

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИНХРОННОСТИ/НЕСИНХРОННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ДВУХ  
ПРОВОЛОК ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**К.В. Сулиз, А.В. Первиков

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Первиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: konstantin.suliz@gmail.com

**DETERMINATION SYNCHRONOUS/ASYNCHRONOUS ELECTRIC EXPLOSION TWO WIRES OF  
DISSIMILAR METALS**K.V. Suliz, A.V. Pervikov

Scientific Supervisor: Ph.D. A.V. Pervikov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: konstantin.suliz@gmail.com

***Abstract.** In this article, we present the results of the research into the characteristics of the conditions of heating and explosive destruction of Fe-Cu wires under a pulse of current.*

**Введение.** Результаты фундаментальных и прикладных исследований свидетельствуют о перспективности использования биметаллических наночастиц в материаловедении, медицине, катализе. Биметаллические наночастицы могут быть получены различными методами. Одним из таких методов является электрический взрыв проводников (ЭВП). Анализ литературных данных показывает, что при электрическом взрыве проволок из разных металлов, за различные временные интервалы в проволоки могут быть введены различные энергии. Это может привести к тому, что проволоки будут взрываться не одновременно (несинхронный взрыв проволок), препятствуя формированию наночастиц сплавов.

**Методы исследования.** В работе было проведено исследование влияния электропроводности, теплоемкости металла, а так же диаметра проволоки на временные характеристики процесса ЭВП меди и железа. В таблице 1 приведены параметры экспериментов.

Таблица 1

Параметры экспериментов

Образцы	Металлы	$d_0$ , мм	$l$ , мм	$U_0$ , кВ	$C$ , мкФ	Группа	Среда, $10^5$ Па
	Cu	0,30	80	29	2	I	Воздух
	Fe	0,30	80	29	2	II	Воздух
Cu-Fe	Cu	0,20	80	29	2	I	Воздух
	Fe	0,30				II	
Cu-Fe	Cu	0,14	80	29	2	I	Воздух
	Fe	0,23				II	

**Полученные результаты.** На рисунке 1 представлены временные зависимости токов меди и железа при одиночном взрыве проволок.

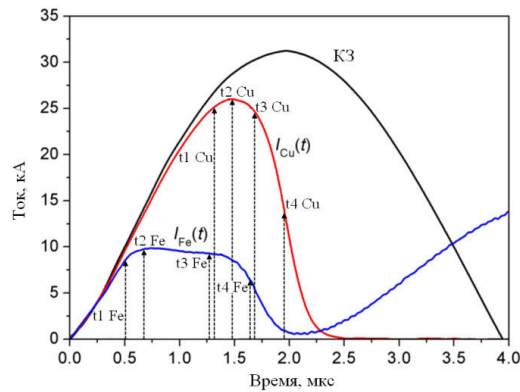


Рис. 1. Временные зависимости токов при одиночном взрыве проволок меди и железа

Анализ временных зависимостей токов позволяет выделить времена, характеризующие фазовые переходы проволок [1, 2]: 0 ... t<sub>1</sub> – нагрев проводника в твердом состоянии; t<sub>1</sub> ... t<sub>2</sub> – плавление проводника; t<sub>2</sub> ... t<sub>3</sub> – нагрев проводника в жидком состоянии; t<sub>3</sub>... t<sub>4</sub> – интенсивное расширение проводника; t<sub>4</sub> – взрыв проводника.

При ЭВП металлов I группы или металлов II группы, проволоки нагреваются в жидком состоянии примерно в одном временном интервале (от t<sub>2</sub> до t<sub>3</sub>). Опираясь на это, был введен безразмерный коэффициент, который равен отношению времени нагрева от момента плавления до начальной точки электрического взрыва каждого проводника:

$$k_1 = \frac{t_{1\text{ MeA}}}{t_{1\text{ MeB}}};$$

Из закона Джоуля-Ленца, через энергию можно выразить время:

$$W = \frac{U^2}{R} \cdot t \rightarrow t = \frac{W \cdot R}{U^2};$$

Энергия характеризуется теплоемкостью металла, массой проволоки и разницей температур кипения и плавления металла. Масса в свою очередь характеризуется плотностью металла. Сопротивление характеризуется удельным электрическим сопротивлением. Учитывая равенство длин проводников, коэффициент можно записать следующим образом:

$$k_1 = \frac{c_{\text{MeA}} \cdot \gamma_{\text{MeA}} \cdot \rho_{\text{MeA}} \cdot (T_{\text{ëë}} \text{ MeA} - T_{\text{ĩëää}} \text{ MeA})}{c_{\text{MeB}} \cdot \gamma_{\text{MeB}} \cdot \rho_{\text{MeB}} \cdot (T_{\text{ëë}} \text{ MeB} - T_{\text{ĩëää}} \text{ MeB})} \quad (1)$$

Здесь *c* – удельная теплоемкость металла; *γ* – плотность металла; *ρ* – удельное электрическое сопротивление металла; T<sub>ëë</sub>, T<sub>ĩëää</sub> – температуры кипения и плавления соответственно.

