

УДК 533.9

## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ФОЛЬГИ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОЛЬГИ

А. Н. Григорьев, Е. И. Карнаухов, А. В. Павленко, В. С. Седой

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики  
им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, Россия  
E-mails: alex\_nick@mail.ru, karnaukhovei1978gr@mail.ru, avpavlenko@vniitf.ru,  
vssedoi@yandex.ru

Приведены результаты экспериментального исследования амплитудно-временных профилей импульса давления в различных областях плоской электрически взрываваемой фольги из меди марки М1Т, алюминия марки АД1М, латуни марки Л63, никелевого сплава марки 80НХС, титана марки ВТ1-00 и свинца, плакированного оловом. Показано, что в случае высокопроводящей фольги взрыв начинается с краев фольги и затем давление существенно увеличивается в центрально-осевой области взрываваемой фольги. Показано также, что определяющим параметром, влияющим на однородность и одновременность взрыва, является удельное электрическое сопротивление взрываемого металла.

**Ключевые слова:** электрический взрыв фольги, материал фольги, однородность взрыва, давление, механический импульс.

Известно, что при электрическом взрыве фольги (ЭВФ) практически одновременно на всей площади нагружения возникает плоская ударная волна. Это позволяет инициировать взрывчатые вещества с помощью ЭВФ [1, 2] для исследования динамических характеристик материалов и испытания конструкций [3–6].

Измерить равномерность механического импульса давления при ЭВФ можно с помощью нескольких датчиков давления, расположенных в различных областях свободной поверхности диэлектрической подложки. Поэтому в настоящей работе измерения равномерности распределения давления при ЭВФ проводились с помощью кварцевых датчиков давления, расположенных в центральной и периферийной областях свободной поверхности диэлектрической подложки, к которой приклеена взрываемая фольга (рис. 1). Датчики работали в токовом режиме [7] и обеспечивали погрешность измерения  $\pm 5 \div 7 \%$ . Разрешающая способность датчика по времени составляла приблизительно 5 нс. В каждом опыте датчик и подложка разрушались в отраженной от свободной поверхности волне растяжения. Стекло марки К5 использовалось для исключения искажения формы импульса давления. Схема размещения датчиков давления приведена на рис. 1, в.

Электрический взрыв фольги осуществлялся на стенде, представляющем собой единый модуль с управляемым разрядником, в котором используется явление пробоя поверхности диэлектрика (см. рис. 1) [8]. При проведении экспериментов использовалась конденсаторная батарея емкостью  $C_0 = 23$  мкФ, индуктивность разрядного контура  $L_c \approx 60$  нГн;

