

О ВЛИЯНИИ ТОЛЩИНЫ ФОЛЬГИ НА ОДНОРОДНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ФОЛЬГИ

ABOUT FOIL THICKNESS INFLUENCE ON FOIL EXPLOSION UNIFORMITY

А. Н. Григорьев, Е. И. Карнауков, А. В. Павленко
A. N. Grigoriev, E. I. Karnaukhov, A. V. Pavlenko

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина
 Russian Federal Nuclear Center – Institute of Technical Physics

Приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о влиянии толщины плоской электрически взрывающейся фольги на неоднородность и разновременность ее взрыва. В экспериментах с помощью кварцевых датчиков измерены амплитудно-временных профили давления в центральной и боковой (поперечно-краевой) областях плоской фольги; использовались фольги толщиной 14...100 мкм из алюминия, меди, титана и никелевого сплава 80НХС. Из полученных данных следует, что с увеличением толщины фольги происходит увеличение неоднородности и разновременности взрыва.

Temporal waveforms of pressure amplitude in central and peripheral regions of a flat electrically exploded foil 14...100 μm (copper, aluminum, nickel alloy 80NCS, titanium) have been measured. The measurements were performed using quartz pressure sensors arranged on the free surface of a dielectric substrate glued to the foil. When the foil thickness increases, the explosion uniformity decreases.

В работах [1-3] было установлено, что при электрическом взрыве плоской фольги (ЭВФ) наблюдается пространственная неоднородность («неплоскостность») распределения давления по площади фольги – взрыв начинается с краев фольги. Высказывалось предположение, что это связано со скинированием тока – начальным распределением плотности тока по краям фольги и последующим увеличением плотности тока в осевой области фольги.

Тем не менее, при ЭВФ все же имеется возможность создать плоскую ударную волну большой площади. Это, как было показано в работах [2, 3], может быть достигнуто путем использования фольг низкопроводящих металлов, таких как титан, свинец, сталь 08КП, никелевый сплав 80НХС. Снижение неоднородности взрыва фольги с увеличением ее удельного электрического сопротивления ρ (при прочих равных условиях) объяснялось определяющим влиянием скин-эффекта (распределением плотности тока по ширине фольги) т.к. характерный размер скин-слоя $\delta_{sk} \sim \rho^{0.5}$. Возникает резонный вопрос: каково влияние размеров фольги (толщина, ширина, длина) на неоднородность взрыва?

Одним из важных в практическом отношении факторов, влияющем на амплитуду давления и удельный механический импульс, является тол-

щина взрывающейся фольги. Исходя из предположения о влиянии скин-эффекта на неоднородность взрыва, следует ожидать, что с увеличением толщины фольги неоднородность взрыва будет расти.

В данной работе представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о влиянии толщины взрывающейся фольги на неоднородность и разновременность взрыва. В экспериментах использовались фольги из меди, алюминия, титана и никелевого сплава 80НХС.

Были проведены эксперименты для фольг различных толщин, изготовленных из одного металла при прочих равных условиях: фиксированных длине l_f и ширине b_f фольги, и фиксированной относительной введенной в фольгу энергии w/w_c (w – введенная в фольгу тепловая энергия, w_c – энергия сублимации взрывающегося металла). Аналогично работам [1–3] неоднородность формирования давления при ЭВФ определялась путем сравнения амплитудно-временных профилей давления в центральной и боковой (поперечно-краевой) областях (рис. 1(а)).

Количественно неоднородность взрыва фольги характеризует 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 определим 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.

Эксперименты проводились по схеме, приведенной на рис. 1(а). Кварцевые цилиндрические датчики давления размещали на свободную поверхность диэлектрической подложки (полиметилметакрилат толщиной 3 мм), подклеенной к взрывающейся фольге. Размеры датчиков составляли (диаметр / толщина): 10 / 3 мм (большинство опытов) или 8 / 2,5 мм (алюминий 14 и 100 мкм).

