

средственных измерений радиусов воронок и полостей с фотографией, приведенных в [4]. Результат расчета для $h_0 = 33$ мм, $\alpha = 0,45$, $n = 0,7$ представлен на рис. 2, где видно хорошее соответствие между расчетным и фактическим профилями. На рис. 3 приведен разрез воронки, полученной при взрыве заряда массой 80 кг на глубине 2,5 м с $n = 0,94$. Объем видимой воронки составил 36 м³. На этом же рисунке показан расчетный контур истинной воронки выброса со значениями $\alpha = 0,3$ и $e = 0,77$. В заключение следует отметить удовлетворительное соответствие между полученными результатами и выводами работы [4].

Авторы благодарят С. С. Григоряна за обсуждение и сделанные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика взрыва/Под редакцией К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
2. О. А. Арутюнов, Р. З. Камалян, В. С. Малков. Изв. АН АрмССР. Механика, 1982. 5.
3. А. А. Вовк. Основы прикладной геодинамики взрыва. Киев: Наукова думка, 1976.
4. А. П. Ромашов. Особенности действия крупных подземных взрывов. М.: Недра, 1980.
5. В. М. Кузнецов. Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977.
6. Дж. Черри.— В кн.: Механика, № 6. М.: ИЛ, 1967.
7. Н. В. Зволинский, Г. С. Подъяпольский, Л. М. Флитман. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1973, 1.

Поступила в редакцию 26/IV 1985,
после доработки — 5/VIII 1985

ВТОРИЧНОЕ СЖАТИЕ И РАЗГРУЗКА ДЮРАЛЮМИНИЯ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов

(Новосибирск)

Ударные адиабаты металлов в диапазоне напряжений в несколько десятков гигапаскалей определяются в основном их сжимаемостью. Упругие и прочностные свойства металлов проявляются в ходе кривой разгрузки из напряженного состояния на диаграмме напряжение — деформация [1]. Для получения дополнительной информации о напряженном состоянии за фронтом ударной волны (УВ) в [2] предложено строить кривые вторичного сжатия, что позволяет также определять предел текучести за фронтом УВ самосогласованным методом [3].

В [3, 4] кривую разгрузки рассчитывали по $x - t$ -диаграмме процесса соударения ударника с мишенью и по форме импульса продольного напряжения, при этом разгрузка рассматривалась, как простая волна. Это приближение ограничивает тип возможных течений в волне разгрузки, так как такие свойства среды, как вязкость, проявляются в фазовом сдвиге между профилями напряжения и массовой скорости [5]. Другой недостаток этого метода состоит в систематической ошибке, связанной с неконтролируемой толщиной ударника в момент соударения, что приводит к завышению скоростей упругих волн разгрузки [6]. Общий подход для расчета напряжения и удельного объема в любой точке волны предложен в [5]. В этом методе при интерпретации профилей напряжение — время, зарегистрированных в нескольких лагранжевых координатах в образце, используется минимум предположений о среде.

Цель настоящей работы — построение зависимостей продольное напряжение — деформация для волн вторичного сжатия и разгрузки в алюминевом сплаве. По этим зависимостям определялось напряженное состояние за фронтом первой УВ интенсивностью в 40 ГПа и оценивался предел текучести самосогласованным методом. Напряжения в 40 ГПа представляли интерес ввиду того, что являются верхней границей диапазона напряжений, в котором определялась зависимость предела текучести

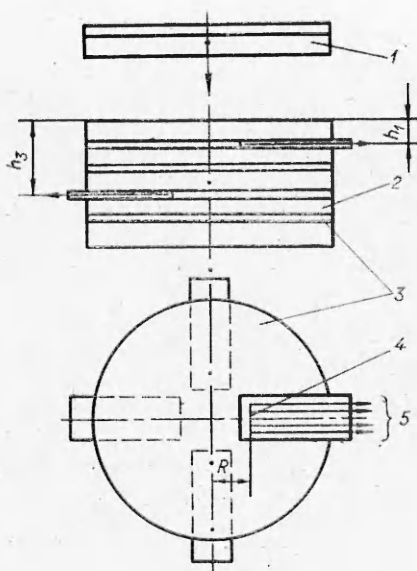


Рис. 1. Схема эксперимента.
1 — ударник; 2 — мишень; 3 — фольга; 4 — манганин; 5 — токоподводы.