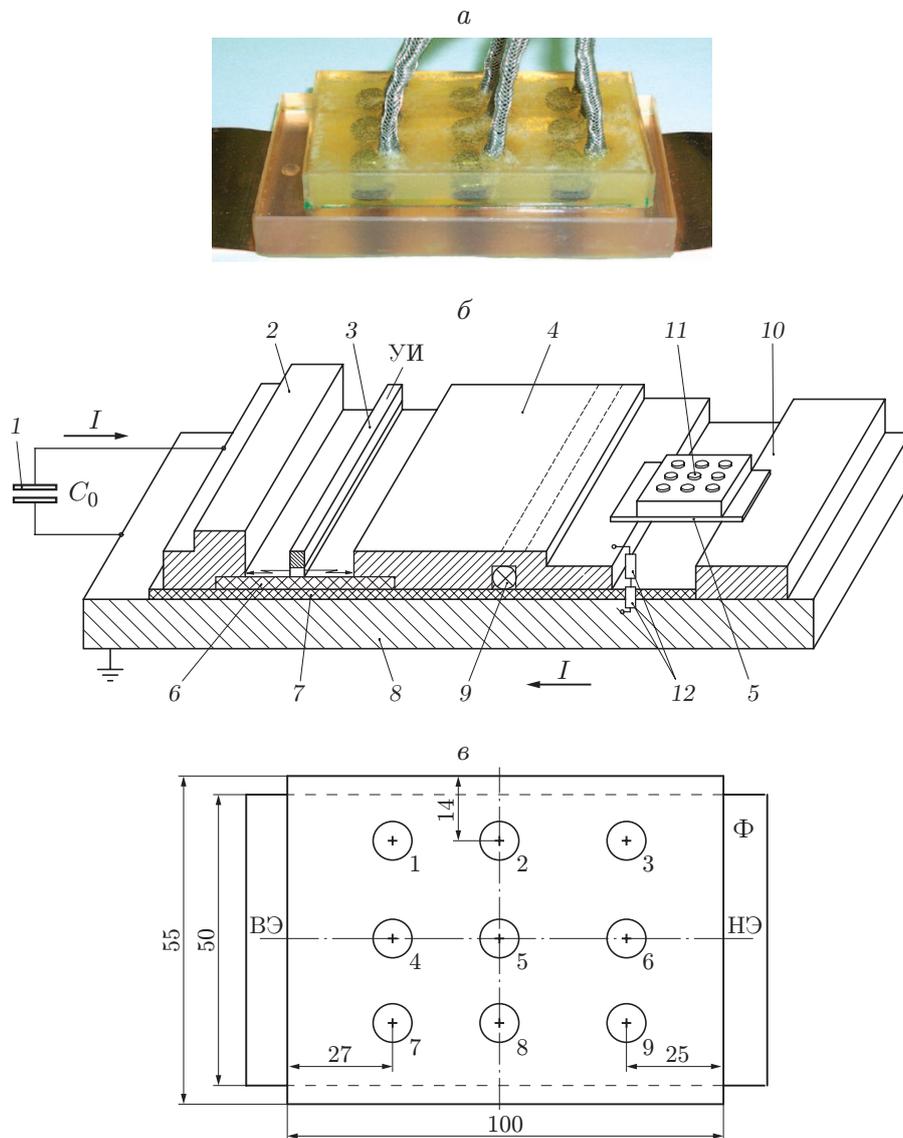


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) экспериментального стенда, а также схема расположения датчиков давления 1–9 на подложке с фольгой  $\Phi$  (в):

1 — конденсаторная батарея, 2 — высоковольтный электрод, 3 — управляющий электрод, 4 — коллектор, 5 — взрываема фольга, 6 — диэлектрик, 7 — изоляция, 8 — обратный токопровод, 9 — пояс Роговского, 10 — пластина (подложка), передающая давление, 11 — датчик давления, 12 — омический делитель напряжения, УИ — управляющий (иницирующий) импульс; ВЭ, НЭ — высоковольтный и низковольтный электроды

Параметры взрывааемых фольг

Материал фольги	$d_f$ , мкм	$d_m$ , мкм	$\rho_t$ , мкОм·см	$\rho_m$ , мкОм·см
Медь М2	16	15,50	1,78	1,94
Медь М1Т	50	45,80	1,78	1,83
Алюминий АД1М	50	47,20	2,70	2,36
Титан ВТ1-00	50	45,00	54,00	63,00
Свинец	50	45,20	20,60	19,00
Тантал	50	46,30	13,50	13,50
Латунь Л63Л	50	45,10	7,10	7,00
Сталь 08 КП	50	47,15	≈10,00	13,20
Сплав 80НХС	50	41,40	6,20	6,50

расстояние между взрывааемой фольгой и обратным токопроводом составляло 22 мм, зарядное напряжение  $U_0 = 22,0 \div 44,7$  кВ.

В качестве взрывааемой фольги использовались фольги длиной  $l = 100$  мм, шириной  $b = 50$  мм, изготовленные из меди марки М1Т, меди марки М2, алюминия марки АД1М, латуни марки Л63, стали марки 08КП, никелевого сплава марки 80НХС, титана марки ВТ1-00 и свинца, плакированного оловом. Марка и толщины используемых фольг, а также справочные [9–11] значения начального удельного сопротивления  $\rho_t$  приведены в таблице.

Масса фольги  $m$  измерялась с помощью электронных весов HR-202i фирмы “A and D” (погрешность измерения 0,01 мг). По результатам данных измерений определялась толщина фольги:

$$d_m = m/(bl\rho_f),$$

где  $\rho_f$  — плотность материала фольги.

Также с помощью микроомметра Ф415 (погрешность измерения 4,5 %) проводились измерения сопротивления  $R$  каждой фольги, по результатам которых определялось удельное электрическое сопротивление

$$\rho_m = Rbd_m/l.$$

Результаты определения толщины  $d_m$  фольги и удельного электрического сопротивления  $\rho_m$  приведены в таблице. Далее при указании толщины фольги используется ее номинальное значение  $d_f$ .

