

Из формулы (3) можно получить выражение для кинематического коэффициента вязкости:

$$\nu = \frac{UR^3}{l_c^2}.$$

По этой формуле, зная скорость и длину непрерывной части струи для заданного радиуса выемки, можно приближенно оценивать вязкость различных металлов. Такая оценка была проведена для сплава Вуда:

$$\nu \approx 10^4 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Результаты исследований выхода плоской ударной волны на полусферическую выемку в металлах позволяют сделать следующие выводы относительно размеров и скорости возникающих при этом струй:

1. Поперечный размер струи линейно возрастает с увеличением радиуса полусферической выемки.

2. Длина струи пропорциональна квадратному корню из числа Рейнольдса.

3. Скорость струй слабо зависит от радиуса полусферической выемки и в наших экспериментах зависит только от материала исследуемых образцов.

*Поступила в редакцию
14/VIII 1972*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, С. К. Годунов и др. ФГВ, 1972, 7, 1.
2. И. Д. Захаренко, В. И. Мали. Горение и взрыв. М., «Наука», 1971.
3. S. K. Godunov, A. A. Deribas a. o. Journ. Comp. Phys., 1970, 5, 3.
4. В. А. Симонов. ФГВ, 1971, 7, 2.
5. М. А. Лаврентьев. УМН, 1957, 12, 4.

УДК 533.99

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ФОЛЬГ

*А. П. Байков, В. А. Белаго, А. М. Искольдский,
Л. С. Герасимов, Ю. Е. Нестерихин
(Новосибирск)*

Основная часть опубликованных работ по исследованию электрического взрыва проводников относится к взрывающимся проволочкам. Работы по электрическому взрыву фольг (ЭВФ) носят в основном прикладной характер — рассматриваются вопросы получения плоских и цилиндрических ударных волн [1, 2], метания тонких пластин [1], прерывания тока в системах с индуктивным накоплением энергии [3]. Для перечисленных приложений существенным является выяснение условий однородности ЭВФ, однако их изучению уделено, по нашему мнению, недостаточно внимания.

Цель данной работы — выяснить условие однородности ЭВФ и возможность применения фольги в качестве распределенного детонатора.

В работе [4] было показано, что при начальных плотностях тока $j \geq 10^8$ А/см² для проводников с $d \geq 10^{-3}$ см взрыв имеет однородный характер. Поэтому при проведении экспериментов размеры фольги и параметры LC-контура выбирались так, чтобы плотность тока через фольгу перед взрывом находилась в диапазоне 10^7 — 10^8 А/см².

Постановка эксперимента

Алюминиевая фольга (толщина 10^{-3} см, длина 15 см и ширина $2 \div 4$ см) взрывалась в воздухе. В качестве накопителя энергии использовался конденсатор емкостью $C = 2,6 \cdot 10^{-6}$ Ф и рабочим напряжением до $5 \cdot 10^4$ В. Волновое сопротивление контура составляло $\sim 0,35$ Ом. Коммутация осуществлялась воздушным многоззорным разрядником. Схема эксперимента и измерительная аппаратура показаны на рис. 1. Исследование ЭВФ проводилось с помощью следующих методик.

Осциллографическая методика. Ток в контуре измерялся малоиндуктивным шунтом, напряжение на взрывающейся фольге — омическим делителем. Сигналы с датчиков записывались осциллографом ОК-21, который был помещен в экранированную камеру.

По осциллограммам $I(t)$ и $U(t)$ (рис. 2, б) находилась зависимость относительного сопротивления фольги (R) от величины удельной введенной энергии $^1(\omega) - R(\omega)$.

Оптическая методика. Процесс взрыва фольги фотографировался электронно-оптическим фоторегистратором «Кадр-4-ЗИС» [5] со временем экспозиции $\tau \approx 2 \cdot 10^{-8}$ с и интервалом между кадрами $15 \cdot 10^{-8}$ с; в хронографическом режиме (щель ориентирована вдоль фольги) полное время записи составляло $8 \cdot 10^{-7}$ с.

