

ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ВЫЕМКОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

В. И. Мали

(Новосибирск)

В работах [1—2] рассмотрено соударение пластин при сварке взрывом с учетом вязкости и экспериментально определены коэффициенты вязкости наиболее распространенных металлов. Оказалось, что кинематический коэффициент вязкости ν зависит от смещения z точек в направлении скорости точки контакта U_k следующим образом:

$$\nu = \frac{U_k}{z} \frac{\delta_1 \delta_2 (y - \delta_1)^2}{(\delta_1 + \delta_2)^2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2},$$

где δ_1, δ_2 — толщины свариваемых пластин; γ — угол соударения; y — координата по вертикали к направлению скорости точки контакта.

Рассматривая в качестве характерного размера выражение для радиуса кривизны свободной поверхности в окрестности точки контакта, полученное в работе [3]

$$R = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \frac{U_k^2}{c_0^2}} \cdot \frac{2\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \sin^2 \frac{\gamma}{2},$$

можно оценить числа Рейнольдса $Re = \frac{U_k R}{\nu}$, при которых произошло течение металлов, наблюдавшееся в экспериментах работ [1—2]. Расчеты показывают, что в данных условиях значения чисел Рейнольдса не превышают 10. Представляет интерес продолжить рассмотрение различий между металлами по таким механическим признакам, как степень деформируемости при взрывных нагрузках и особенности внутренних сил взаимодействия.

В настоящей работе будут изложены экспериментальные результаты исследования течений различных металлов при выходе плоской ударной волны на свободную поверхность с полусферической выемкой. Наличие полусферической выемки на свободной поверхности, так же как и клиновидной выемки в [4], позволяет выделить и сфокусировать течение металла. Однако переход от клиновидной к полусферической выемке дает существенное преимущество: в задаче появляется характерный размер.

Поскольку толщина металла от заряда до вершины выемки сохранялась постоянной, а размеры взрывчатого вещества были так велики, что их дальнейшее увеличение практически не влияло на размеры возникающей из полусферы струи, то единственным характерным размером в данной задаче можно считать радиус полусферы.

В работе получена экспериментальная зависимость безразмерной длины струи от числа Рейнольдса, позволяющая предсказывать глубину пробивания мишеней струями из материалов с известной вязкостью.

Поскольку при выходе ударной волны в металле на полусферическую выемку образуются струи со скоростями порядка нескольких километров в секунду,

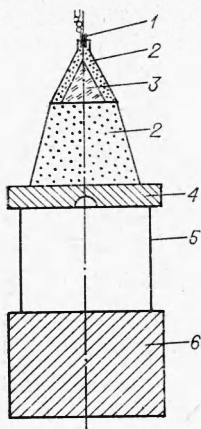


Рис. 1. Схема установки.

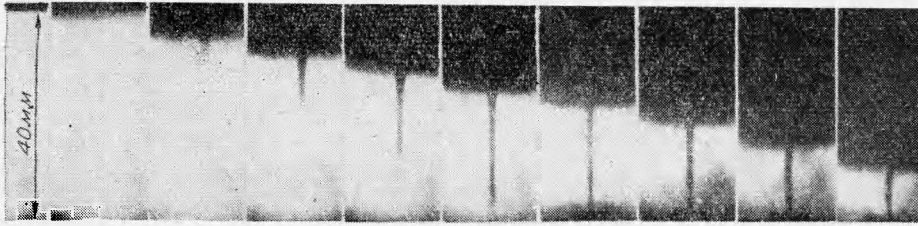


Рис. 2. Покадровая съемка движения струи из полусферической выемки радиуса 4 мм в меди. Время между кадрами 4 мкс.

использовались такие высокоскоростные приборы, как СФР-2М и импульсный рентген ПИР-4.

На СФР производилась теневая покадровая съемка процесса движения струй за пределами полусферической выемки. Подсветка осуществлялась импульсной лампой «ИФК-500», скорость вращения зеркала составляла обычно 60 000 об/мин. Экспериментальная сборка показана на рис. 1. Детонар 1 инициировал заряд 2, 3 с генератором плоской детонационной волны. В качестве основного взрывчатого вещества использовался литой сплав тротила с гексогеном 50/50. Плоская часть детонационного фронта составляла 20 мм в диаметре. Использовались образцы 4 диаметром 40 мм с радиусами полусферических выемок от 1 до 7 мм. Образцы устанавливались на подставках 5, определяющих расстояние H до мишени 6, не превышавшее в опытах на СФР 40 мм. Толщина металла от заряда до выемки сохранялась равной 14 мм. С помощью оптической методики удалось зафиксировать разрушение струй при малых радиусах выемок и превращение их в сфокусированный поток частиц. Например, для алюминиевого сплава Д16 этот критический радиус составляет 1 мм, а для стали он на порядок больше. Также было установлено увеличение среднего диаметра струи с ростом радиуса полусферической выемки. Типичные снимки движения струй, полученные на СФР, приведены на рис. 2. Проводились также исследования зоны поражения мишеней. Фотография микрошлифа одной из мишеней показана на рис. 3.

