

05

Давление при электрическом взрыве металлических фольг

© А.Н. Григорьев, А.В. Павленко

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Челябинская область
E-mail: grigoriev@snz.ru, dep5@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2009 г.

Представлены результаты измерения давления при электрическом взрыве фольг из различных металлов (Cu, Al, Fe, Ta, Ti, Pb, W, латунь). Полученная зависимость амплитуды давления от удельной введенной в фольгу энергии хорошо аппроксимируется линейной зависимостью.

PACS: 52.80.Qj

Ударные волны, инициируемые электрическим взрывом проводников в различных средах, находят широкое применение в технике и технологии благодаря возможности управлять их характеристиками в широких диапазонах путем изменения как параметров разрядного RLC -контура, так и размеров и материала взрываемого проводника. Для примера можно отметить работы по формообразованию различных материалов, разрушению горных пород, инициированию взрывчатых веществ, исследованию динамических характеристик материалов и изделий и др. [1–5]. Для создания ударной волны плоской, цилиндрической или сложной формы в конденсированных средах используется электрический взрыв фольги (ЭВФ) [5]. Достоинством данного метода является формирование ударной волны с близким к равномерному распределением (по поверхности объекта) профиля давления.

Отсутствие экспериментальной информации относительно общих закономерностей, определяющих амплитуду и профиль волны давления, генерируемой при ЭВФ, не позволяет по измеряемым электротехническим характеристикам взрыва (ток, напряжение) оценить генерируемое в окружающей среде давление. Определенные попытки были предприняты авторами монографий [2–4], но постановка решаемых ими практических задач не предполагала записи профиля ударной волны.

В данной работе приведены результаты измерения давления, генерируемого при электрическом взрыве фольг из различных металлов.

Электрический взрыв фольг осуществлялся на экспериментальном стенде (рис. 1) с параметрами: емкость конденсаторной батареи $C_0 = 79 \mu\text{F}$, индуктивность разрядного контура L_c варьировалась в диапазоне 35–2000 нН, зарядное напряжение $U_0 = 18–38 \text{ kV}$. Более высокое зарядное напряжение конденсаторной батареи и более низкая индуктивность разрядного контура позволяли увеличить энерговыход в фольгу. Варьирование индуктивности контура L_c ($L_c = L_f + L_b$) осуществлялось за счет изменения индуктивности фольги L_f и за счет изменения индуктивности L_b (путем включения в контур дополнительной индуктивности) (рис. 1). Дополнительная индуктивность включалась между коллектором 4 и взрываеваемой фольгой 5. Стенд собран в виде единого модуля с управляемым разрядником, использующим явление пробоя по поверхности твердого диэлектрика (рис. 1) [6].

Регистрация тока $I(t)$ в контуре осуществлялась с помощью пояса Роговского 9. Падение напряжения $U_f(t)$ на взрываеваемой фольге 5 измерялось с помощью омического делителя напряжения (на рис. 1 не показан). Регистрация сигналов проводилась с помощью четырехканального осциллографа Tektronix TDS 2024. Погрешность измерений не превышала 8%.

В качестве взрываеваемой фольги 5 использовались фольги из Cu, Al, Fe, Ta, Ti, Pb, W и латуни (Cu–Zn).

Для регистрации импульса давления использовался цилиндрический кварцевый датчик давления 11 в режиме дифференцирования [7], обеспечивающий точность измерения до 5%. Для этого на фольгу наклеивалась пластина (подложка) 10, выполненная из полиметилметакрилата (толщина $3 \pm 0.05 \text{ mm}$), на свободную поверхность которой крепился датчик давления 11. Датчик устанавливался в центральной области сборки. Диаметр датчика давления составлял 20 или 30 mm. Толщина датчика 5 mm позволяла регистрировать давление длительно-стью 0.85 μs . При проведении каждого опыта датчик и подложка разрушались в отраженной от свободной поверхности волне растяжения.