Регистрация тока  $I(t)$  в контуре осуществлялась с помощью пояса Роговского (см. рис. 1,б). Падение напряжения  $U_f(t)$  на взрывааемой фольге измерялось с помощью резистивного делителя напряжения. Сигналы тока, напряжение и давление регистрировались с помощью осциллографов Tektronix серий DPO 3034 и TDS 420 А.

Введенная в фольгу тепловая энергия рассчитывалась по осциллограммам тока и напряжения:  $W(t) = \int U(t)I(t) dt$ , где  $U(t) = U_f(t) - L_f dI/dt$  — падение омического напряжения на взрывааемой фольге. При этом полагалось, что индуктивность фольги  $L_f$  является постоянной и не зависит от времени. Удельная (на единицу массы взрывааемой фольги) энергия определялась по формуле  $w(t) = W(t)/m$ . Удельная энергия рассчитывалась до момента времени, соответствующего половине высоты ниспадающей кривой импульса перенапряжения и сравнивалась с удельной энергией сублимации взрываемого металла  $w_c$ .

На рис. 2 приведены амплитудно-временные профили давления, зарегистрированные при электрическом взрыве фольги из меди марки М2 толщиной 16 мкм, расположенной на подложке из стекла марки К5 толщиной 12 мм.

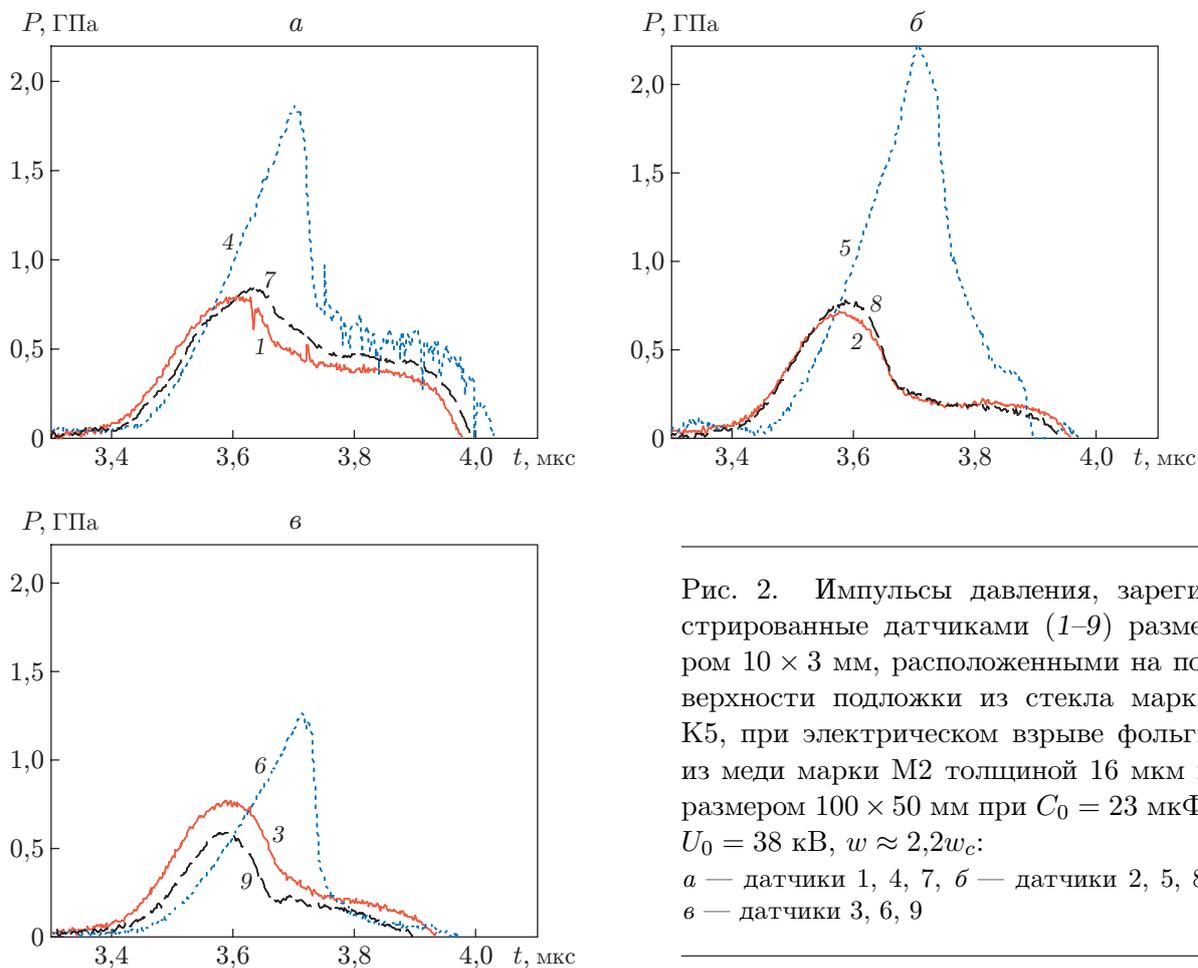


Рис. 2. Импульсы давления, зарегистрированные датчиками (1–9) размером  $10 \times 3$  мм, расположенными на поверхности подложки из стекла марки К5, при электрическом взрыве фольги из меди марки М2 толщиной 16 мкм и размером  $100 \times 50$  мм при  $C_0 = 23$  мкФ,  $U_0 = 38$  кВ,  $w \approx 2,2w_c$ :  
 а — датчики 1, 4, 7, б — датчики 2, 5, 8, в — датчики 3, 6, 9