от интенсивности УВ и в котором наблюдается значительный разброс экспериментальных данных [7].

Экспериментальная техника. Дюралюминиевая пластина (толщина 8, диаметр 80 мм) ускорялась продуктами взрыва до $\approx 3,6$ км/с и генерировала импульс напряжения в мишени из алюминиевого сплава Д16. Для получения двух ударных волн использовалась двухслойная пластина из дюралюминия и титана толщиной 4,8 и 2 мм соответственно. Оба типа ударников разгонялись взрывным устройством, состоящим из генератора плоской волны и заряда из ТГ 50/50 (диаметр 120, высота 60 мм). Отношение масс ВВ и ударника оставалось постоянным, поэтому

амплитуда УВ от сплошного ударника и первой УВ от составного были близки.

Мишень набиралась из пластин, между которыми располагались слои дюралюминиевой фольги толщиной 0,24 мм (рис. 1). В фольге сделан прямоугольный вырез, в который при сборке вклеивался манганиновый датчик. Активный элемент датчика — полоска (толщина 15 мкм, ширина 0,5 мм, длина 3 мм), изготовленная из манганина марки МнМцЗ-12, присоединялся по четырехточечной схеме токоподводами из медной фольги толщиной 20 мкм. Суммарная толщина фторопластовой изоляции 0,24 мм. По глубине мишени на расстоянии $R = 12$ мм от оси располагались четыре датчика, выводы которых развернуты на 90° относительно друг друга. Для уменьшения воздушных зазоров между пластинами поверхности образцов полировались, а при сборке стягивались болтами. Время разрешения измерительной аппаратуры $\approx 0,05$ мкс. Длительность передних фронтов сигналов при прохождении УВ амплитудой 40 ГПа составляет $\approx 0,07$ мкс, что совпадает с оценкой времени реверберации двух волн во фторопластовой изоляции датчика. За фронтом первой УВ из-за сжатия прокладки и увеличения скорости звука в ней время разрешения датчика уменьшается. Вычисленное время реверберации двух волн $\approx 0,03$ мкс.

Калибровочные зависимости для манганина различаются на несколько процентов в зависимости от состава и технологии приготовления измерительного элемента [8]. Для повышения точности экспериментальных результатов используемый тип датчиков специально калибровался. Датчики располагались в мишени из Д16, нагружаемой ударниками из того же материала со скоростями $\approx 2,4$ и $3,6$ км/с. В опытах измерялись относительное изменение сопротивления датчика $k = \Delta R/R_0$ и скорость свободной поверхности мишени, по которой определялось продольное напряжение σ . Точность измерения этих величин ± 1 и $\pm 1,5\%$ соответственно. В диапазоне 20—40 ГПа результаты для УВ описывались соотношением

$$\sigma[\text{ГПа}] = 51,9k - 7,6. \quad (1)$$

Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от прямой $\pm 2\%$.

Для учета гистерезиса на разгрузочной части сигнала проведены опыты, в которых двумя датчиками регистрировался выход УВ из Д16 во фторопласт. Первый располагался внутри дюралюминия и фиксировал относительное изменение сопротивления в ударной волне k_1 . Волна разгрузки, приходящая от границы Д16 — фторопласт, поднимала уровень сигнала до $k_{2.2}$. Второй датчик устанавливался на границе Д16 — фторопласт

и регистрировал амплитуду сигнала k_2 , соответствующую УВ во фторопласте. Продольное напряжение в прямой УВ и в отраженной волне разгрузки в Д16 рассчитывалось по k_1 и k_2 по калибровке (1): $k_1 = 0,894$, $\sigma_1 = 38,8$ ГПа, $k_2 = 0,635$, $\sigma_2 = 25,4$ ГПа. Относительное изменение сопротивления первого датчика, который нагружался УВ до уровня σ_1 и частичной разгрузкой до уровня σ_2 , составляло $k_{p2} = 0,68$, что на 7% превышало амплитуду второго датчика, нагруженного однократной УВ до уровня σ_2 . В качестве калибровочной зависимости на разгрузке использовалась линейная интерполяция между точками (k_1, σ_1) и (k_{p2}, σ_2)

$$\sigma_p = \sigma_1 - 62,6(k_1 - k_p), \quad (2)$$

σ_p и k_p — текущие значения соответствующих величин на разгрузке.

