

12

Неоднородность формирования волны давления при электрическом взрыве фольги

© А.В. Павленко, А.Н. Григорьев, Е.И. Карнаухов

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

Поступило в Редакцию 5 сентября 2013 г.

Представлены результаты измерений амплитудно-временных профилей давления в различных областях плоской электрически взрывающейся фольги (ЭВФ). Данные измерения позволили реконструировать временную эволюцию пространственного профиля давления, формируемого ЭВФ. Измерения проводились с помощью кварцевых датчиков давления, расположенных в разных (центральной и периферийной) областях на свободной поверхности диэлектрической подложки, подклеенной к взрывающейся фольге. Полученные результаты свидетельствуют о начале взрыва с краев фольги с последующим более сильным ростом давления в центрально-осевой области взрывающейся фольги.

Возможность использования электрического взрыва фольги (ЭВФ) для создания ударной волны плоской, цилиндрической или сложной формы с близким к равномерному пространственным распределением профиля давления позволяет использовать ЭВФ для исследования динамических характеристик материалов и испытания конструкций [1–4], а также для инициирования взрывчатых веществ [5,6]. При этом прямые измерения однородности генерации давления по площади фольги отсутствуют.

В данной работе приведены результаты измерения пространственной неоднородности („неплоскостности“) распределения давления, формируемого при электрическом взрыве фольг из меди, алюминия и титана.

Электрический взрыв фольги осуществлялся на стенде, описанном в работах [7,8], со следующими параметрами: емкость конденсаторной батареи C_0 составляла 23 и 79 μF , индуктивность разрядного контура

L_C составляла ~ 60 нН. В качестве взрывающей фольги использовались: медная фольга толщиной $16 \mu\text{m}$, алюминиевая фольга толщиной $14 \mu\text{m}$ и титановая фольга толщиной $90 \mu\text{m}$. На фольгу с одной стороны наклеивалась пластина (подложка), выполненная из диэлектрического материала — стекла К5 или полиметилметакрилата (ПММА), на свободную поверхность которой размещали датчики давления таким образом, чтобы провести регистрацию давления и в центральной, и в периферийных областях фольги. Схема расположения девяти датчиков приведена на рис. 1, а. Размеры цилиндрических кварцевых датчиков давления составляли (диаметр \times толщина): 10×3 мм или 8×2.5 мм. Толщина датчиков позволяла регистрировать давление длительностью $\sim 0.5 \mu\text{s}$. При проведении каждого опыта датчики и подложка разрушались в отраженной от свободной поверхности волне растяжения.

Регистрации тока $I(t)$ в контуре осуществлялась с помощью пояса Роговского. Падение напряжения $U_f(t)$ на взрывающей фольге измерялось с помощью омического делителя напряжения. Погрешность измерений не превышала 8%. Измерения амплитудно-временных профилей давления в различных областях взрывающей фольги проводились с помощью кварцевых датчиков давления, работающих в токовом режиме [9]. Регистрация сигналов тока, напряжения и давления проводилась с помощью четырехканальных осциллографов Tektronix DPO 3034. Осциллографы имели один уровень запуска и запускались с фронта сигнала, формируемого делителем напряжения.

Введенная в фольгу энергия рассчитывалась по осциллограммам тока и напряжения: $W(t) = \int U(t)I(t)dt$, где $U(t) = U_f(t) - L_f dI/dt$ — активное падение напряжения на взрывающей фольге. Предполагалось, что индуктивность фольги L_f постоянна и не зависит от времени. Удельная (на единицу массы взрывающей фольги) энергия определялась как $w(t) = W(t)/m_f$, где m_f — масса взрывающей фольги. Удельная энергия рассчитывалась до момента времени, соответствующего полувисоте спада импульса перенапряжения, и сравнивалась с удельной энергией сублимации взрывающего металла w_c .

На рис. 1, б–д приведены амплитудно-временные профили давления, зарегистрированные при электрическом взрыве $16 \mu\text{m}$ медной фольги.

Наличие у датчика физических размеров приводит к усреднению величины давления на площади регистрации. Для построения пространственного распределения давления значения в промежуточных