Для определения момента времени начала генерации импульса давления и времени достижения давлением своего амплитудного значения проводился учет вязко-упругих свойств полиметилметакрилата (ПММА) — учитывалась нелинейная зависимость скорости движения волны от ее амплитуды. Для определения скорости волны давления

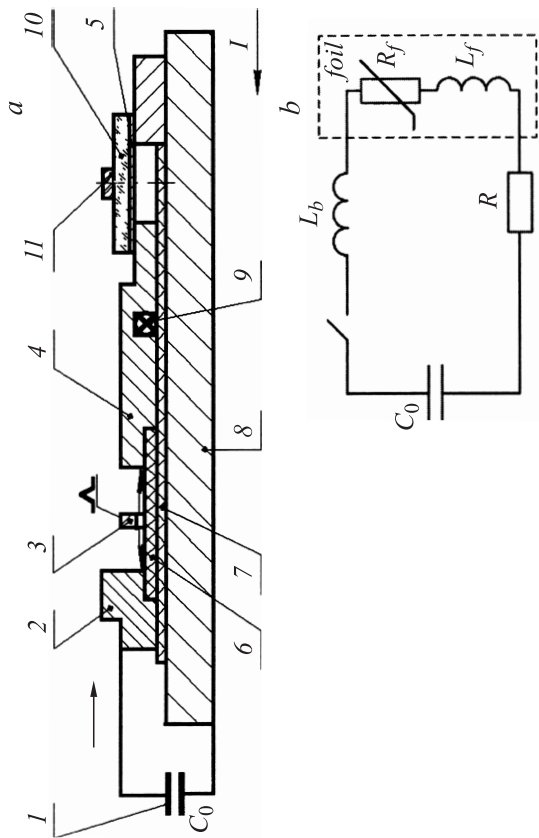


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального стенда (а): 1 — емкостной накопитель энергии, 2 — высоковольтный электрод, 3 — управляющий электрод, 4 — коллектор, 5 — взрывающаяся фольга, 6 — диэлектрик, 7 — изоляция, 8 — обратный токопровод, 9 — пояс Роговского, 10 — пластина (подложка) из полиметилметакрилата, 11 — датчик давления; схема замещения разрядного контура (b): R_f — активное сопротивление фольги, R — активное сопротивление разрядного контура без фольги.

в ПММА в каждом конкретном случае использовалась зависимость скорости волны давления от степени сжатия $D = f(1 - \rho_0/\rho)$, заимствованная из работы [8].

Плотность ρ ударно-сжатого ПММА можно найти из соотношений для параметров ударных волн, представляющих собой законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\rho_0(D - u_0) = \rho(D - u),$$

где D — скорость волны, u_0, u — массовые скорости перед и за фронтом ударной волны соответственно.

Так как $u_0 = 0$, а массовую скорость за фронтом ударной волны можно приближенно определить как $u = P/\rho_0 D$, тогда

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{P}{\rho_0 D^2}} \approx \frac{\rho_0}{1 - \frac{P}{\rho_0 c_0^2}}, \quad (1)$$

где c_0 — скорость звука в невозмущенном материале.

Зависимость скорости волны давления в ПММА от амплитуды импульса давления $D = f(P_m)$, построенная на основе расчета ударно-сжатой плотности ρ по формуле (1) и данных [8], приведена на рис. 2. Полученной зависимостью мы воспользовались для нахождения временной задержки прихода волны давления к датчику относительно момента собственно взрыва (момента генерации давления).

На рис. 3 приведены осциллограммы тока, напряжения и давления (с учетом времени движения ударной волны к датчику давления), регистрируемые при ЭВФ.

Введенная в фольгу энергия рассчитывалась по осциллограммам тока и напряжения: $E(t) = \int U(t)I(t)dt$, где $U(t) = U_f(t) - L_f dI/dt$ — активное падение напряжения на взрывающейся фольге. При этом предполагалось, что индуктивность фольги L_f постоянна и не зависит от времени.