Скорости волн сжатия и разгрузки. Для каждого типа ударников проведено по четыре эксперимента с одновременной регистрацией профилей $\sigma_i(t)$, где i — номер датчика. Для определения скоростей волн сжатия и разрежения осуществлялась временная привязка передних фронтов сигналов к траектории первой УВ. Ударная адиабата Д16 задавалась в виде [9] $U = c_0 + su$ ($c_0 = 0,5355$ см/мкс, $s = 1,345$, $v_0 = 0,3591$ см³/г). Из осциллограмм определялся промежуток времени между фронтом первой УВ и моментом прихода на датчик «головы» волны сжатия или разрежения. По этим данным и лагранжевым координатам датчиков h , строилась $h-t$ диаграмма. Обработка всех экспериментальных точек методом наименьших квадратов показала, что в интервале $h = 0,6 - 2,5$ см первые характеристики этих волн прямолинейны со среднеквадратичным отклонением $\sim 2\%$. Тангенс угла наклона этих характеристик принимался за лагранжеву скорость звука (c) в данном состоянии.

Ниже приведены результаты определения этих скоростей при различных начальных состояниях дюралюминия: a — состояние за фронтом УВ при однократном сжатии, b и e — состояния за фронтом первой УВ и второй волны при двукратном сжатии соответственно.

σ , ГПа	c , км/с	c_r , км/с
a 40,9	12,1±0,3	10,3
b 39,1	11,1±0,2	10,1
e 45,2	12,1±0,3	—

Для сравнения в правом столбце приведены скорости звука c_r , рассчитанные по наклону ударной адиабаты методом [10] в предположении уравнения состояния Ми — Грюнайзена с коэффициентом $\Gamma = \Gamma_0 V/V_0$, $\Gamma_0 = 2,09$. Эти расчеты соответствуют гидродинамическому приближению и могут служить оценкой объемной скорости звука. Из сопоставления следует, что скорость звука для волны вторичного сжатия в состоянии b (c_b) занимает промежуточное положение между скоростью упругой разгрузки в состоянии a (c_a) и объемной скоростью звука c_{r_b} . Полученное значение c_b отличается от результатов [2, 11], в которых скорости упругого предвестника в волнах сжатия и разгрузки совпадали. Это различие, по-видимому, вызвано затуханием амплитуды упругого предвестника с расстоянием до величины, меньшей амплитудного разрешения, которое оценено в 0,5 ГПа.

Кривые вторичного сжатия и разгрузки. На регистрируемых сигналах отмечались амплитудные искажения, вызванные неоднородностью состояния по толщине ударника из-за реверберации в нем волн сжатия и разрежения и переходными процессами в кабеле и источнике тока, что приводило к появлению ступеньки за передним фронтом (длительность $\sim 0,2$ мкс, амплитуда $\sim 98\%$ от полной). В отдельных случаях наблюдалось шунтирование датчика или скол вершины импульса из-за перекоса фронта волны относительно плоскости датчика. Для дальнейшего анализа с помощью калибровок (1), (2) составлены две серии профилей $\sigma_i(t)$ для каждого типа ударника (рис. 2). Индекс i в дальнейшем относится к номеру профиля в серии. При этом в одной выборке объединялись профили из тех опытов, в которых при одинаковых h сигналы полностью

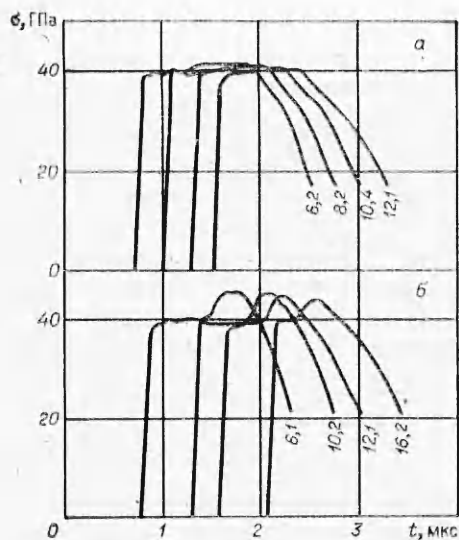


Рис. 2. Профиль $\sigma_i(t)$ для однократной УВ (а) и двукратного сжатия (б). Цифры — координаты датчиков в мм.

