

Загальні питання

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер, Р.А. Шаров, Л.В. Литвиненко

Одесская национальная морская академия, факультет Военно-Морских Сил, Одеса

ОСОБЕННОСТИ ЭТАПА НАГРЕВА ЭЛЕКТРОВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОДНИКОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

В работе рассматривается возможность варьирования длительностью существования этапа нагрева и плавления металлических проводников при реализации механизма быстрого электрического взрыва.

Ключевые слова: электровзрывающийся проводник, этапы быстрого электрического взрыва, спиральный взрывомагнитный генератор, легкоплавкие и тугоплавкие проводники.

Введение

Стремительное развитие систем критического назначения выводит на первый план вопросы создания коммутаторов и ограничителей, обладающих максимально возможным временем срабатывания. В этом отношении наиболее перспективным является реализация механизма быстрого электрического взрыва проводников [1].

Анализ исследований, проведенных в работах [1 – 5], показал, что основным условием для формирования данного механизма является соотношение времени ввода энергии от импульсного источника питания к электровзрывающемуся проводнику (ЭВП) и интервала времени возникновения гидродинамических неоднородных участков. В этом случае ЭВП резко расширяется, не успев деформироваться, теряет проводимость и превращается в золь [2 – 5]. В стадии потери проводимости ЭВП разбивается на поперечные слои конденсированного металла и участки низкой плотности между ними (микроразрывы).

Структурно данный механизм можно разделить на несколько этапов. Первый этап характеризуется началом нагрева проводника при вводе в систему больших плотностей тока. На данном этапе происходит нагрев проводника, вплоть до его перехода в жидкое состояние. На втором этапе сопротивление ЭВП начинает резко возрастать, сохраняя металлический характер до момента времени t^{**} . Кроме того, при $t = t^*$ ЭВП начинает быстро расширяться, так что вблизи момента t^{**} металл оказывается превратившимся в мелкодисперсную массу (золь) с размером частиц меньше 1000 \AA (третий этап) [2 – 5].

Наибольший вклад в определение времени реализации механизма быстрого электрического взрыва оказывает именно первый этап. Поэтому **целью данной работы является** определение факторов, влияющих на длительность этапа нагрева и плавления электровзрывающихся проводников.

Основной материал

В качестве импульсного источника питания, выберем спиральный взрывомагнитный генератор (СВМГ), принцип действия которого показан в работах [6, 7]. Для выбранного генератора закон изменения тока на первом этапе электрического взрыва проводника можно записать, учитывая результаты исследований, проведенных в работах [6, 7]:

$$i_{\text{л}}(t) = I_2 R_{\text{ЭВП}} \frac{3d^2}{\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{ср}} / l^*)} \times \left[2 \cdot \operatorname{arctgh} \left[\frac{mD(-2Dt)}{\sqrt{mD^2(m - 4B(t))}} \right] \times \frac{\times (2 \cdot B(t) \cdot D - m \cdot \cdot D)}{2D \sqrt{mD^2(m - 4B(t))}} - \ln \left[\frac{m}{M} \left(-Dt - \frac{B(t)}{m} + \frac{D^2 t^2}{m} \right) \right] / 2D \right], \quad (1)$$

где I_2 – постоянный ток, протекающий в контуре до подрыва взрывчатого вещества (ВВ) в СВМГ; $R_{\text{ЭВП}}$ – активное сопротивление ЭВП до начала плавления (первый этап); d – диаметр проволоки соленоида; r_1 и r_2 – радиусы витков соленоида в начале и в конце спирали СВМГ соответственно, $l^* = d \cdot N^* + kN^*$ – первоначальная длина соленоида СВМГ; N^* – первоначальное количество витков соленоида СВМГ; k – расстояние между витками СВМГ, $K(r_{\text{ср}} / l^*)$ – поправочный множитель; r_0 – начальный радиус заряда, m – масса ВВ, M – масса расширяющегося элемента СВМГ (лайнера); D – скорость детонации;

$$B(t) = 2Mr_0 \cdot \sqrt{16 + 2mD^2 t^2 / (Mr_0^2)} \cdot (r_1 - r_2) / (l^* - d).$$