Более подробную информацию о процессе образования, движения и разрушения струй удалось получить при рентгеновской съемке, которая производилась на четырех импульсных установках, позволяющих получать четыре снимка процесса через определенные интервалы времени. Кроме образцов с такими же размерами, что использовались на СФР, использовались образцы диаметром 75 мм с радиусом выемок до 20 мм. Толщина слоя металла от заряда ВВ до вершины полусферы составляла 14 мм. Для соблюдения геометрического подобия в экспериментах был увеличен заряд ВВ. Диаметр основного заряда ТГ 50/50 составлял 80 мм, диаметр плоской части детонационного фронта — 40 мм, высота — 100 мм. Расстояние от образцов до мишеней менялось от 50 до 300 мм.

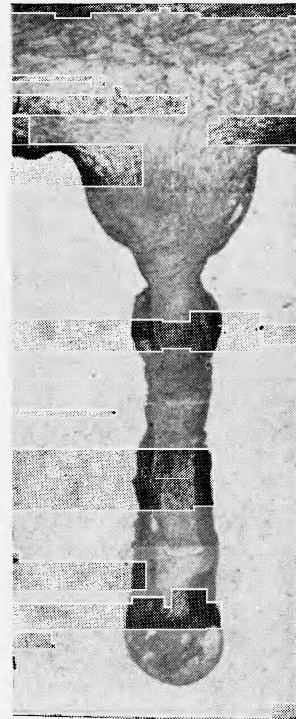


Рис. 3. Микрошлиф стальной мишени, пробитой струей из медной выемки радиуса 4 мм. $\times 8$.

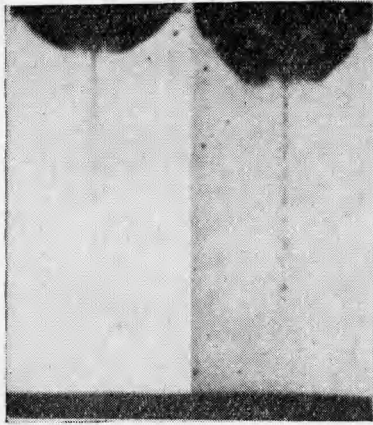


Рис. 4. Импульсные рентгеновские снимки струи из медной выемки радиуса 4 мм. Время между кадрами 10 мкс, скорость струи (первого элемента) 2,5 км/с.

Рентгеновские исследования позволили установить, что диаметр струй увеличивается линейно с увеличением радиусов полусферических выемок, подтвердили результаты оптических экспериментов по разрушению струй при очень малых радиусах выемок (рис. 4), позволили с большей точностью, чем на СФР, определить скорость струй для таких материалов, как медь, сталь, Д16, свинец, сплав Вуда, парафин. Некоторые характерные рентгеновские снимки приведены на рис. 5, 6. Результаты экспериментов со стальными мишенями обобщены в таблице.

Система определяющих параметров для задачи о движении струи вязкой несжимаемой жидкости из полусферической полости

$$U, \rho_c, \mu, R, \delta_0, l_c,$$

из которых получили безразмерные комбинации:

$$\frac{\delta_c}{R}; \frac{l_c}{R}; \frac{U\delta_c\rho_c}{\mu} = \frac{U\delta_c}{\nu}.$$

Здесь U — скорость струи, δ_c, μ — плотность и динамический коэффициент вязкости, l_c, δ_c — соответственно длина непрерывной части и средний диаметр струи.

Результаты непосредственных измерений толщин струй на рентгенограммах показывают, что для всех проведенных экспериментов выполняется соотношение:

$$\frac{\delta_c}{R} = k_1, \quad (1)$$

где k_1 — некоторая постоянная и ее значения для различных материалов изменяются от 0,4 до 0,6. Воспользовавшись значениями коэффи-

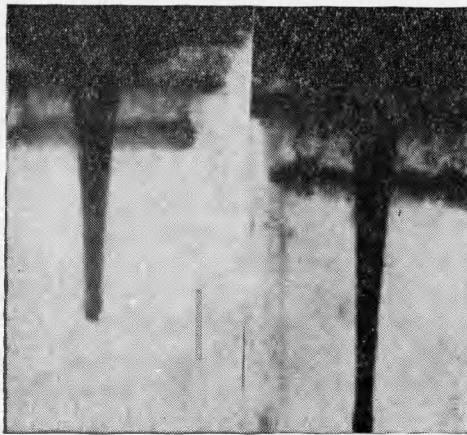


Рис. 5. Импульсные рентгеновские снимки струи из медной выемки радиуса 15 мм. Время между кадрами 10 мкс, скорость струи 2,7 км/с.

