

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ

Ю. А. КОТОВ, М. А. МЕЛЬНИКОВ, В. В. НИКИТИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института высоких напряжений при ТПИ).

Возрастание интереса к явлению взрыва проводников в последние годы объясняется возможностью использования его как для практических целей: источники света с яркостной температурой до 60000°K , источник ударных волн, высоковольтные предохранители, получение больших электронных токов эмиссии и т. д., — так и возможностью изучения поведения металла при динамическом достижении в нем большой плотности энергии.

Качественно показано, что характер процессов, возникающих при прохождении через проволочку импульса тока большой величины, но не вызывающего ее взрыва [1, 2], или характер процессов после взрыва проволочки: длительность «паузы тока» [3—5], интенсивность расширения канала паров [5—7], достигаемые температуры и плотности энергии [8—10], — определяется, с одной стороны, достигнутой плотностью тока, а с другой — временем сообщения проволочке энергии.

Другими словами, характер поведения металлического проводника после прохождения через него импульса тока определяется величиной объемной плотности энергии, достигнутой в нем.

Настоящая работа посвящена изучению характера зависимости максимальной плотности тока и времени взрыва проволочек от начального напряжения источника энергии и параметров самой проволочки: материала и геометрических размеров. Полученные результаты сопоставляются с данными других авторов.

Методика эксперимента описана в [11]. Параметры разрядного контура: $C = 1,2 \text{ мкф}$, $L_k = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ гн}$ — без учета индуктивности проволочки, которая определялась расчетом. Напряжение на конденсаторе (V_0) изменялось от значений, при которых наблюдался характерный взрыв проволочки, до 15 кВ. Исследовались медные, константановые и нихромовые проволочки длиной от 6,5 до 35 мм и диаметром: медь — $d = 0,06 - 0,15 \text{ мм}$, нихромовые — 0,1 мм, константановые — 0,09 мм.

За время взрыва проволочки мы принимаем время от момента включения тока до полного его обрыва после первого импульса (рис. 1, а).

В том случае, когда «пауза тока» отсутствовала, время взрыва определялось из осциллограммы тока экстраполяцией кривой тока к нулевому значению, как это показано на рис. 1, б.

Одновременно с осциллографированием тока и напряжения нами проводилась непрерывная фоторегистрация теневой картины взрывающейся проволоочки [11]. Здесь мы не обсуждаем результаты обработки теневой съемки. Укажем только, что по нашей классификации время взрыва (T_v) состоит из трех характерных частей:

1. Время (T_1) до начала медленного расширения паров проволоочки. Это время от момента включения тока до появления ступеньки в осциллограмме напряжения для медных (рис. 1) и константовых проволоочек. У нихромовых проволоочек начало расширения паров проявляется перегибом в осциллограмме тока.

2. Время (T_2) медленного расширения паров проволоочки без образования ударной волны, при наличии твердого керна из материала проволоочки внутри канала паров. Это время заканчивается, когда напряжение начинает резко возрастать (начало пика напряжения).

3. Время (T_3) бурного расширения паров проволоочки — от начала пика напряжения до образования «паузы тока».

Подобная классификация проведена авторами [12], но они объединяют T_1 и T_2 , хотя эти моменты четко фиксируются на осциллограммах и фоторазвертках процесса взрыва.