Скорость ударной волны, образующейся в воздухе при ЭВФ, измерялась с помощью интерферометра Майкельсона, в рабочем плече которого помещалась взрывающаяся фольга. Регистрация интерферограмм велась фоторегистратором СФР-2М в хронографическом режиме. Для формирования поля интерференции использовалась синхронизованная с процессом вспышка света от взрывающейся медной проволоочки.

Рентгеновская методика. Форма фронта ударной волны в момент отрыва ее от поверхности взрывающейся фольги регистрировалась импульсной рентгеновской фотосъемкой. Источником излучения служила откачная рентгеновская трубка, с бериллиевым выходным окном. Параметры рентгеновского импульса: длительность импульса (по полуширине) составляла $5 \cdot 10^{-8}$ с, эффективная жесткость излучения ≈ 8 кэВ, доза за один импульс на выходном окне трубки $\approx 0,8$ Р. Точность совпадения с исследуемым процессом составляла $\approx 2 \cdot 10^{-8}$ с.

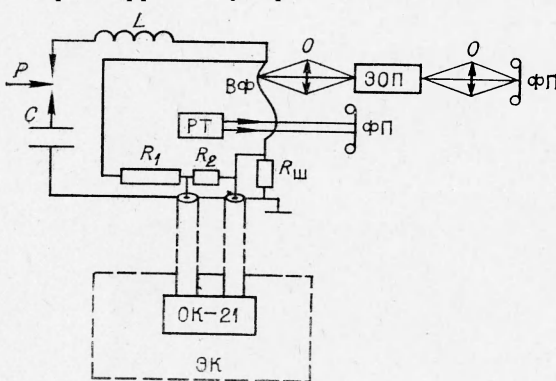


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

C — конденсатор КММ 2,5/50; P — коммутирующий разрядник; L — индуктивность контура; $ВФ$ — взрывающаяся фольга; R_1, R_2 — сопротивления омического делителя, $R_{ш}$ — сопротивление токового шунта, $РТ$ — рентгеновская трубка, $ЭОП$ — электронно-оптический преобразователь «Кадр-4-ЗИС», $О$ — объектив, $ФП$ — фотопленка; $ЭК$ — экранированная камера.

¹ В расчетах использовалась только составляющая омического падения напряжения на фольге — $U_R(t)$.

Общие закономерности электрического взрыва фольги

На рис. 3 приведена кривая зависимость $R(\omega)$, на которой можно выделить три характерных участка, соответствующих различным фазам процесса электрического взрыва фольги.

В первой фазе происходит плавление фольги (энергия $\bar{W}_{пл.}$) и нагрев жидкого металла. Сопротивление металла в жидкой фазе растет практически линейно в зависимости от величины введенной энергии и продолжается вплоть до момента времени t_1 , которому соответствует точка перегиба на осциллограмме напряжения $U(t)$ (см. рис. 2). Величина энергии, введенной в фольгу к моменту t_1 , растет с увеличением $d\omega/dt$.

Вторая фаза характеризуется резким ростом сопротивления вследствие взрывного разлета материала фольги и заканчивается к моменту t_2 , которому соответствует максимальное значение напряжения на осциллограмме $U(t)$.

В третьей фазе сопротивление уменьшается вследствие развития ионизационных процессов в промежутке между зажимами, в которых крепилась фольга.

Условие однородности электрического взрыва фольги

Фотоснимки, сделанные при взрыве алюминиевой фольги в хронографическом и кадровом режиме, показаны на рис. 2. Из рассмотрения рис. 2, а следует, что интенсивное свечение начинается с момента t_1 и продолжается в течение $200 \div 300$ нс, после чего яркость свечения резко уменьшается. В указанном интервале скорость ввода энергии в фольгу достигает максимальных значений $d\omega/dt > 10^{10}$ Дж/г при плотностях тока $j > 10^7$ А/см².