Электрический взрыв фольги осуществлялся на стенде, описанном в работах [3, 4], со следующими параметрами: емкость конденсаторной батареи C_o составляла 23 мкФ, индуктивность контура $L_c \sim 60$ нГн, зарядное напряжение $U_o = 22 \dots 44,7$ кВ. В отдельных экспериментах (алюминиевая фольга 14 и 100 мкм, шириной $b_f = 40$ мм) емкость C_o составляла 79 мкФ. В качестве взрывающейся фольги использовались фольги из меди, алюминия, титана, а также никелевого сплава 80НХС. При одинаковой длине $l_f = 100$ мм и ширине $b_f = 50$ мм (для алюминия 14 и 100 мкм – $b_f = 40$ мм) фольги, и фиксированной относитель-

ной введенной в фольгу энергии w/w_c варировалась номинальная толщина фольги $d_f = 14 \dots 100$ мкм. В экспериментах регистрировались амплитудно-временные профили давления, по которым определялся коэффициент неоднородности K_n и разновременность Δt_P взрыва.

На рис. 1 и 2 приведены типичные амплитудно-временные профили давления при взрыве алюминия (рис. 1(б)–(с)), никелевого сплава 80НХС (рис. 2(а)) и титана (рис. 2(б)).

На рис. 3(а) изображены полученные зависимости коэффициента неоднородности K_n от толщины взрывающейся фольги d_f . Отдельно следует отметить, что в опытах с алюминиевыми фольгами толщиной 14 и 100 мкм при $w \sim 1,3w_c$ ширина b_f была 40 мм и использовались датчики давления 8 / 2,5 мм, а емкость C_o составляла 79 мкФ. Данные обстоятельства могли послужить причиной повышения регистрируемой неоднородности взрыва.

Из рис. 3(а) следует, что с увеличением толщины фольги d_f происходит увеличение коэффициента неоднородности K_n . Одновременно с этим также происходит существенное увеличение разновременности Δt_P взрыва – с единиц нс (для 16 мкм медной фольги и 14...30 мкм алюминиевой фольги) до $\sim 100 \dots 150$ нс (для 30 мкм медной фольги и 50...100 мкм алюминиевой фольги) (рис. 3(б)). Эти факты свидетельствуют в пользу определяющего влияния неоднородного распределения плотности тока (скин-эффекта) по ширине фольги на неоднородность взрыва.

