

12

## Исследование влияния материала фольги на однородность электрического взрыва

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

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

Поступило в Редакцию 6 июня 2014 г.

Представлены результаты измерений с помощью кварцевых датчиков амплитудно-временных профилей давления в центральной и боковой (поперечно-краевой) областях плоской электрически взрывающейся фольги из металлов: меди М1Т, алюминия АД1М, латуни Л63, никелевого сплава 80НХС, титана ВТ1-00 и свинца, плакированного оловом. По результатам измерения определены коэффициент неоднородности по амплитуде давления и разновременность взрыва. Показано, что важным параметром, влияющим на однородность и одновременность взрыва, является удельное электрическое сопротивление взрывающегося металла.

Возможность использования электрического взрыва фольги (ЭВФ) для создания плоской ударной волны с большой площадью нагружения позволяет использовать ЭВФ для инициирования взрывчатых веществ [1,2], исследования динамических характеристик материалов и испытания конструкций [3–6]. Как было показано в работе [7], при электрическом взрыве фольг из меди (толщина  $16\ \mu\text{m}$ ), алюминия (толщина  $14\ \mu\text{m}$ ) и титана (толщина  $90\ \mu\text{m}$ ) наблюдается неоднородность формирования пространственно-временного профиля давления (неоднородность генерации давления по площади фольги).

Исходя из предположения, что неоднородность взрыва определяется неоднородностью плотности тока по ширине фольги (из-за диффузии магнитного поля в фольгу и соответствующего скин-эффекта), следует, что одним из факторов, определяющих неоднородность взрыва фольги, является ее удельное электрическое сопротивление.

В данной работе представлены экспериментальные результаты по исследованию влияния материала фольги на однородность генерации давления и разновременность достижения им своего максимума при

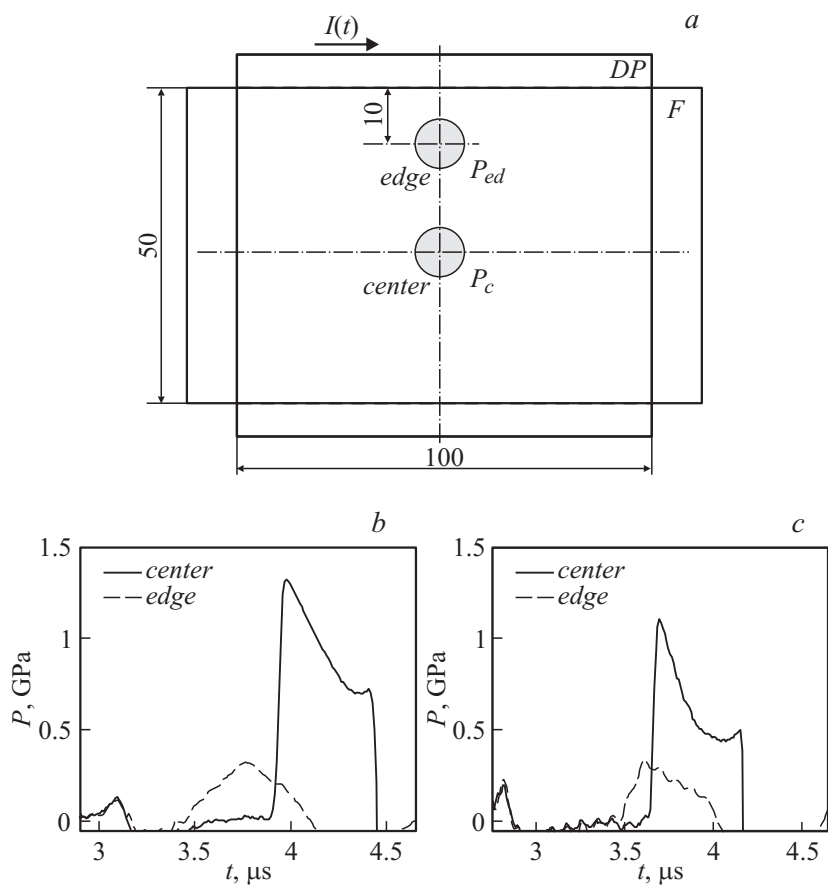
электрическом взрыве фольг из меди М1Т, алюминия АД1М, латуни Л63, никелевого сплава 80НХС, стали 08КП, титана ВТ1-00 и свинца, плакированного оловом. За счет изменения материала фольги варьировалось ее начальное удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , в то время как толщина, ширина, длина и введенная в фольгу энергия оставались фиксированными.