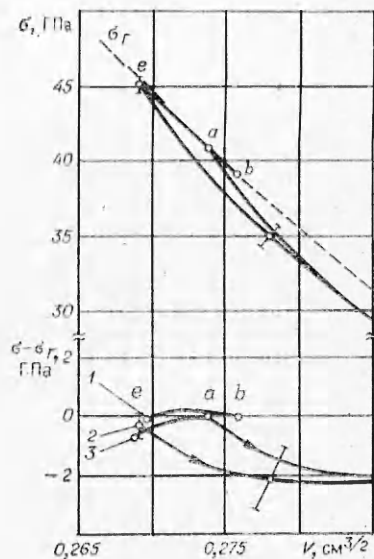


Рис. 3. $\sigma - v$ -диаграмма, σ_γ — ударная адиабата.

Кривые вторичного сжатия: 1 — $m=2$, $i=3$; 2 — $m=1$, $i=2$; 3 — $m=2$, $i=2$. Стрелками указано направление изменения состояния при разгрузке.

совпадали. Кроме того, профили этих двух серий удовлетворяли следующим требованиям: разброс амплитуды полки $\leq 3\%$, интервал $h_{i+1} - h_i \leq 4$ мм.

Профили $\sigma_i(t)$ численно анализировали по методу [12]. Значения массовых скоростей $u_i(t)$ и удельного объема $v_i(t)$ вдоль траектории датчиков определяли при интегрировании уравнений Эйлера и непрерывности. Для вычисления производных $(\partial\sigma/\partial h)_t$ и $(\partial u/\partial h)_t$, входящих в подынтегральные выражения, строили вспомогательные траектории, восстанавливающие поля $\sigma(h, t)$ и $u(h, t)$ в области, охваченной датчиками. Вспомогательные траектории проводили через узловыи точки (σ_{ij}, t_{ij}) на профилях сигналов, где j — номер траектории. Интервал разбиения $\sigma_{i, j+1} - \sigma_{ij} \sim 0,5$ ГПа, $j = 0 - 12$ на волне сжатия и $j = 13 - 36$ на волне разгрузки. Траектории подгоняли к узлам на экспериментальных профилях методом наименьших квадратов в линейном ($m - 1$) и квадратичном ($m = 2$) приближениях (m — степень подгонного полинома). В качестве «нулевой» траектории использовали траекторию первой УВ интенсивностью σ_a или σ_b . Уравнение $h = Ut$ (U — скорость первой УВ) задает проекцию «нулевой» траектории на плоскость $h - t$.

Результаты расчетов фазовых траекторий датчиков показаны на рис. 3. Начальные состояния обозначены точками a и b на ударной адиабате. Положение кривой вторичного сжатия относительно $\sigma_\gamma(v)$ зависело от способа построения вспомогательных траекторий. При $m = 2$ фазовые траектории расходились на плоскости $\sigma - v$. Для кривых разгрузки расходимость на уровне $\sigma = 35$ ГПа составляла 0,4 и 2% по v при $i = 2, 3$ и 1,4 соответственно. Увеличение расходимости в последнем случае связано с неопределенностью $(\partial\sigma/\partial h)_t$ на границах области $h - t$ [12], поэтому эти траектории не анализировали. В случае $m = 1$, что при равных интервалах разбиения по σ всех профилей эквивалентно приближению простой волны, фазовые траектории с разными i практически не расходятся и дают усредненный результат по сравнению с приближением $m = 2$.

Чтобы оценить ошибки в положении фазовых траекторий, на экспериментальные профили $\sigma_i(t)$ накладывали возмущения $\delta\sigma$, различной величины и знака в зависимости от i . Полученные при обработке этих профилей фазовые траектории оказывались смещенными относительно невоз-

Номер датчика						Номер датчика					
1	2	3	4	3	3	1	2	3	4	3	3
$\delta \sigma, \%$				$\delta v, \%$	$\delta Y, \%$	$\delta \sigma, \%$				$\delta Y, \%$	$\delta Y, \%$
0	1	2	3	0,2	-50	2	-2	2	-2	-0,9	50
0	-1	-2	-3	-0,3	60	-2	2	-2	2	0,8	-45

мущенных. В таблице приведены величина и знак начального возмущения и отклонения точки d на фазовой траектории от невозмущенного значения. На рис. 3 нанесены типичные отклонения для точек e и d , которые могут быть оценкой точности построения кривых.