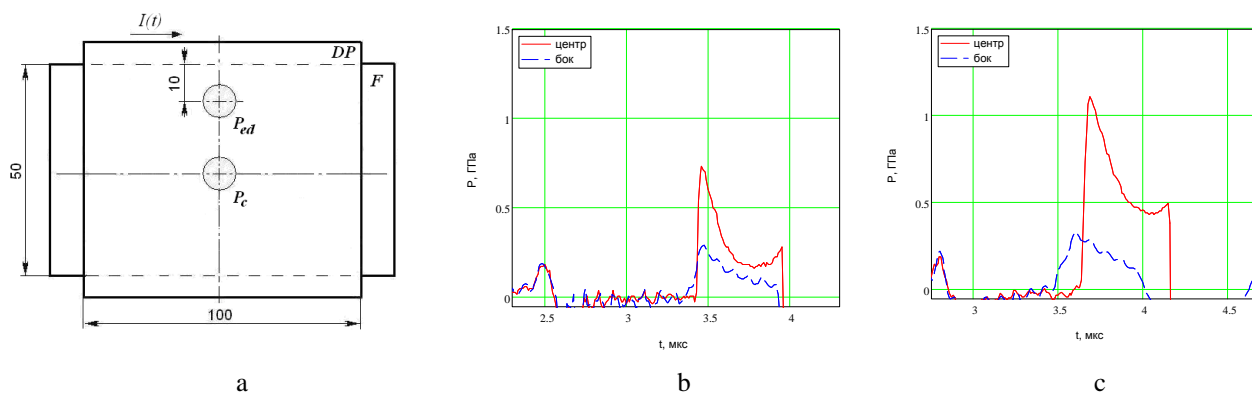


Рис. 1. Расположение датчиков давления на подложке в опытах с электрическим взрывом фольги (а) и импульсы давления, зарегистрированные датчиками при электрическом взрыве фольги алюминия АД1М: толщиной 30 мкм ($U_o = 27,3$ кВ, $w = 1,14 w_c$) (б) и толщиной 50 мкм ($U_o = 36,4$ кВ, $w = 1,18 w_c$) (с). Предимпульс является электромагнитной наводкой от взрыва фольги на датчик давления. DP – диэлектрическая подложка из полиметилметакрилата толщиной 3 мм; P_c и P_{ed} – давление, регистрируемое датчиками соответственно в центральной и боковой областях на свободной поверхности подложки, к которой подклеена взрывающаяся фольга; F – фольга

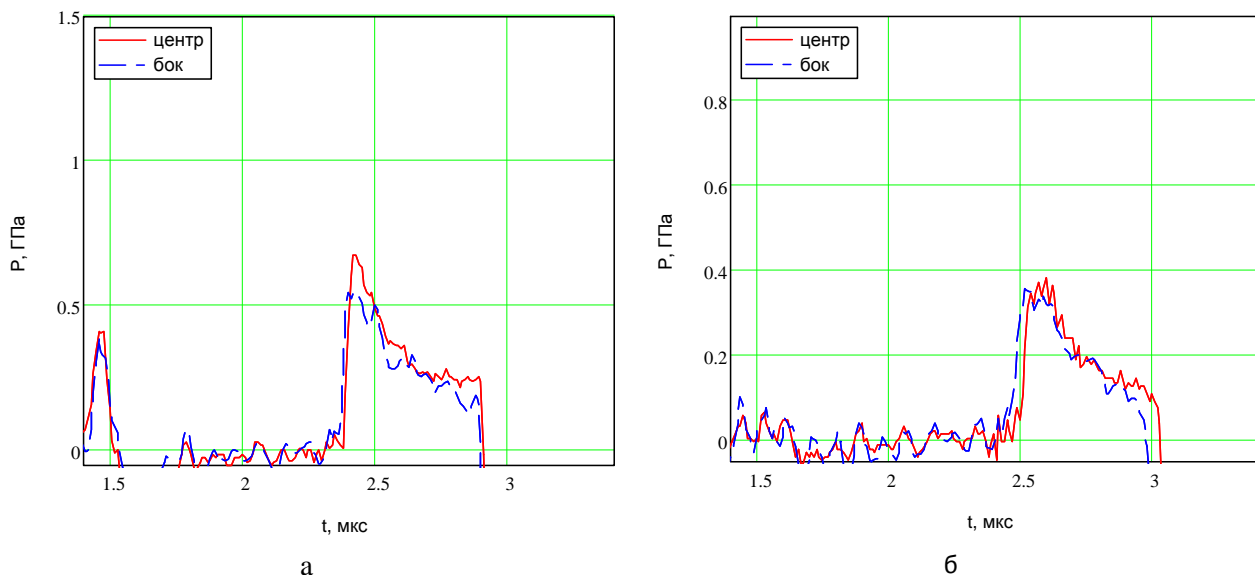


Рис. 2. Импульсы давления, зарегистрированные датчиками давления при электрическом взрыве: 20 мкм фольги из никелевого сплава 80НХС ($U_0 = 36,4$ кВ, $w = 1,18 w_c$) (а) и 50 мкм фольги из титана ВТ1-00 ($U_0 = 44$ кВ, $w = 1,08 w_c$) (б)