В работе [7] было установлено, что наибольшая неоднородность давления наблюдается в поперечном направлении фольги (в центре фольги давление максимально, в боковых (поперечно-краевых) областях — минимально). Поэтому в данной работе для определения предельной неоднородности формирования давления от ЭВФ регистрация амплитудно-временных профилей давления проводилась в двух областях — в центральной и поперечно-краевой (боковой) (рис. 1, а), что существенно упрощало процесс подготовки сборок к экспериментам. Датчики давления размещали на свободную поверхность диэлектрической подложки (полиметилметакрилат толщиной 3 мм), подклеенной к взрываемой фольге.

Электрический взрыв фольги осуществлялся на стенде, описанном в работах [8,9], со следующими параметрами: емкость конденсаторной батареи  $C_0$  составляла 23  $\mu\text{F}$ , индуктивность контура  $L_c \sim 60$  нН, зарядное напряжение  $U_0 = 22\text{--}44.7$  кВ. Номинальная толщина  $d_f$  взрываемых фольг составляла 50  $\mu\text{m}$ , длина  $l_f = 100$  мм, ширина  $b_f = 50$  мм.

Регистрация тока  $I(t)$  в контуре и падение напряжения на взрываемой фольге осуществлялась с помощью пояса Роговского и омического делителя напряжения соответственно. Измерения амплитудно-временных профилей давления в различных областях взрываемой фольги проводились с помощью кварцевых датчиков давления, работающих в токовом режиме (диаметр датчиков составлял 10 мм, толщина 3 мм). Регистрация сигналов тока, напряжения и давления проводилась с помощью четырехканального осциллографа Tektronix TDS 420 А. Введенная в фольгу энергия рассчитывалась аналогично работам [7,8]. Удельная (на единицу массы взрываемой фольги) энергия определялась как  $w(t) = W(t)/m_f$ , где  $m_f$  — масса взрываемой фольги. Удельная энергия рассчитывалась до момента времени, соответствующего полувысоте спада импульса перенапряжения и сравнивалась с удельной энергией сублимации взрываемого металла  $w_c$ .

Предельная неоднородность и разновременность взрыва определялись путем сравнения амплитудно-временных профилей давления,



**Рис. 1.** Расположение датчиков давления на подложке в опытах с электрическим взрывом фольги (*a*) и импульсы давления, зарегистрированные датчиками при электрическом взрыве фольги из меди М1Т ( $U_0 = 44.7 \text{ kV}$ ,  $w = 1.05w_c$ ) (*b*) и алюминия АД1М ( $U_0 = 36.4 \text{ kV}$ ,  $w = 1.18w_c$ ) (*c*). Предымпулс является электромагнитной наводкой от взрыва фольги на датчик давления. *DP* — диэлектрическая подложка из полиметилметакрилата толщиной 3 мм, *F* — фольга.

зарегистрированных в центральной и боковой областях взрывающейся фольги. Для количественной характеристики неоднородности взрыва фольги введем коэффициент неоднородности  $K_n$ :

$$K_n = \frac{P_{m.c.}}{P_{m.ed}}, \quad (1)$$

где  $P_{m.c.}$  и  $P_{m.ed}$  — соответственно амплитуды давления, измеренные в центральной и боковой областях на свободной поверхности подложки, к которой подклеена взрывающаяся фольга.

Разновременность достижения давлением своего максимума определялась как

$$\Delta t_p = t_{m.c.} - t_{m.ed}, \quad (2)$$

где  $t_{m.c.}$  и  $t_{m.ed}$  — времена достижения давлением своего максимума соответственно в центральной и боковой областях взрывающейся фольги.