Для тугоплавких металлов с низкой электропроводностью (W, Ta) из-за вспыхивания шунтирующего разряда невозможно из осциллограмм тока и напряжения определить момент собственно взрыва. Поэтому введенную энергию для W и Ta фольг мы считали до момента достижения давлением своего максимума. Учет времени задержки прихода волны к датчику давления производился по найденной для ПММА зависимости $D = f(P_m)$ (рис. 2). При этом моменты времени

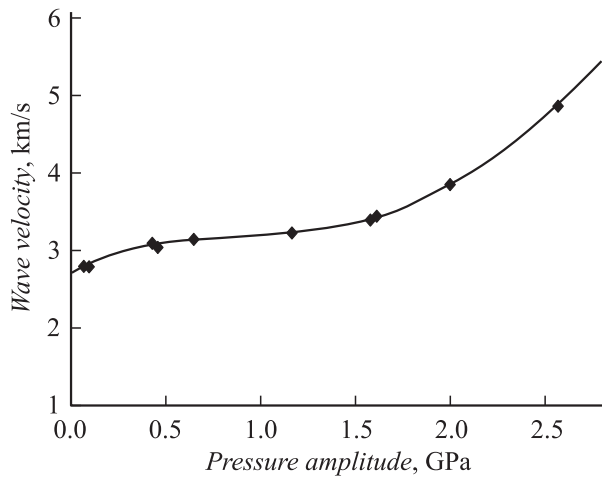


Рис. 2. Зависимость скорости волны давления D в ПММА от амплитуды импульса давления P_m .

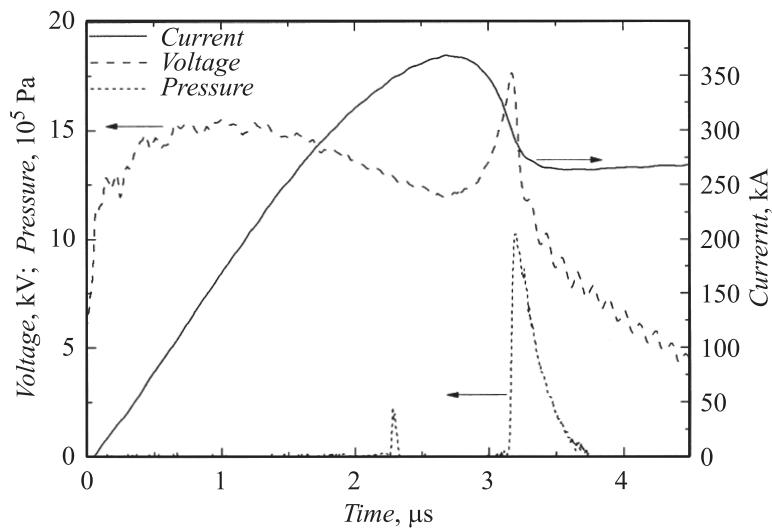


Рис. 3. Осциллограммы тока, напряжения и давления при электрическом взрыве медной фольги $16 \mu\text{m}$ размерами $100 \times 100 \text{ mm}$. $L_b = 15 \text{ nH}$, $L_f = 80 \text{ nH}$, $U_0 = 25 \text{ kV}$.

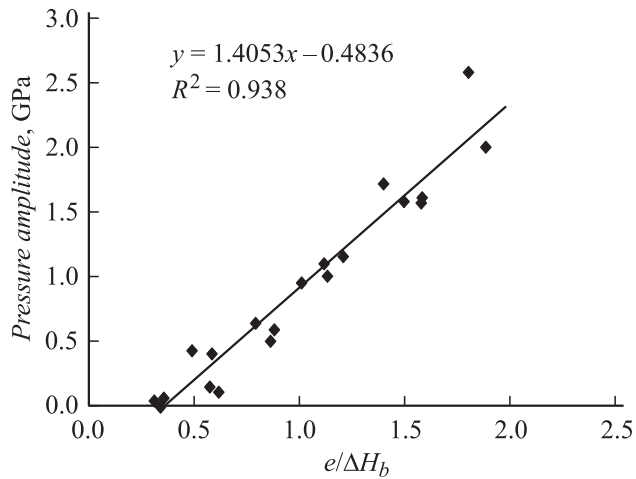


Рис. 4. Зависимость амплитуды давления от введенной в фольгу энергии $P_m = f(e/\Delta H_b)$ (для различных металлов, толщин и размеров фольги).