Поскольку датчик имеет конечные размеры, измерялась средняя величина давления. Для построения пространственного распределения давления его значения в промежуточных (между датчиками) областях определялись путем линейной интерполяции значений, регистрируемых датчиками. На рис. 3 показано восстановленное пространственное распределение давления  $P$  в различные моменты времени  $t$  при электрическом взрыве фольги из меди марки М2 толщиной 16 мкм и размером  $100 \times 50$  мм. На рис. 2, 3 видно, что взрыв начинается с краев фольги, затем давление увеличивается в центральной области фольги.

Наибольшая неравномерность распределения давления на фольгу наблюдается в направлении, поперечном относительно направления тока (в центральной области фольги давление максимальное, в боковых (поперечно-краевых) областях — минимальное), поэтому в последующих экспериментах, для того чтобы определить максимальную неравномерность распределения давления при ЭВФ, регистрация амплитудно-временных профилей давления проводилась в двух областях — центральной и боковой датчиками 5, 2 (см. рис. 1, в). Это существенно упростило процесс подготовки сборок к экспериментам. Также в технологических целях в качестве диэлектрической подложки использовался полиметилметакрилат (ПММА) толщиной  $(3,0 \pm 0,1)$  мм (при использовании ПММА в качестве передающей среды имеет место существенная “деформация” формы импульса давления, обусловленная упруговязкопластическими свойствами ПММА [12]).

Предельная разновременность взрыва определялась путем сравнения амплитудно-временных профилей давления, зарегистрированных в центральной и боковой областях