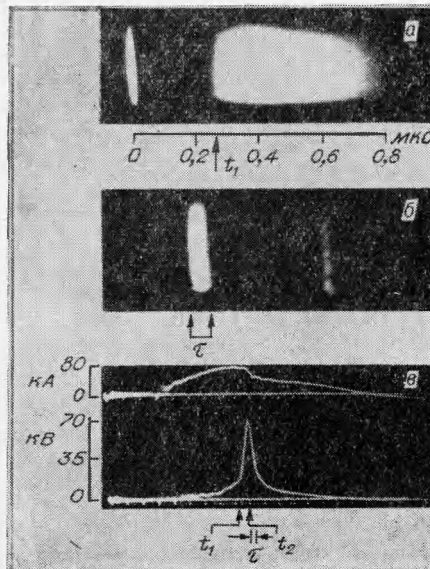


Рис. 2. Фотосъемка свечения фольги в хронографическом (а) и в кадровом (б) режиме; осциллограммы $I(t)$ и $U(t)$. (Зарядное напряжение $U=35$ кВ, метки времени 0,2 мкс.)

Из рассмотрения фотоснимков, полученных при скоростной фотосъемке процесса ЭВФ, следует:

а) максимальная интенсивность свечения поверхности взрывающейся фольги приходится на вторую фазу взрыва и частично на начало третьей фазы;

б) структура свечения однородна по длине фольги (временные неоднородности не более 10^{-8} с)¹.

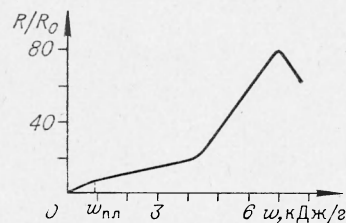


Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления взрывающейся фольги от введенной удельной энергии $R(\omega)$ ($U=35$ кВ).

¹ Временное разрешение ЭОП в хронографическом режиме при времени записи $8 \cdot 10^{-7}$ с было $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ с.

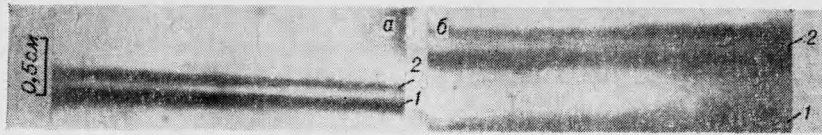


Рис. 4. Теневые рентгеновские снимки формы ударной волны:

а) через 0,5 мкс; б) через 2,5 мкс после окончания второй фазы электрического взрыва.
1 — фольга; 2 — ударная волна.

Однородное свечение фольги в процессе взрыва свидетельствует о достаточно равномерном распределении температуры по ее поверхности и об отсутствии влияния магнитогидродинамических неустойчивостей на характер электрического взрыва в его первых двух фазах. Косвенным подтверждением однородности ЭВФ может служить плоская форма ударной волны (рис. 4). Отход ударной волны от поверхности взрывающейся фольги происходит в конце второй фазы взрыва.

Эксперименты по возбуждению ударных волн в атмосфере

Во второй фазе ЭВФ на прилегающий к фольге слой воздуха действует кратковременный импульс давления, вызванный взрывным разлетом материала фольги (время действия $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-7}$ с). В результате образуется ударная волна, начальная скорость которой, найденная после обработки интерферограмм (рис. 5), составляет $\sim 3 \cdot 10^5$ см/с, с той же скоростью перемещается внешняя граница продуктов разлета¹. При $t \gg \Delta t$ закон перемещения фронта ударной волны, найденный из анализа интерферограмм, хорошо описывается соотношением

$$x = At^\alpha,$$

где A — постоянная, а $\alpha \approx \frac{3}{5}$. Таким образом, движение волны автомодельно с показателем $\alpha = \frac{3}{5}$ [6].

Зарегистрирована сложная структура скачка плотности, которая состоит по существу из двух ударных волн, идущих друг за другом с малым временным интервалом. Механизм образования подобной структуры качественно можно объяснить следующим образом. Первая ударная волна вызвана разлетом материала фольги, вторая возникает

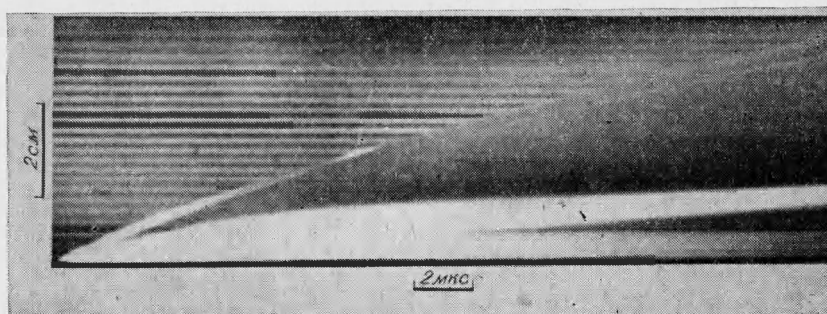


Рис. 5. Интерферограмма скачка плотности во фронте ударной волны.

