsk, Russia. 3–7 July, 1989. New York: Nova Science Pub. 1990. P. 497–502.
- [7] *Tucker T.J., Neilson F.W.* // Exploding wires. V.1. Proc. of 1<sup>st</sup> Conf. on the Exploding Wire Phenomenon. Boston, USA. 24–27 March, 1959. New York: Plenum Press. 1959. P. 73–81;
- [8] *Азаркевич Е.И., Котов Ю.А., Седой В.С.* // ЖТФ. 1975. Т. 45. В. 1. С. 175–177.
- [9] *Котов Ю.А., Седой В.С., Чемезова Л.И.* // Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Сборник. Новосибирск: Наука, 1976. С. 61–69.
- [10] *Кварцхава И.Ф., Бондаренко В.В., Плутто А.А.* и др. // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. В. 5 (11).