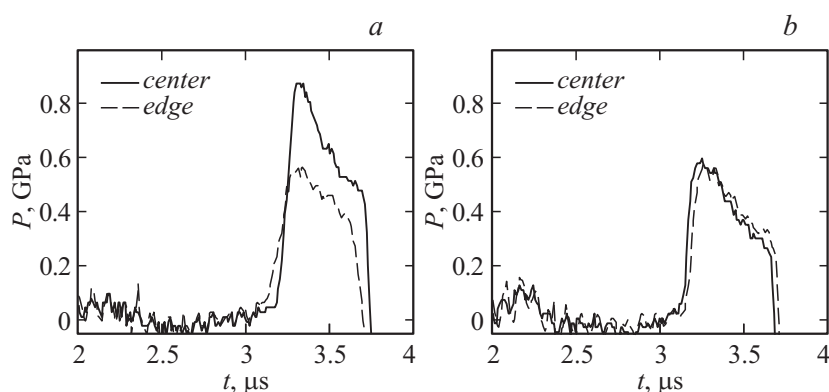
Характерный размер скин-слоя определяется как

$$\delta_{sk} = \sqrt{\frac{T\rho}{2\pi\mu\mu_0}}, \quad (3)$$

где  $T$  — период колебаний тока;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала фольги;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/м — магнитная постоянная, т.е. при прочих равных условиях характерный размер скин-слоя зависит от  $\rho^{0.5}$ .

Для выяснения влияния удельного сопротивления взрывающейся фольги на однородность взрыва была проведена серия экспериментов, в которой при одинаковой номинальной толщине фольг  $d_f = 50 \mu\text{m}$  и фиксированных  $l_f = 100 \text{ mm}$ ,  $b_f = 50 \text{ mm}$  и введенной в фольгу энергии  $w \approx 1.1w_c$  регистрировались амплитудно-временные профили давления, по которым определялся коэффициент неоднородности  $K_n$  и разновременность  $\Delta t_p$  взрыва.

На рис. 1 и 2 приведены типичные амплитудно-временные профили давления при взрыве меди (рис. 1, *b*), алюминия (рис. 1, *c*), никелевого сплава 80НХС (рис. 2, *a*) и стали 08КП (рис. 2, *b*). При взрыве фольг из стали 08КП и титана ВТ1-00 были получены одинаковые коэффициенты неоднородности взрыва —  $K_n = 1.03$ , в связи с чем для подтверждения экспериментальных результатов был проведен контрольный эксперимент с фольгой из стали 08КП при идентичных начальных условиях

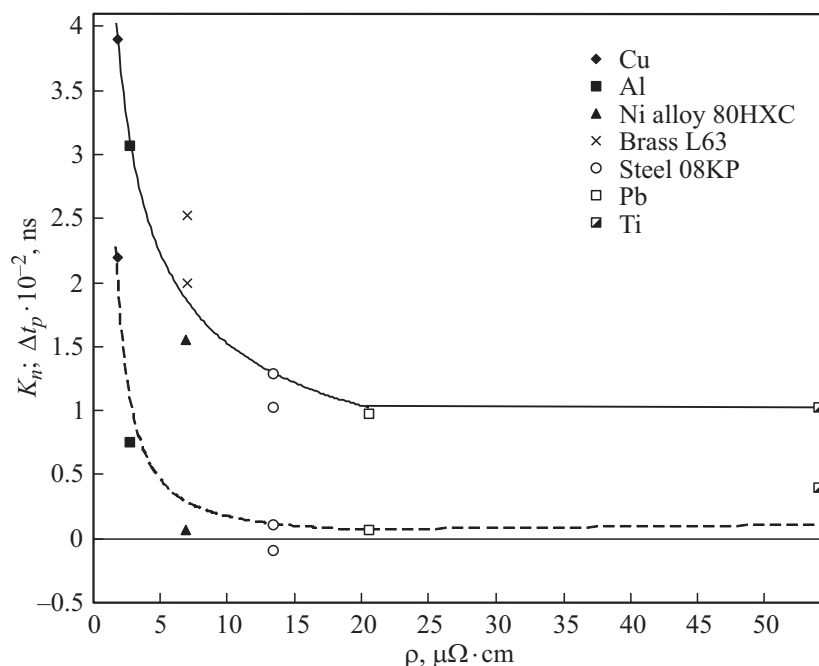


**Рис. 2.** Импульсы давления, зарегистрированные датчиками давления при электрическом взрыве: никелевого сплава 80 НХС ( $U_0 = 41.9 \text{ kV}$ ,  $w = 1.08w_c$ ) (a) и стали 08КП ( $U_0 = 41.9 \text{ kV}$ ,  $w = 1.08w_c$ ) (b).