Основываясь на (1) и предполагая, что первый этап существует на интервале времени $\tau \leq t < t^*$;

$$B(t) \ll ml^* ; D^2 t^2 / l^* \gg B(t) / m \ll Dt ,$$

запишем выражение для энергии, передаваемой от СВМГ электровзрывающемуся проводнику:

$$W_{ЭВП} = \left[\frac{9 \cdot I_2^2 \cdot R_{ЭВП}^3 \cdot d^4}{\mu_0^2 \cdot \pi^2 \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2)^2 \cdot K^2 (r_{ср} / l^*)} \right] \times \left[\tau \cdot \ln \left(\frac{m \cdot D \cdot \tau}{M \cdot l^*} \right) \times \left(\frac{\pi}{2} - \ln \left(\frac{m \cdot D \cdot \tau}{M \cdot l^*} \right) + 2 \right) + 4,186 \cdot (t^* - \tau) - \left[t^* \cdot \ln \left(\frac{m \cdot D \cdot t^*}{M \cdot l^*} \right) \times \left(\frac{\pi}{2} - \ln \left(\frac{m \cdot D \cdot t^*}{M \cdot l^*} \right) + 2 \right) \right] \right] \quad (2)$$

где τ – длительность переходного процесса, возникающего при подключении источника питания к СВМГ; при t^* – время начала расширения ЭВП (время окончания первого этапа). Выражение (2) получено при условии, что на первом этапе электрического взрыва выполняется условие:

$$R_{ЭВП} = \text{const} \quad \text{при} \quad \tau \leq t < t^* . \quad (3)$$

На рис. 1 представлены графические зависимости температуры нагрева ЭВП на первом этапе от времени работы СВМГ.

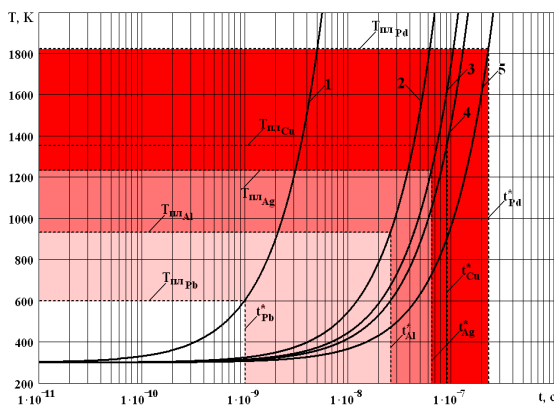


Рис. 1. Зависимости температуры нагрева проводника от времени работы ВМГ для различных материалов ЭВП: 1 – свинец (Pb), 2 – алюминий (Al), 3 – серебро (Ag), 4 – медь (Cu), 5 – палладий (Pd)

Данные зависимости получены для различных материалов ЭВП, обладающих одинаковыми конструктивными характеристиками (длина и диаметр каждого проводника составляли 0,3 м и $0,1 \cdot 10^{-3}$ м соответственно), при которых исключается влияние микроскопических неоднородностей в металле [2 – 5].

Параметры СВМГ выбирались из условия, что плотность ввода тока в ЭВП составляла

$$j \approx 10^8 \text{ А/см}^2 \text{ [2].}$$

Зависимости, представленные на рис. 1, показывают, что варьируя материал проводника, можно

изменять длительность первого этапа электрического взрыва, зависящего от времени достижения температуры плавления ЭВП ($T_{пл}$). Кроме выбора материала проводника, длительность первого этапа можно варьировать, изменяя площадь сечения ЭВП.

На рис. 2 и 3 приведены графические зависимости, характеризующие нагрев свинцовых и палладиевых проводников различного сечения.

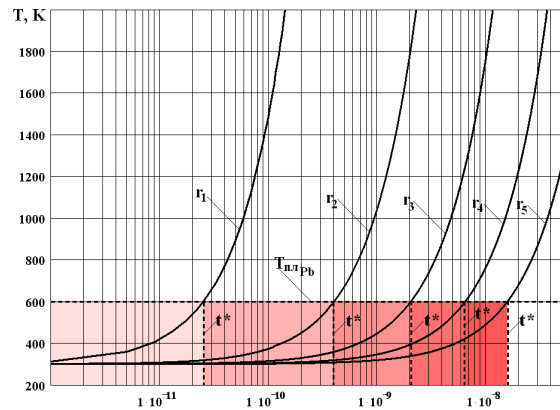


Рис. 2. Зависимости температуры нагрева свинцовых ЭВП различного радиуса от времени работы ВМГ: $r_1 = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м, $r_2 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ м, $r_3 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м, $r_4 = 0,08 \cdot 10^{-3}$ м, $r_5 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