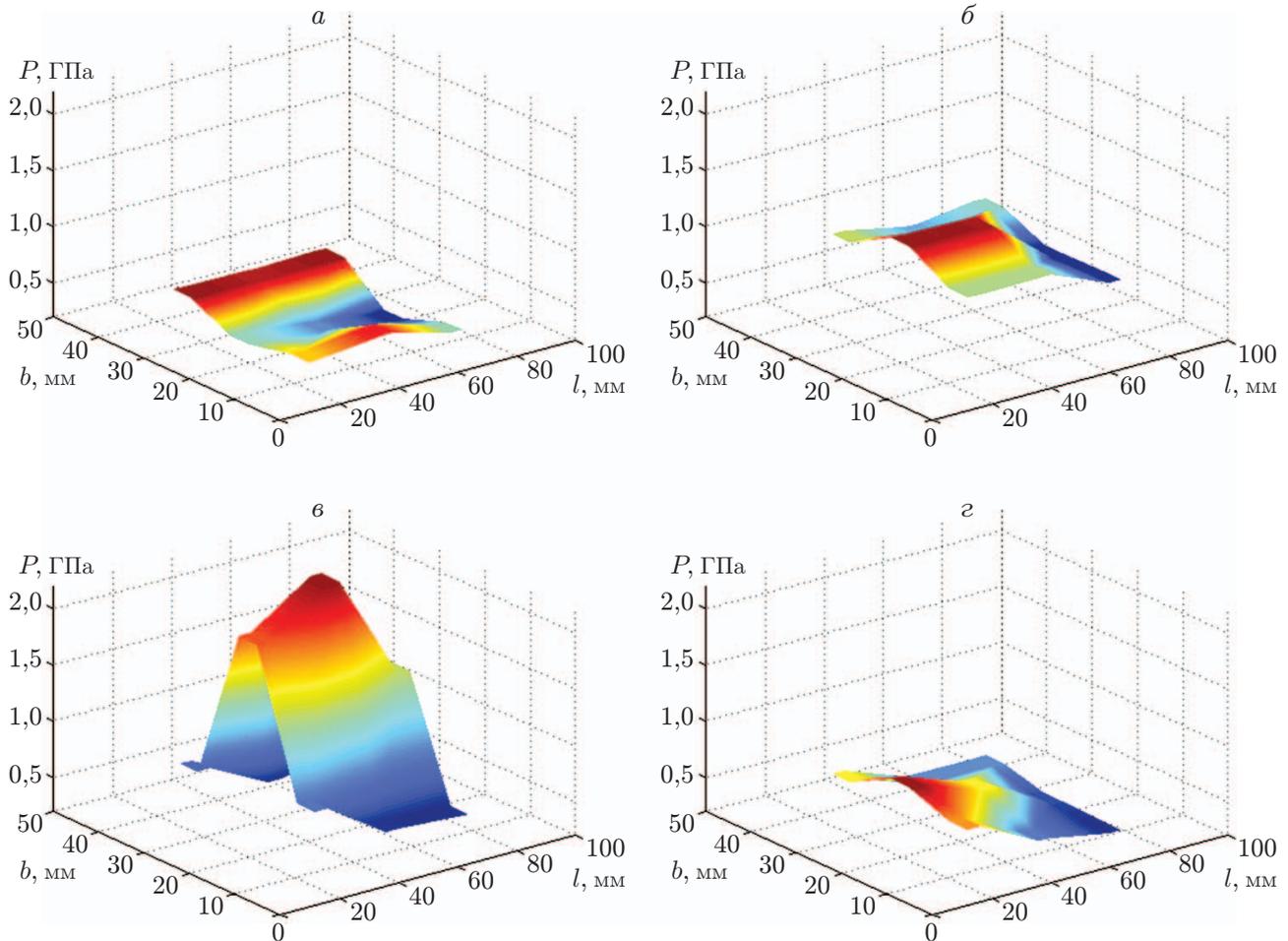


Рис. 3. Восстановленное пространственное распределение давления в различные моменты времени при электрическом взрыве фольги из меди марки М2 толщиной 16 мкм и размером 100 × 50 мм на подложке из стекла марки К5:  
 а —  $t = 3,50$  мкс, б —  $t = 3,60$  мкс, в —  $t = 3,71$  мкс, г —  $t = 3,85$  мкс

поверхности взрывающейся фольги. Для того чтобы количественно охарактеризовать неоднородность взрыва фольги, введем коэффициент неоднородности  $K_n$ :

$$K_n = P_{m.c}/P_{m.ed}.$$

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

Удельный механический импульс определим по формуле

$$J(t) = \int_0^{t_1} P(t) dt, \quad (1)$$

где  $P(t)$  — амплитудно-временной профиль давления, регистрируемый датчиком; в качестве границ интегрирования примем моменты времени прихода к датчику волны давления ( $t = 0$ ) и уменьшения давления до нуля ( $t = t_1$ ).

Аналогично введем коэффициент неоднородности удельного механического импульса:

$$K_J = J_c/J_{ed}.$$

Здесь  $J_c$ ,  $J_{ed}$  — вычисленные по формуле (1) удельные механические импульсы соответственно в центральной и боковой областях свободной поверхности подложки, на которой расположена взрываема фольга.

Максимальное значение разновременности давления определим по формуле

$$\Delta t_P = t_{m.c} - t_{m.ed},$$

а максимальное значение разновременности удельного механического импульса — по формуле

$$\Delta t_J = t_{Jc} - t_{Jed},$$

где  $t_{m.c}$ ,  $t_{m.ed}$  — время достижения максимального значения давления соответственно в центральной и боковой областях поверхности взрываема фольги;  $t_{Jc}$ ,  $t_{Jed}$  — время достижения максимального значения удельного механического импульса (по результатам регистрации датчиком давления) соответственно в центральной и боковой областях взрываема фольги.