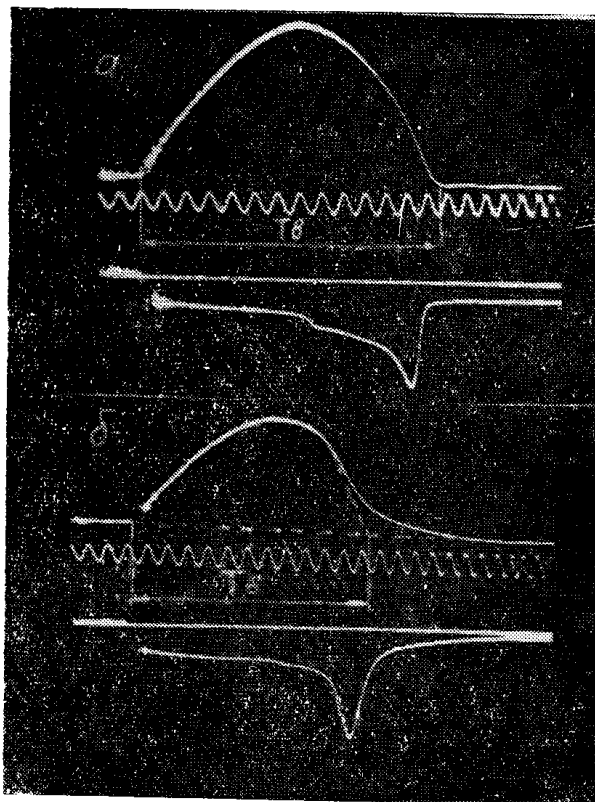


Рис. 1. Осциллограммы тока (вверху) и напряжения при взрыве медной проволоочки $d=0,12$ м: а — отсчет времени взрыва при наличии «паузы тока», $V_0=5$ кВ; $l=20$ мм; б — отсчет времени взрыва при отсутствии «паузы тока», $V_0=7$ кВ; $l=10$ мм

Результаты и их обсуждение

Исследование времени первого импульса проводилось в работах [13, 14], с которыми мы и сопоставляем данные наших экспериментов. Следует заметить, что в [13] исследовалось время до начала бурного расширения паров, т. е. $T_1 + T_2$. Это время, конечно, не соответствует времени получения всей энергии материалом проволоочки, однако сравнение с полученными в [13] данными полезно.

Зависимость T_v от поперечного сечения S проволоочки (рис. 2, кривые 1, 2, 3) показывает, что, хотя в наших экспериментах исследовались проволоочки меньших сечений, при больших в 1,8 раза (при равных V_0) скоростях ввода энергии, чем в [13] (там $d=0,13-0,35$ мм, $l=15-60$ мм, $L_k=0,5 \cdot 10^{-6}$ гн, $V_0=10$ кВ = const) и меньших, чем в [14], длинах при той же скорости ввода энергии (в [14] $d=0,08-1,16$ мм, $l=71$ и 151 мм, $L_k=0,3 \cdot 10^{-6}$ гн, $V_0=10-20$ кВ), характер кривых $T_v=f(S)$ остается тем же, а именно: время взрыва возрастает линейно сечению проволоочки. С ростом V_0 уменьшается наклон $T_v=f(S)$.

Сравнение с данными [13] показывает также, что если экстраполяция $T_b = f(S)$ к нулевому значению S в [13] (там $T_b = T_1 + T_2$) дает $T_b = 0$, то у нас — различное T_b , уменьшающееся с ростом V_0 . Из этого следует, что время бурного расширения T_3 должно быть также линейно S , а наклон $T_3 = F(S)$ должен уменьшаться с ростом V_0 .