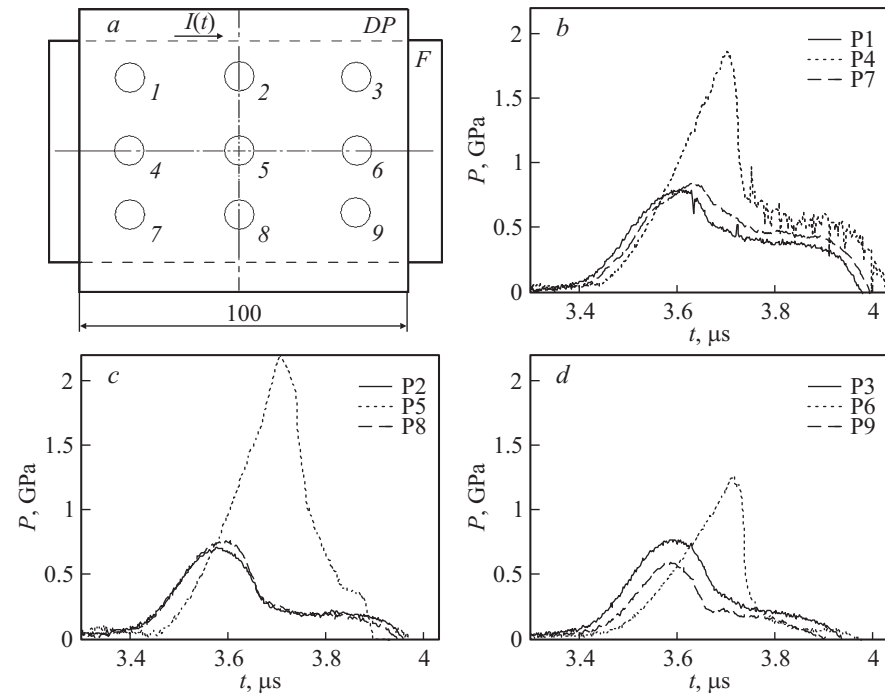


Рис. 1. Схема расположения датчиков давления (1–9) на диэлектрической подложке с фольгой (a) и импульсы давления, зарегистрированные датчиками (b–d) при электрическом взрыве $16\ \mu\text{m}$ Cu фольги размером $100 \times 50\ \text{mm}$; $C_0 = 23\ \mu\text{F}$; $U_0 = 38\ \text{kV}$; $w \approx 2.2w_c$. Подложка из стекла К5 толщиной 12 mm; датчики — $10 \times 3\ \text{mm}$; DP — диэлектрическая подложка, F — фольга.

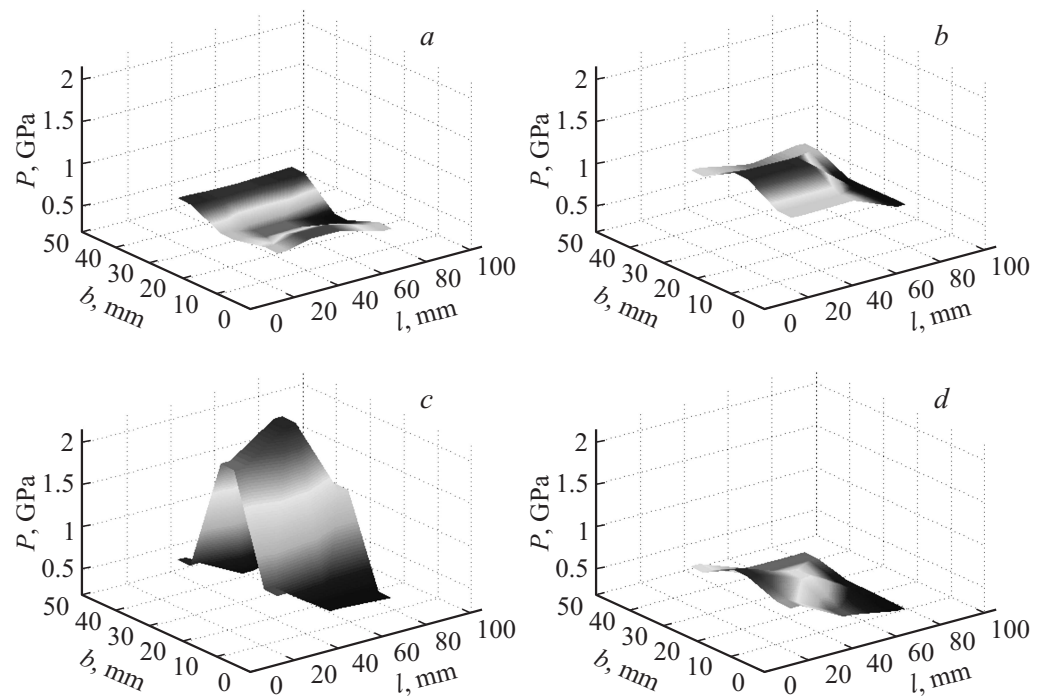


Рис. 2. Реконструированное пространственное распределение давления P для различных моментов времени при электрическом взрыве $16 \mu\text{m}$ Cu фольги размером $100 \times 50 \text{ mm}$: a — 3.5 , b — 3.6 , c — 3.71 , d — $3.85 \mu\text{s}$; l — длина фольги, b — ширина фольги.