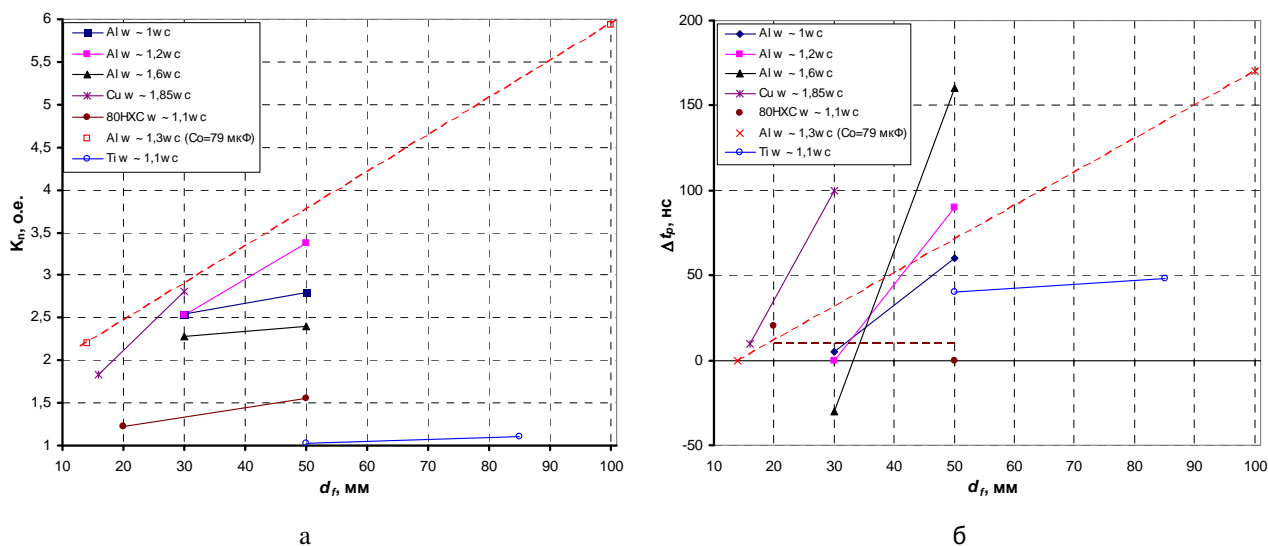


Рис. 3. Зависимости коэффициента неоднородности K_n (а) и разновременности Δt_p (б) от толщины взрывающей фольги d_f для фольг из алюминия, меди, никелевого сплава 80НХС и титана

В случае электрического взрыва фольги из низкопроводящих металлов – титана и никелевого сплава 80НХС наблюдается наилучшая однородность взрыва как тонкой, так и толстой фольги (с коэффициентами неоднородности: титан – $K_n \approx 1,03 \dots 1,1$, сплав 80НХС – $K_n \approx 1,2 \dots 1,6$) и полное воспроизведение формы амплитудно-временного профиля импульса давления в боковой и центральной области фольги (рис. 2(б)).

Таким образом, при взрыве всех фольг независимо от материала и значения введенной в

фольгу относительной энергии w/w_c наблюдается рост неоднородности взрыва K_n с увеличением толщины взрывающей фольги. Наряду с этим, увеличение толщины взрывающей фольги приводит к повышению разновременности формирования импульса давления.

Влияние толщины взрывающей фольги на коэффициент неоднородности K_n и разновременность Δt_p взрыва, подтверждают влияние скин-эффекта (распределения плотности тока по ширине фольги) на неоднородность взрыва.

Список литературы

1. Павленко А. В., Григорьев А. Н., Карнаухов Е. И. Неоднородность формирования волны давления при электрическом взрыве фольги // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 2. С. 45–51.

2. Павленко А. В., Григорьев А. Н., Карнаухов Е. И. Исследование влияния материала фольги на однородность электрического взрыва // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 20. С. 62–68.

3. Григорьев А. Н., Карнаухов Е. И., Павленко А. В. и др. Влияние материала фольги на однородность механического импульса давления при электрическом взрыве металлических фольг // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 1. С. 162–170.

4. Grigoriev A. N., Pavlenko A. V. Characteristics of a Multi-channel Surface Discharge Switch for a High Current Generator // IEEE Trans. on Dielectric and Electr. Insul. 2007. V. 14, N 4. P. 964–967.