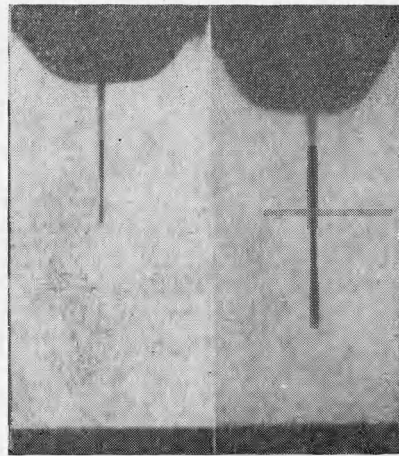


Рис. 6. Рентгеновские снимки из свинцовой выемки радиуса 4 мм. Время между кадрами 10 мкс, скорость струи 2,7 км/с.

Материалы	R, см	δ_c , см	$\frac{U \cdot 10^{-5}}{c}$	$\frac{v \cdot 10^{-4}}{c}$	H, см	l_M , см	l_c , см	$\frac{U \delta_c}{v}$	$\frac{l_c}{R}$
Медь $\rho = 8,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	0,4	0,16	2,5	2,5	4	1,5	1,4	1,6	3,5
	1,0	0,4	2,5	2,5	10	5	4,7	4,3	4,7
	1,2	0,5	2,7	2,5	10	6,5	6,1	5,2	5,1
	1,5	0,6	2,7	2,5	15	7,2	6,7	6,5	4,5
Д16 $\rho = 2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	0,4	0,2	4,3	2,5	4	1,25	2,1	3,8	4,2
	1,5	0,8	4,0	2,5	15	6,2	10,5	12,8	7,0
Свинец $\rho = 11,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	0,4	0,2	2,7	0,5	4	2	1,4	10	4,2
	0,95	0,4	2,8	0,5	10	9,2	7,6	23	8,0
	1,5	0,65	2,8	0,5	15	14	11,6	36	7,8
Сталь $\rho = 7,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	0,4	0,2	1,1	5,5	4	0,4	0,4	0,44	1,0
	1,0	0,5	1,8	5,5	10	1,6	1,6	1,8	1,6
	1,5	0,8	1,7	5,5	6	2,4	2,4	2,5	1,6
Парафин $\rho = 0,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	1,5	0,94	3,5	—	10	2	—	—	—
Сплав Вуда $\rho = 10 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	1,5	0,8	2,8	—	10	7,1	—	—	—

циентов вязкости металлов, полученными в работе [1], можно построить экспериментальную зависимость безразмерной длины струи l_c/R от числа Рейнольдса $U\delta_0/v$. На рис. 7 нанесены экспериментальные точки для различных металлов и различных радиусов полусферических выемок. Искомую зависимость можно описать соотношением:

$$\frac{l_c}{R} = k_2 \sqrt{\frac{U\delta_c}{v}}. \quad (2)$$

Значения k_2 для различных материалов изменялись от 1,4 до 2. Если подставить k_1 из (1) в (2), то получим:

$$\frac{l_c}{R} = k_2 \sqrt{k_1} \sqrt{\frac{UR}{v}}. \quad (3)$$

Из определенных выше величин k_1 и k_2 следует, что величина $k_2 \sqrt{k_1}$ близка к единице.

Поскольку непосредственная регистрация параметра l_c представляла существенные трудности, связанные с синхронизацией, то вместо нее использовалась величина глубины поражения мишени l_M из того же материала, что и струя. В случае, когда материалы струи и мишени были различными, производился расчет l_c по формуле:

$$l_c = l_M \sqrt{\frac{\rho_M}{\rho_c}},$$

полученной в работе [5]. Здесь ρ_M , ρ_c — плотности мишени и струи соответственно.

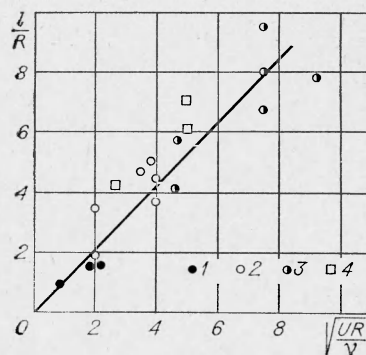


Рис. 7. Зависимость безразмерной длины струи $\frac{l_c}{R}$ от $\sqrt{\frac{UR}{v}}$. 1 — сталь; 2 — медь; 3 — свинец; 4 — Д16.

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.