(при этом относительная введенная в фольгу энергия уменьшилась с  $w/w_c = 1.08$  до  $w/w_c = 1.02$ , а  $K_n$  увеличился до 1.29).

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента неоднородности  $K_n$  от удельного электрического сопротивления материала взрывающейся фольги  $\rho$ , построенная на основе полученных экспериментальных данных. Как видно из рис. 3, увеличение начального удельного сопротивления  $\rho$  материала взрывающейся фольги приводит к снижению коэффициента неоднородности  $K_n$  взрыва фольги. Также на рис. 3 для этих же фольг приведена зависимость разновременности  $\Delta t_p$  достижения давлением своего максимума от удельного электрического сопротивления  $\rho$ .

Обращает на себя внимание тот факт, что при одинаковом начальном удельном сопротивлении латуни Л63 ( $\rho \approx 7 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) и никелевого сплава 80НХС ( $\rho \approx 6.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) у последнего наблюдается существенно меньшая неоднородность взрыва (для фольги из сплава 80НХС коэффициент неоднородности  $K_n = 1.56$ , в то время как для фольги из латуни Л63  $K_n = 2.53$ ); при этом также многократно различается разновременность взрыва (для фольги из сплава 80НХС  $\Delta t_p$  лежит в диапазоне 0–50 ns, а для фольги из латуни Л63  $\Delta t_p$  составляет 200 ns). Это может быть связано с тем, что основу латуни составляет высо-



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента неоднородности  $K_n$  (большие знаки) и разновременности  $\Delta t_p$  (маленькие знаки) от удельного электрического сопротивления материала взрываемой фольги  $\rho$ . Фольги толщиной  $50 \mu\text{m}$ , введенная энергия  $w \approx 1.1w_c$ .

копроводящая медь (62–65%), атомы которой одновременно являются матрицей для атомов цинка; при этом цинк, по сравнению с медью, имеет существенно более низкие температуры плавления и кипения. Наряду с этим, возможной причиной столь сильного различия в неоднородности и разновременности взрыва латуни Л63 и никелевого сплава 80НХС может быть различная динамика поведения удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости  $\mu$  (формула (3)) в процессе нагрева фольг. При этом никель (составляющий основу сплава 80НХС) имеет в  $\sim 5$  раз большее удельное электрическое сопротивление при плавлении, а также более

высокие температуры плавления и кипения, чем медь (составляющая основу латуни Л63).

В случае электрического взрыва фольги из стали 08КП, свинца и титана наблюдается не только наилучшая однородность взрыва фольги с коэффициентом неоднородности  $K_n \approx 1.0-1.29$  (рис. 3), но и полное воспроизведение формы амплитудно-временного профиля импульса давления в боковой и центральной области фольги (рис. 2, *b*).

Таким образом, увеличение начального удельного электрического сопротивления материала взрывающейся фольги приводит к снижению неоднородности давления и к уменьшению разновременности его формирования. Существенное влияние удельного электрического сопротивления материала взрывающейся фольги на коэффициент неоднородности  $K_n$  и разновременность  $\Delta t_p$  взрыва, скорее всего, свидетельствует об определяющем влиянии скин-эффекта (распределения плотности тока по ширине фольги) на неоднородность взрыва.

## Список литературы

- [1] Байков А.П., Белаго В.А. и др. // ФГВ. 1973. № 2. С. 286–291.
- [2] Байков А.П., Войтенко А.Е. и др. // ФГВ. 1973. № 2. С. 323–325.
- [3] Keller D., Penning J. // Exploding wires. V. 2. N.Y.: Plenum Press, 1962. P. 259.
- [4] Острик А.В., Петровский В.П. // ПМТФ. 1993. № 1. С. 133–137.
- [5] Афанасьев В.Н., Галицкий М.В. и др. // Труды V Забабахинских научных чтений. Снежинск, 1999. С. 127–128.
- [6] Зайцев А.Д., Острик А.В. и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2001. № 2. С. 30–35.
- [7] Павленко А.В., Григорьев А.Н., Карнаухов Е.И. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 2. С. 45–51.
- [8] Григорьев А.Н., Павленко А.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 16. С. 76–81.
- [9] Grigoriev A.N., Pavlenko A.V. // IEEE Trans. on Dielectric and Electr. Insul. 2007. V. 14. N 4. P. 964–967.