Характерный размер скин-слоя определяется следующим образом:

$$\delta_{sk} = \sqrt{T\rho/(2\pi\mu\mu_0)}. \quad (2)$$

Здесь  $T$  — период колебаний тока;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная. Таким образом, при прочих равных условиях характерный размер скин-слоя зависит от величины  $\sqrt{\rho}$ .

В предположении, что разновременность взрыва (в различных точках поверхности взрыв происходит в различные моменты времени) обусловлена неравномерностью распределения плотности тока по ширине фольги вследствие диффузии магнитного поля в фольгу и соответствующего скин-эффекта, одним из факторов, определяющих разновременность ЭВФ, является удельное электрическое сопротивление фольги. Поэтому в дальнейших экспериментах исследовалось влияние материала фольги на равномерность распределения давления и разновременность ЭВФ.

Для того чтобы изучить влияние удельного сопротивления материала взрываема фольги на однородность взрыва, была проведена серия экспериментов, в которых при одной и той же номинальной толщине фольг  $d_f = 50$  мкм и фиксированных значениях  $l = 100$  мм,  $b = 50$  мм,  $w \approx 1,1w_c$  регистрировались амплитудно-временные профили давления и по ним определялись коэффициенты неоднородности  $K_n$ ,  $K_J$ , а также разновременности  $\Delta t_P$ ,  $\Delta t_J$  взрыва. Следует отметить, что обеспечить одно и то же значение  $w/w_c$  для фольг из различных металлов сложно вследствие невозможности точного (с погрешностью менее 10 %) определения ее значения по исходным параметрам контура и фольги; перед основным опытом с датчиками давления приходилось проводить 1–2 предварительных опыта без датчиков.

На рис. 4 приведены характерные амплитудно-временные профили давления при взрыве алюминия и свинца, плакированного оловом, и рассчитанные по ним удельные механические импульсы. Поскольку при взрыве фольг из стали марки 08КП и титана марки ВТ1-00 получены одинаковые коэффициенты неоднородности взрыва  $K_n = 1,03$ , для подтверждения экспериментальных результатов был проведен контрольный эксперимент с фольгой из стали марки 08КП при аналогичных начальных условиях (при этом подведенная к фольге относительная энергия уменьшилась с  $w/w_c = 1,08$  до  $w/w_c = 1,02$ , а коэффициент неоднородности увеличился до значения  $K_n = 1,29$ ).

На рис. 5,а приведены зависимости коэффициентов неоднородности взрыва  $K_n$ ,  $K_J$  от начального удельного электрического сопротивления материала взрываема фольги  $\rho$ , построенные на основе экспериментальных данных. На рис. 5 видно, что увеличение начального удельного сопротивления  $\rho$  материала взрываема фольги приводит к уменьшению неоднородности ее взрыва. На рис. 5,б для тех же фольг приведена зависимость

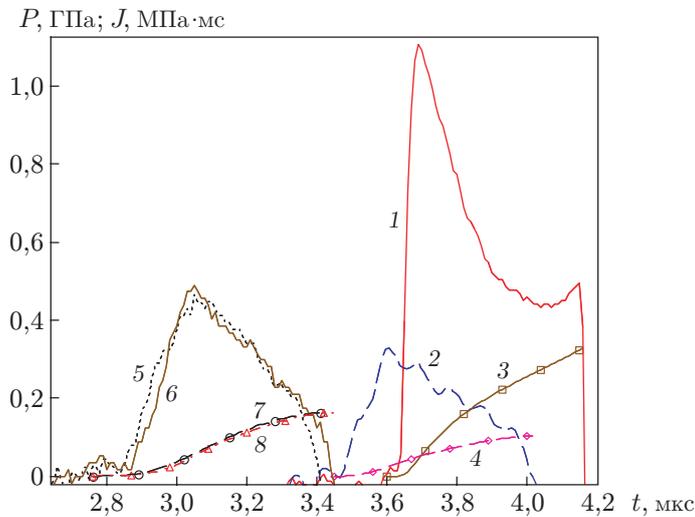


Рис. 4. Импульсы давления, зарегистрированные датчиками в центральной и боковой областях поверхности взрывающейся фольги (1, 2, 5, 6), и рассчитанные по ним удельные механические импульсы (3, 4, 7, 8) при электрическом взрыве фольг из алюминия марки АД1М ( $U_0 = 36,4$  кВ,  $w = 1,18w_c$ ) и свинца, плакированного оловом ( $U_0 = 22$  кВ,  $w = 1,17w_c$ ):