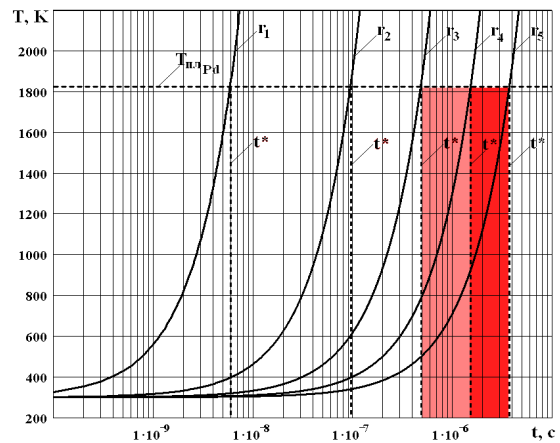


Рис. 3. Зависимости температуры нагрева палладиевых ЭВП различного радиуса от времени работы ВМГ: $r_1 = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м, $r_2 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ м, $r_3 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м, $r_4 = 0,08 \cdot 10^{-3}$ м, $r_5 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

Выводы

Варьируя материалом ЭВП, можно изменять длительность первого этапа электрического взрыва от наименьших значений у легкоплавких металлов ($T_{плPb} = 600 \text{ К}$, $t^* \approx 1,1 \text{ нс}$), до наибольших у тугоплавких ($T_{плPd} = 1825 \text{ К}$, $t^* \approx 0,23 \text{ мкс}$).

При неизменном выборе материала ЭВП, путем варьирования площадью сечения, можно менять в определенных пределах длительность первого этапа электрического взрыва, как для легкоплавких

($2,7 \cdot 10^{-11} \leq t^* \leq 1,8 \cdot 10^{-8}$), так и для тугоплавких ($6 \cdot 10^{-9} \leq t^* \leq 3,8 \cdot 10^{-6}$) металлов.

Выбор площади сечения ЭВП будет ограничен предельным значением радиуса $r_0 \leq 0,1$ мм, превышение которого будет приводить к появлению микроскопических неоднородностей на первом этапе электрического взрыва [1 – 4].

Длина электровзрывающегося проводника из-за металлического характера проводимости электровзрывающегося проводника на первом этапе, будет оказывать влияние только при достаточно высоких значениях (сотни метров).

Список литературы

1. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В.А. Бурцев, И.В. Калинин, А.В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 342 с.
2. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволок. Ч. 1 Основные процессы электрического взрыва проводников в вакууме / Г.В. Иваненков, С.А. Пикуз и др. – М.: РФЯЦ ВНИИТФ им. Забабахина, 2004. – 26 с.
3. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволок.

Ч. 2 Физические свойства вещества с высокой плотностью энергии в разрядах через металлические проволочки / Г.В. Иваненков, С.А. Пикуз, Т.А. Шелковенко и др. – М.: РФЯЦ ВНИИТФ им. Забабахина, 2004. – 30 с.

4. Расчеты и эксперименты по наносекундному электрическому взрыву тонких проволок / Р.Б. Бакиит, И.М. Дацко и др. // Физика плазмы. – 1983. – Т. 9, вып. 6. – С. 1224-1230.

5. Осциллографическое определение энергии электрического взрыва проволок / И.Ф. Кварцхава, В.В. Бондаренко, А.П. Плюпто, А.А. Чернов // Журн. exper. и теор. физ. – 1956. – Т. 31, вып. 5 (11). – С. 745-751.

6. Особенности генерирования мощных электромагнитных помех спиральным взрывомагнитным генератором / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко, А.И. Харланов, Ю.М. Бусьяк // Системи обробки інформації. – X.: ХУПС, 2009. – Вип. 4 (78). – С. 86-90.

7. Кучер Д.Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора / Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова // Збірник наукових праць Академії ВМС імені П.С. Нахімова. - Севастополь. АВМС імені П.С. Нахімова. – 2012. – Вип. 1(9). – С. 130-135.

Поступила в редколлегию 11.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ОСОБЛИВОСТІ ЕТАПА НАГРІВУ ЕЛЕКТРОВИБУХОВИХ ПРОВІДНИКІВ ІМПУЛЬСНИМИ СТРУМАМИ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

Д.Б. Кучер, Р.А. Шаров, Л.В. Литвиненко

В роботі розглядається можливість варіювання тривалістю існування етапу нагріву та плавлення металічних провідників при реалізації механізму швидкого електричного вибуху.

Ключові слова: електровибуховий провідник, етапи швидкого електричного вибуху, спіральний вибухомагнітний генератор, легкоплавкі та тугоплавкі провідники.

THE FEATURES OF ELECTRICAL EXPLOSION CONDUCTORS HEATING STEP PULSE CURRENTS HIGH DENSITY

D.B. Kucher, R.A. Sharov, L.V. Litvinenko

The possibility of varying the length of the existence of heating and melting of metallic conductors stages in the implementation of the rapid electrical explosion mechanism is presented in this work.

Keywords: electrical explosion conductor, stages of rapid electrical explosion, spiral explosion generator, easily and hardly melting conductors.