¹ Во второй фазе, взрыва в фольгу вводится энергия $\approx 2,5$ кДж/г; 1,1 кДж/г трансформируется в кинетическую энергию разлетающегося металла, а 1,4 кДж/г идет на дальнейший его нагрев.

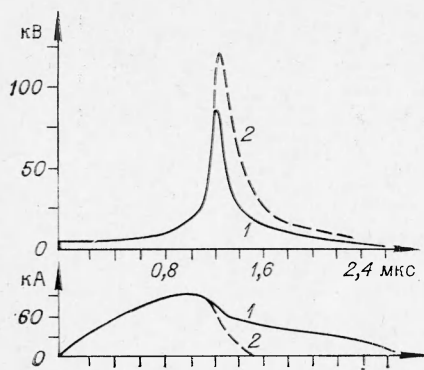


Рис. 6. Осциллограммы $U(t)$ и $I(t)$ при взрыве фольги в воздухе (1) и зажатой между резиновыми прокладками (2).

в момент электрического пробоя промежутка, причем пробой происходит за фронтом первой ударной волны после отсоединения ее от поверхности продуктов разлета.

В том случае, когда создавались условия, препятствующие отсоединению ударной волны, шунтированию промежутка не наблюдалось. Обрыв тока в этих условиях происходил более эффективно (рис. 6). Взрывающиеся однородно фольги могут быть использованы в качестве генераторов плоских и цилиндрических ударных волн. На рис. 7 приведен снимок сходящейся ударной волны в воздухе, полученный с помощью фоторегистратора СФР-2М в хронографическом режиме. Скорость ударной волны в момент схлопывания составляет $\sim 7 \cdot 10^5$ см/с.

Приведем грубую оценку возможности использования взрывающихся фольг в качестве распределенного детонатора. Можно надеяться получить плоскую детонацию при условии, когда удельная энергия, вводимая в фольгу при электрическом взрыве, соизмерима с энерго-содержанием взрывчатого вещества (ВВ). В настоящих экспериментах

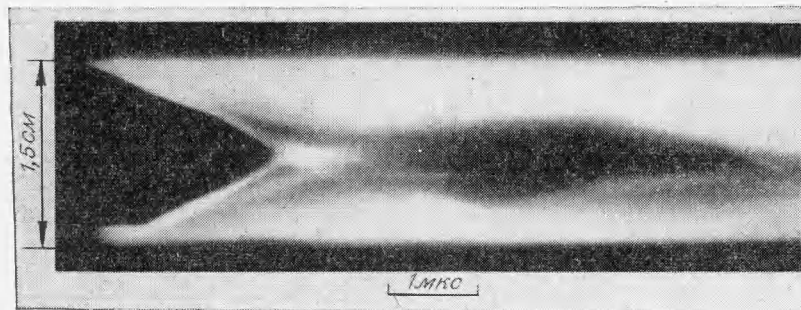


Рис. 7. Фотоснимок свечения сходящейся цилиндрической ударной волны.

в фольгу до момента пробоя вводилась энергия $w \approx 7$ кДж/г (удельная энергия на единицу поверхности 150 Дж/г·см²), а характерная величина энерго-содержания распространенных взрывчатых веществ составляет ~ 4 кДж/г. Первые опыты по инициированию ВВ с помощью электрически взрывающихся фольг дали положительные результаты. Было проведено инициирование гексогена фольгой площадью ≈ 50 см² при использовании конденсатора КММ 2,5/50, заряженного до напряжения $U=40$ кВ.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность за полезные дискуссии А. А. Дерibasу и А. Н. Дремину.

Поступила в редакцию
30/VIII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Келлер, Дж. Пеннинг. Электрический взрыв проводников. Т. 2. М., «Мир», 1965, стр. 299.