1, 2 —  $P_c$ ,  $P_{ed}$  для фольги из Al, 3, 4 —  $J_c$ ,  $J_{ed}$  для фольги из Al, 5, 6 —  $P_c$ ,  $P_{ed}$  для фольги из Pb, 7, 8 —  $J_c$ ,  $J_{ed}$  для фольги из Pb

разновременности  $\Delta t_P$  взрыва от начального удельного электрического сопротивления  $\rho$  материала фольги.

Следует отметить, что при одном и том же начальном удельном сопротивлении латуни марки Л63 ( $\rho \approx 7$  мкОм·см) и никелевого сплава марки 80НХС ( $\rho \approx 6,8$  мкОм·см) у последнего наблюдается существенно меньшая неоднородность взрыва (для фольги из сплава никеля марки 80НХС коэффициент неоднородности  $K_n = 1,56$ , для фольги из латуни марки Л63  $K_n = 2,53$ ); при этом также существенно различается разновременность взрыва (для фольги из сплава марки 80НХС  $\Delta t_P = 0 \div 50$  нс, для фольги из латуни марки Л63  $\Delta t_P = 200$  нс). Это может быть обусловлено тем, что основу (62–65 %) латуни составляет высокопроводящая медь, атомы которой одновременно являются матрицей для атомов цинка; при этом цинк, по сравнению с медью, имеет существенно меньшие температуры плавления и кипения. Также причиной такого существенного различия значений коэффициентов неоднородности и разновременности взрыва латуни марки Л63 и никелевого сплава марки 80НХС может быть различная динамика изменения удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости  $\mu$  (см. формулу (2)) в процессе нагрева фольг. При этом значение удельного электрического сопротивления никеля, составляющего основу сплава марки 80НХС, при плавлении приблизительно в пять раз больше соответствующего значения для меди, составляющей основу латуни марки Л63.

На рис. 4, 5 видно, что в случае ЭВФ из стали марки 08КП, свинца и титана наблюдается не только высокая степень однородности взрыва (с коэффициентом неоднородности  $K_n \approx 1,00 \div 1,29$ ), но и полное воспроизведение формы амплитудно-временного профиля импульса давления в боковой и центральной областях поверхности фольги.

Таким образом, в случае высокопроводящих фольг (медь, алюминий, латунь) наблюдается существенная неоднородность в формировании пространственно-временного профиля давления: в центрально-осевой области давление начинает увеличиваться позднее,