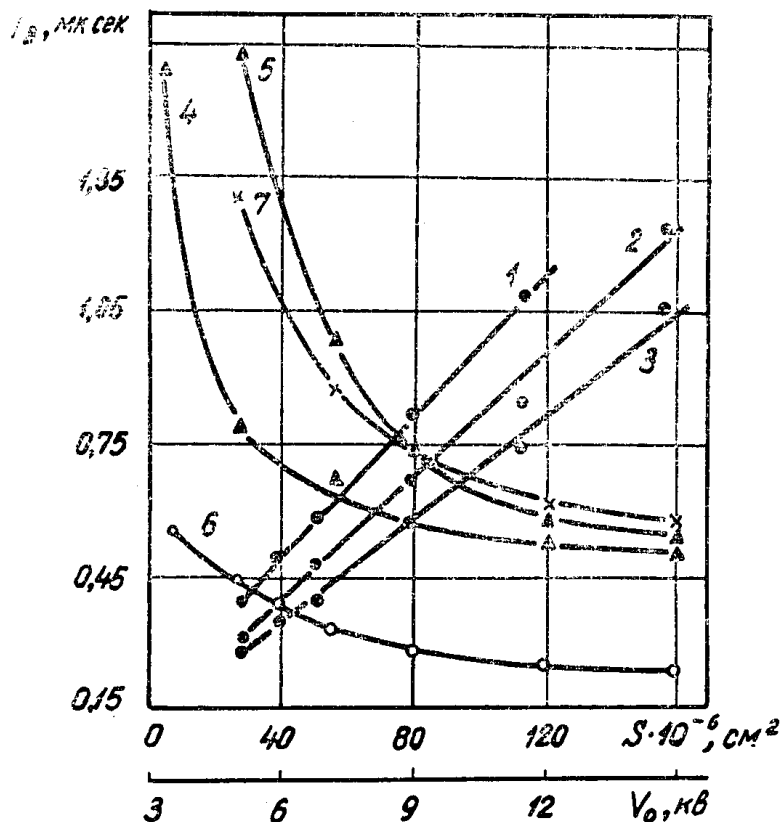


Рис. 2. Зависимость времени взрыва от сечения проволоочки (кривые 1-3) и от начального напряжения конденсатора (кривые 4-7): 1 — медь, $l = 10$ мм, $V_0 = 5$ кВ; 2 — то же, $V_0 = 7$ кВ; 3 — то же, $V_0 = 9$ кВ; 4 — нихром, $d = 0,1$ мм, $l = 10$ мм; 5 — нихром, $d = 0,1$ мм, $l = 20$ мм; 6 — медь, $d = 0,06$ мм, $l = 15$ мм; 7 — медь, $d = 0,12$ мм, $l = 15$ мм

Характер изменения T_b от V_0 (рис. 2, кривые 4—7) показывает, что для резко отличающихся физико-механическими свойствами материалов кривые $T_b = \varphi(V_0)$ имеют аналогичный вид: при увеличении V_0 T_b быстро уменьшается в области малых V_0 , $\frac{dT_b}{dV_0}$ при этом увели-

вается. Начиная с некоторого V_0 , которое тем больше, чем больше длина проволоочки (кривые 4, 5) и сечение (кривые 6, 7), изменение T_b становится практически линейным V_0 .

Влияние длины l проволоочки на T_b представлено на рис. 3. Видно, что:

1. Зависимость $T_b = \Psi(l)$ только при $l \leq 10$ мм имеет один и тот же вид при различных V_0 для всех проволоочек.

2. В диапазоне $l > 10$ мм характер кривой $T_b = \Psi(l)$ определяется материалом (кривые 2, 4 и 3, 6) и величиной V_0 (кривые 1—3 и 4—5).

3. Для каждой из исследованных проволоочек имеется такое V_0 , при котором наблюдается $T_b = \text{const}$, независимо от длины, при $l > 10$ мм

(кривая 6, а также для нихрома $d = 0,1$ мм — $V_0 = 16$ кВ, для константана, $d = 0,09$ мм — $V_0 = 12$ кВ, для меди, $d = 0,12$ мм — $V_0 = 9$ кВ и т. д.).

Исследовав влияние длины на T_v только при одном напряжении, авторы [13] заключили, что T_v не зависит от l , что справедливо, как показано выше, только в частном случае.