Но данный критерий не отображает зависимости от диаметров проводников, поэтому судить о синхронности взрыва только по этому параметру нельзя. При ЭВП на стадии нагрева проволок в твердом состоянии (от 0 до t<sub>1</sub>) токи, протекающие через каждую проволоку, одинаковые. На основании этого был введен ещё один безразмерный коэффициент, равный отношению времени нагрева проволок в твердом состоянии:

$$k_s = \frac{t_{s\text{ MeA}}}{t_{s\text{ MeB}}};$$

Из закона Джоуля-Ленца, через энергию можно выразить время:

$$W = I^2 \cdot R \cdot t;$$

Аналогично  $k_l$ , получено выражение для  $k_s$ :

$$k_s = \frac{c_{MeA} \cdot \gamma_{MeA} \cdot \rho_{MeB} \cdot (T_{\text{эв}}^{\text{MeA}} - T_{300})}{c_{MeB} \cdot \gamma_{MeB} \cdot \rho_{MeA} \cdot (T_{\text{эв}}^{\text{MeB}} - T_{300})} \cdot \left( \frac{r_{MeA}}{r_{MeB}} \right)^4 \quad (2)$$

Здесь  $r$  – радиус взрываемой проволоки;  $T_{300} = 300 \text{ K}$  – начальная температура взрыва.

На рисунке 2 представлены временные зависимости токов при совместном взрыве скрученных проволок меди и железа, при разных диаметрах.

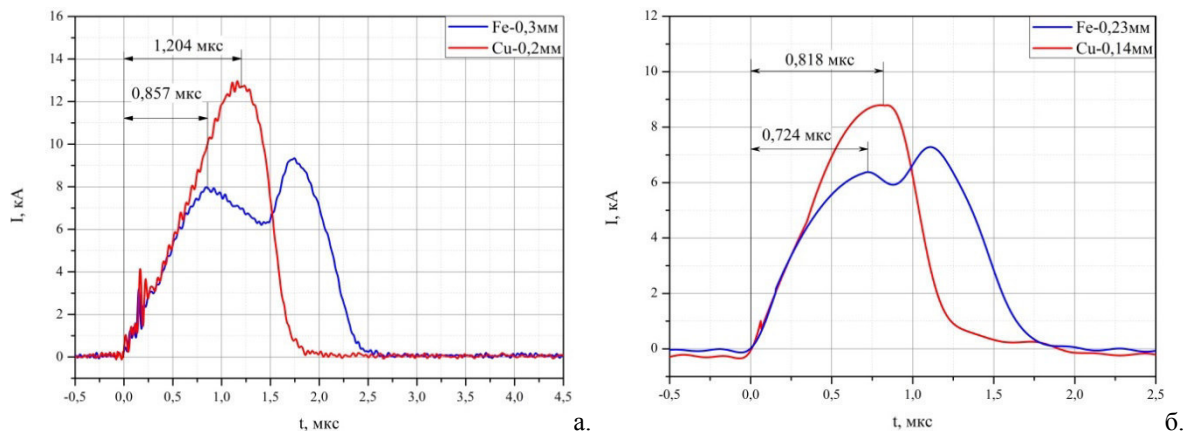


Рис.2 Временные зависимости токов при совместном взрыве скрученных проволок меди и железа:

а. Cu-Fe 0,20/0,30; б. Cu-Fe 0,14/0,23

Для исследуемых пар металлов рассчитаны коэффициенты по полученным данным и по выведенным формулам (1) и (2). Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Полученные результаты

Металлы	$k_l$	$k_l$	$k_s$	$k_s$
	экспериментальный	теоретический	экспериментальный	теоретический
Cu-Fe 0,20/0,30	2,88	7,96	1,41	1,44
Cu-Fe 0,14/0,23	1,91	7,96	1,13	1,00

**Заключение.** Применяя в совокупности полученных коэффициенты (1) и (2), можно качественно прогнозировать какой тип взрыва (синхронный/несинхронный) будет реализовываться при электрическом взрыве двух переплетенных проволок из разнородных металлов.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ No. 17-19-01319.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Webb F.H., Hilton H.H., Levine P.H., Tollestrup A.V. (1962) The Electrical and Optical Properties of Rapidly Exploded Wires. In: Chace W.G., Moore H.K. (eds) Exploding Wires. Springer, Boston, MA.
2. A. Pervikov, E. Glazkova, M. Lerner Energy characteristics of the electrical explosion of two intertwined wires made of dissimilar metals, Phys. Plasmas V. 25, (2018) 070701.