для максимумов импульсов давления и напряжения для большинства взорванных металлов хорошо совпадают (давление достигает своего максимума чуть позже максимума напряжения, рис. 3).

В случае, когда фольга (продукты взрыва) полусвободно расширяется в воздушный зазор в сторону обратного токопровода, давление, создаваемое в воздухе (и соответственно затраты энергии на это), на порядки меньше давления в ПММА (акустическая жесткость воздуха на 4 порядка меньше акустической жесткости ПММА). Таким образом, вкладом энергии на формирование ударной волны в воздухе можно пренебречь. Потери на излучение при ЭВФ (исключая стадию разряда по продуктам взрыва) составляют единицы процентов ($\sim 6\%$ [9]) от общей величины энергии, введенной в фольгу. Поэтому, учитывая точность измерений, данным вкладом в общий энергобаланс можно также пренебречь.

На рис. 4 приведена зависимость амплитуды давления при ЭВФ (для различных металлов, зарядных напряжений U_0 и индуктивностей контура L_c , толщин и размеров фольг, направлений прокатки фольги относительно протекающего тока) от введенной в фольгу энергии $P_m = f(e/\Delta H_b)$; $e = E/m_f$ — удельная энергия, введенная к момен-

ту максимума (начало спада) импульса напряжения или, в случае невозможности его определения, — к моменту максимума давления; E — энергия, введенная в фольгу; m_f — масса взрывающейся фольги; ΔH_b — удельная теплота кипения металла (данные по теплоте кипения металлов ΔH_b были взяты из [10]). Для латуни ΔH_b рассчитана как среднее арифметическое теплот кипения меди и цинка.

Как видно из рис. 4, имеет место связь амплитуды генерируемого при ЭВФ давления с величиной энергии, введенной в фольгу.

Таким образом, полученные экспериментальные данные (для различных металлов, размеров фольг, зарядных напряжений и индуктивностей контура) свидетельствуют об определяющей роли введенной в фольгу удельной энергии на генерируемый при ЭВФ импульс давления. Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о наличии линейной зависимости (по крайней мере для данных условий эксперимента) амплитуды генерируемого при ЭВФ давления от величины удельной энергии, введенной в фольгу. Следует заметить, что в связи со слабой изученностью свойств ПММА по затуханию в нем ударных волн остается невыясненным вопрос об экстраполяции полученной зависимости $P_m = f(e/\Delta H_b)$ на границу фольги и подложки (ПММА).

Экспериментальные результаты свидетельствуют о влиянии направления прокатки фольги (относительно протекающего тока) на импульс давления и электрические характеристики ЭВФ (ток, напряжение, введенная энергия). Для тугоплавких металлов с низкой электропроводностью и низкой энергией ионизации (W, Ta) даже при осуществлении электрического взрыва в быстрых разрядных контурах не удается ввести в металл, до вспыхивания шунтирующего разряда, энергию больше $\sim 0.6\Delta H_b$ [11]. По этой причине данные металлы становятся непригодными для генерации давлений больших амплитуд.

Авторы благодарны В.С. Седому за обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 289 с.
- [2] Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.

- [3] *Столович Н.Н.* Электровзрывные преобразователи энергии. Минск: Наука и техника, 1983. 151 с.
- [4] *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. думка, 1986. 208 с.
- [5] *Острик А.В., Петровский В.П.* // ПМТФ. 1993. № 1. С. 133–137.
- [6] *Grigoriev A.N., Pavlenko A.V.* // IEEE Trans. on Dielectric and Electr. Insul. 2007. V. 14. N 4. P. 964–967.
- [7] *Graham R.A., Neilson F.W., Benedick W.B.* // J. Appl. Phys. 1965. N 5. P. 1775–1783.
- [8] *Menikoff R.* // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. N 12. P. 7696–7704.
- [9] *Buntzen R.* Exploding wires — for investigation of low-power underwater explosion. Exploding wires. V. 2. Plenum Press, N.Y., 1962. P. 195.
- [10] *Физические величины.* Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [11] *Павленко А.В., Григорьев А.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 3. С. 81–89.