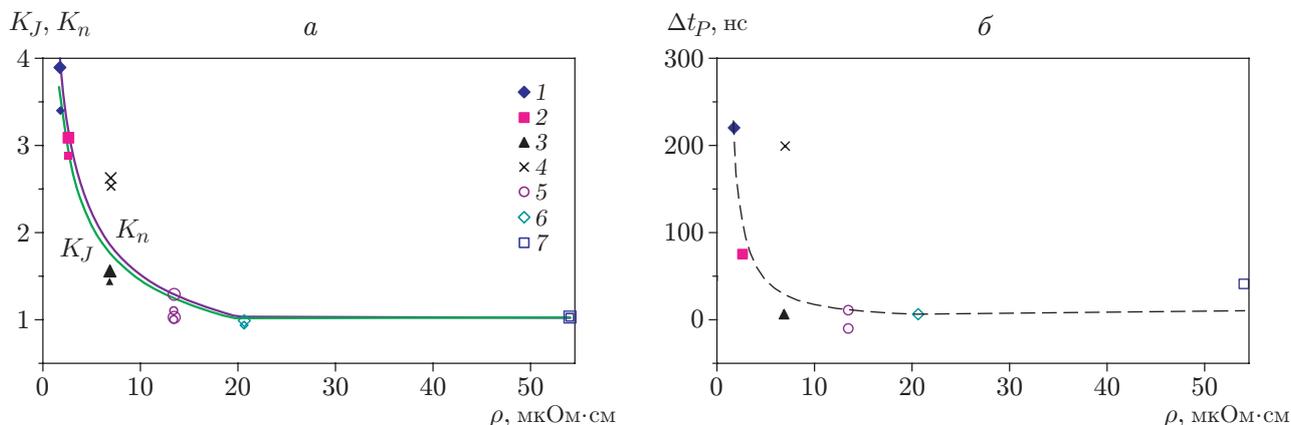


Рис. 5. Зависимости коэффициентов неоднородности  $K_n$ ,  $K_J$  (а) и разновременности  $\Delta t_P$  (б) от удельного электрического сопротивления  $\rho$  материала взрываваемой фольги при  $b = 50$  мкм,  $w \approx 1,1w_c$ : крупные точки —  $K_n$ , мелкие —  $K_J$ ; 1 — Cu, 2 — Al, 3 — никелевый сплав марки 80НХС, 4 — латунь марки Л63, 5 — сталь марки 08КП, 6 — свинец, плакированный оловом, 7 — титан марки ВТ1-00

чем в периферийной области, но достигает большего значения. Начало взрыва на краях фольги обусловлено, вероятно, наличием скин-эффекта тока на них и последующим увеличением плотности тока в осевой области фольги (одной из возможных причин, наряду с изменением производной тока, является начало нагрева и расширения краевых областей фольги и соответственно уменьшение высокопроводящего сечения фольги).

Увеличение начального удельного электрического сопротивления материала взрываваемой фольги приводит к уменьшению неравномерности распределения давления и разновременности его формирования. Существенное влияние удельного электрического сопротивления материала взрываваемой фольги на коэффициент неоднородности  $K_n$  и разновременность  $\Delta t_P$  взрыва, по-видимому, также свидетельствуют об определяющем влиянии скин-эффекта (распределения плотности тока по ширине фольги) на неоднородность взрыва.

Авторы выражают благодарность М. Ф. Герашенко за помощь в подготовке экспериментальных сборок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Байков А. П., Белого В. А., Искольдский А. М. и др. Исследование электрического взрыва фольг // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 2. С. 286–291.
2. Байков А. П., Войтенко А. Е., Искольдский А. М., Нестерихин Ю. Е. Иницирование взрыва по поверхности заряда // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 2. С. 323–325.
3. Keller D., Penning J. Exploding foils — the production of plane shock waves and the acceleration of thin plates // Exploding wires. V. 2. N. Y.: Plenum Press, 1962. P. 259–262.
4. Острик А. В., Петровский В. П. Особенности откольного разрушения полимерных цилиндрических тел при неосесимметричном импульсном нагружении // ПМТФ. 1993. № 1. С. 133–137.
5. Pavlenko A. V., Afanas'ev V. N., Kucherenko Yu. A., et al. Possibilities of laboratory complex “GNUV” for studying the mechanical properties of materials in the wide range of impulse loading // Proc. of the 14th IEEE Intern. pulsed power conf., Dallas (USA), June 15–18, 2003. S. 1, 2003. P. 902–904.

6. **Зайцев А. Д., Острик А. В., Петровский В. П. и др.** Определение ударно-волновых характеристик композиционных материалов посредством электрического взрыва проводников // Конструкции из композиц. материалов. 2001. № 2. С. 30–35.
7. **Graham R. A., Neilson F. W., Benedick W. B.** Piezoelectric current from shock-loaded quartz — a submicrosecond stress gauge // J. Appl. Phys. 1965. V. 36, N 5. P. 1775–1783.
8. **Grigoriev A. N., Pavlenko A. V.** Characteristics of a multi-channel surface discharge switch for a high current generator // IEEE Trans. Dielectric Electr. Insul. 2007. V. 14, N 4. P. 964–967.
9. **Физические** величины: Справ. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. **ГОСТ 10160-75.** Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Введ. 01.01.1976.
11. **ГОСТ 18394-73.** Фольга свинцовая, плакированная оловом, и оловянная. Введ. 01.01.1974.
12. **Григорьев А. Н., Павленко А. В.** Давление при электрическом взрыве металлических фольг // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 18. С. 65–72.

*Поступила в редакцию 16/Х 2014 г.*

---