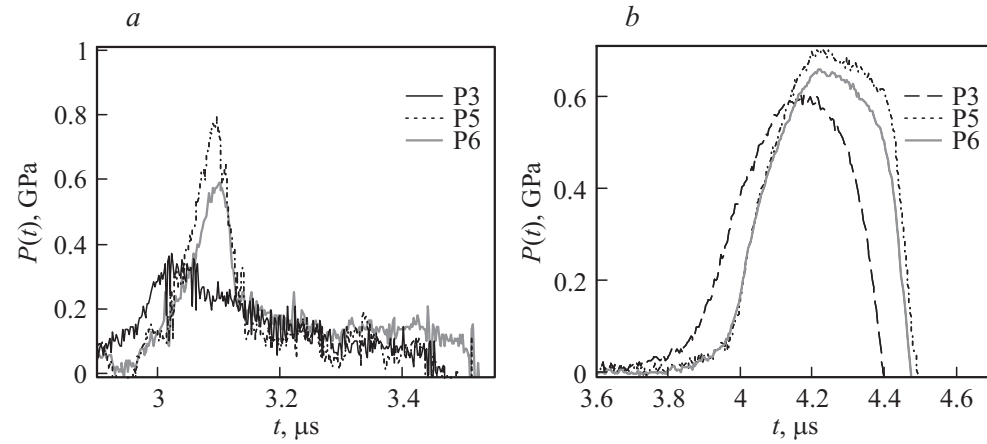


Рис. 3. Импульсы давления, зарегистрированные датчиками давления при электрическом взрыве: $14\ \mu\text{m}$ Al фольги размером $100 \times 40\ \text{mm}$, $C_0 = 23\ \mu\text{F}$, $U_0 = 40\ \text{kV}$, $w \approx 1.35w_c$, подложка из стекла К5, датчики — $10 \times 3\ \text{mm}$ (a); $90\ \mu\text{m}$ Ti фольги размером $100 \times 40\ \text{mm}$ $C_0 = 79\ \mu\text{F}$, $U_0 = 30\ \text{kV}$, $w \approx 1.35w_c$, подложка из ПММА толщиной 3 mm, датчики — $8 \times 2.5\ \text{mm}$ (b).

(между датчиками) областях получали линейной интерполяцией значений давления, регистрируемых датчиками. Таким образом, полученные профили пространственной неоднородности являются оценкой снизу имеющейся неоднородности давления.

На рис. 2 показано реконструированное пространственное распределение давления P для различных моментов времени t при электрическом взрыве $16 \mu\text{m}$ медной фольги размером $100 \times 50 \text{ mm}$. Как видно из рис. 2, *a*, взрыв начинается с краев фольги с последующим усилением давления в центральной области фольги (рис. 2, *b–c*).

Учитывая осевую симметрию фольги и полученные результаты (рис. 2), в остальных экспериментах использовали только три датчика — № 3, 5 и 6, что позволяло измерить относительную неоднородность распределения давления в поперечном и продольном направлениях.

При электрическом взрыве $14 \mu\text{m}$ алюминиевой фольги размером $100 \times 40 \text{ mm}$ также имеет место неоднородность пространственного профиля волны давления (рис. 3, *a*). В отличие от опыта с медной фольгой здесь использовалась диэлектрическая подложка из ПММА, которая в силу своих упруго-вязко-пластических свойств „сжимает“ фронт волны давления. На рис. 3, *b* приведены зарегистрированные датчиками импульсы давления при взрыве $90 \mu\text{m}$ титановой фольги размером $100 \times 40 \text{ mm}$. Во всех случаях давление начинает формироваться с краев фольги, но в дальнейшем достигает большей величины в центрально-осевой области на поверхности фольги.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о неоднородном формировании пространственно-временного профиля давления. Во всех случаях при взрыве фольги (введенная в фольгу энергия превышает энергию сублимации металла) давление в центрально-осевой области начинает формироваться позднее, чем в периферийной области, но достигает большей величины. Начало взрыва с краев фольги, вероятно, связано со скинированием тока по краям фольги и последующим увеличением плотности тока (в результате разрушения краев фольги и уменьшения сечения фольги) в осевой области фольги.

Авторы благодарны В.Н. Афанасьеву за помощь в подборе датчиков давления, М.В. Галицкому и Д.В. Сорокину за помощь в проведении многоканальных измерений.

Список литературы

- [1] *Keller D., Penning J.* // Exploding wires. V. 2. N.Y.: Plenum Press, 1962. P. 259.
- [2] *Острик А.В., Петровский В.П.* // ПМТФ. 1993. № 1. С. 133–137.
- [3] *Афанасьев В.Н., Галицкий М.В.* и др. // Труды V Забабахинских научных чтений. Снежинск, 1999. С. 127–128.
- [4] *Зайцев А.Д., Острик А.В.* и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2001. № 2. С. 30–35.
- [5] *Байков А.П., Белаго В.А.* и др. // ФГВ. 1973. № 2. С. 286–291.
- [6] *Байков А.П., Войтенко А.Е.* и др. // ФГВ. 1973. № 2. С. 323–325.
- [7] *Григорьев А.Н., Павленко А.В.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 16. С. 76–81.
- [8] *Grigoriev A.N., Pavlenko A.V.* // IEEE Trans. on Dielectric and Electr. Insul. 2007. V. 14. N 4. P. 964–967.
- [9] *Graham R.A., Neilson F.W., Benedick W.B.* // J. Appl. Phys. 1965. N 5. P. 1775–1783.