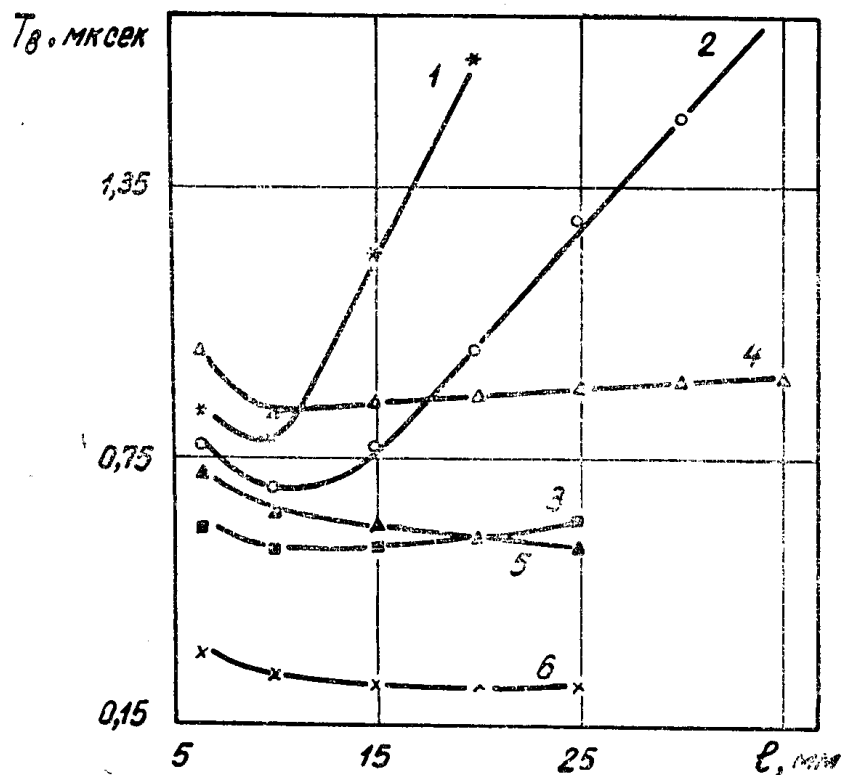


Рис. 3. Зависимость времени взрыва от длины проволоки: 1, 2, 3 — нихром, $d = 0,1$ мм, $V_0 = 5,7$ и 12 кВ, соответственно; 4 — медь, $d = 0,12$ мм, $V_0 = 7$ кВ; 5 — то же, $V_0 = 12$ кВ; 6 — медь, $d = 0,06$ мм, $V_0 = 12$ кВ

В [14] медная проволока исследовалась только при двух длинах 71 и 179 мм. Оказалось, что T_v уменьшается линейно квадратному корню из энергии первого импульса на единицу длины. Это подтвердило гидродинамическую теорию взрыва проволоки, которую авторы [14] берут для объяснения своих результатов. Произведенное измерение энергий и расчет показали, что в нашем случае такое соотношение между T_v и энергией первого импульса действительно имеет место для всех проволок в диапазоне $l \geq 15$ мм (табл. 1), но в области меньших длин увеличение энергии на единицу длины приводит к увеличению T_v , т. е. если гидродинамическая теория и справедлива, то только в определенных границах изменения параметров проволоки.

Зависимость максимальной плотности тока (j_m) от длины проволоки представлена на рис. 4. Видно, что уменьшение V_0 приводит к снижению достижимой j_m . Уменьшение j_m на всех длинах, материалах и сечениях проволок меньше, чем это следует из пропорциональной зависимости j_m от V_0 . Все кривые $j_m = \gamma(l)$ показывают, что, начиная с некоторой длины, тем меньшей, чем больше диаметр проволоки (кривые 2 и 4), дальнейшее снижение j_m прекращается. Очевидно, это будет иметь место только в некотором диапазоне длин.

При равных напряжениях большая плотность тока достигается в более тонких проволочках (кривые 2, 3, 4), но j_m увеличивается менее, чем это следует из обратной пропорциональной зависимости j_m

Таблица 1

Материал, диаметр, мм	Величина квадратного корня из энергии первого импульса на единицу длины, Дж/см	T_B , мксек	l проволочки, см
Нихром, 0,1	3,71	0,77	0,65
	3,36	0,68	1,0
	2,8	0,77	1,5
	2,36	1,0	2,0
	1,98	1,28	2,5
Медь, 0,12	3,44	0,87	1,5
	2,83	0,89	2,0
	2,4	0,9	2,5

от S . Видимо, на величину среднего значения j_m влияют не только параметры контура взрыва и проволочки, но и равномерность распределения тока по сечению, обсуждавшаяся в [15].

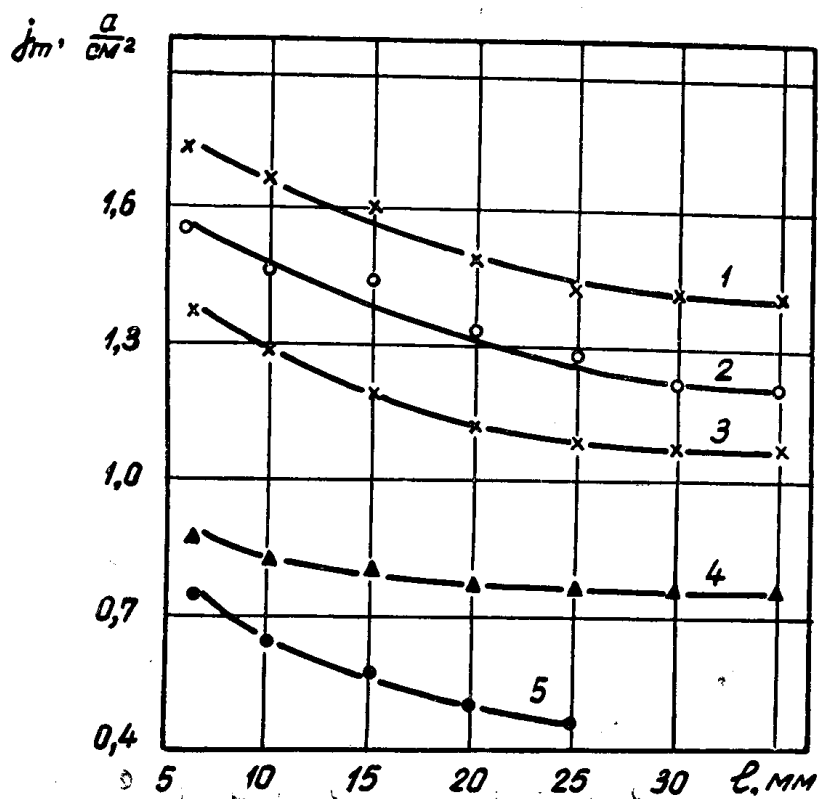


Рис. 4. Зависимость максимально достигнутой плотности тока от длины проволочки: 1 — медь, $d = 0,008$ мм, $V_0 = 12$ кВ; 2 — медь, $d = 0,06$ мм, $V_0 = 7$ кВ; 3 — медь, $d = 0,08$ мм, $V_0 = 7$ кВ; 4 — медь, $d = 0,12$ мм, $V_0 = 7$ кВ; 5 — константан, $d = 0,09$ мм, $V_0 = 7$ кВ

Предположение авторов [12] о том, что проволоочки всегда взрываются при одной и той же плотности тока, не подтверждается.

В заключение следует отметить, что в настоящее время нет теории взрыва проводников, удовлетворительно объясняющей все стороны явления, поэтому дальнейшее накопление экспериментального материала позволит проверить и определить границы применимости существующих теорий, а также создать общую теорию взрыва проводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Лебедев. ЖЭТФ, 27, 4, 1954.
 2. С. В. Лебедев. ЖЭТФ, 27, 5, 1954.
 3. Ф. Узбб, Н. Чейз, М. Эрнстин, А. Таллеструп. Взрывающиеся проволоочки. ИИЛ, 1963.
 4. Е. Кнейр, Ф. Нейлсон, См. [3].
 5. Ю. А. Котов, М. А. Мельников. Ж. Электронная обработка материалов. № 2, 1967.
 6. Н. А. Протопопов, В. М. Кульгавчук, ЖТФ, 31, 5, 1961.
 7. В. Мюллер. См. [3].
 8. В. Шеррер. См. [3].
 9. В. Лохте-Хольтгревен. Успехи физических наук. 72, 3, 1960.
 10. Г. Андерсен, Ф. Нейлсон. См. [3].
 11. Ю. А. Котов, М. А. Мельников. Ж. Электронная обработка материалов. № 3, 1966.
 12. Л. П. Волков, В. М. Воронов, С. В. Самылов. ЖЭТФ, 51, 1, 1966.
 13. М. П. Ванюков, В. И. Исаенко. ЖТФ, 32, 2, 1962.
 14. Ч. Нэш, К. Олсен. Электрический взрыв проводников. Изд-во «Мир», 1965.
 15. Р. Маннинггер. См. [3].
-