Промежуточная кривая между точками b и e и кривые разгрузки на рис. 3 получены при $m = 1$. Линии вторичного сжатия be для обоих способов приближения практически прямолинейны, что является следствием стационарности профиля второй волны. Точка e лежит ниже σ_r , и в пределах 2% ход кривой вторичного сжатия совпадает с ударной адиабатой. Линии разгрузки не имеют выделенной точки, соответствующей напряжению начала течения, и приближаются к поверхности пластического течения асимптотически. Взаимное расположение кривых вторичного сжатия, разгрузки и ударной адиабаты на $\sigma - v$ -диаграмме согласуется с упругопластической моделью, дополненной предположением о деформированном упрочнении. Будем считать, что скорость деформации в интервале h , в котором измерены волновые профили, одинакова для волн сжатия и разгрузки. Тогда можно применить самосогласованный метод [3] определения динамического предела текучести Y :

$$\sigma_+(v_a) - \sigma_-(v_a) = 4/3 \cdot Y,$$

где σ_+ и σ_- — верхняя и нижняя предельные поверхности для Y . Построенные кривые вторичного сжатия показали, что $\sigma_+(v)$ совпадает с $\sigma_r(v)$, а величина $\sigma_-(v_a)$ может быть определена экстраполяцией к точке a участка пластического течения кривой разгрузки. При использованных предположениях $Y = 1,5 \pm 0,75$ ГПа, где в качестве ошибки указано отклонение кривой разгрузки из-за возмущения профилей (см. таблицу).

Измеренное значение Y совпадает с оценкой максимальных сдвиговых напряжений, проведенной в [11]. Однако в [2, 11] кривые вторичного сжатия идут выше ударной адиабаты. Это различие, а также результаты измерения скоростей c_a и c_b могут быть связаны с эффектами, зависящими от скорости деформации [13]. В настоящей работе измерения проводились на расстоянии $h_1 + \delta \approx 10$ мм от плоскости формирования второй волны (δ — толщина ударника). В интервале h , в котором проведены опыты, ширина фронта второй волны составляет 0,15–0,2 мкс, что соответствует средней скорости деформации $\epsilon \approx 2 \cdot 10^5$ с⁻¹. В [2, 11] ϵ была выше, так как интервал измерений включал нестационарный участок формирования второй волны. Поэтому полученные результаты позволяют предположить, что в диапазоне напряжений в несколько десятков гигапаскалей кривые вторичного сжатия и разгрузки на плоскости $\sigma - v$ являются функциями не только состоящими за фронтом УВ, но и зависят от скорости деформации в волнах сжатия и разгрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. R. Fowles. J. Appl. Phys., 1961, 32, 8, 77.
2. А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ПМТФ, 1976, 2, 146.
3. J. R. Asav, J. Lipkin. J. Appl. Phys., 49, 7, 4242.
4. P. J. A. Fuller, J. H. Price. Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D), 1969, ser. 2, 2, 275.
5. R. Fowles, R. F. Williams. J. Appl. Phys., 1970, 41, 1, 360.
6. А. А. Воробьев, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ПМТФ, 1974, 5, 94.
7. Л. В. Альтшулер. ФГВ, 1983, 19, 5, 140.
8. Г. И. Канель, Г. Г. Вахитова, А. Н. Дремин. ФГВ, 1978, 14, 1, 130.
9. Compendium of shock wave data. University of California, Livermore, 1977.
10. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, И. П. Дудолодов. ЖЭТФ, 1967, 53, 6, 1967.

11. J. R. Asay, L. C. Chhabildas.— In: Shock Waves and High — Strain — Rate Phenomena in Metals M. A. Meyer and L. E. Murr. N. Y.— L.: Plenum Press, 1981.
12. L. Seaman. J. Appl. Phys. 1974, 45, 10, 4303.
13. L. M. Barker, C. D. Lundergan, W. Herrmann. J. Appl. Phys., 1964, 35, 4, 1203.

Поступила в редакцию 14/VI 1985

ОБ ОСОБЕННОСТИ ПРОФИЛЯ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ВВ, СОДЕРЖАЩИМ ДОБАВКУ, ПРЕТЕРПЕВАЮЩУЮ ПОЛИМОРФНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

С. В. Пятрнев, С. В. Першин, А. Н. Дремин, А. В. Ананьин
(Черноголовка)

В [1] обнаружены изломы на зависимостях скорости детонации D от начальной плотности ρ_0 различных смесей тринитротолуола (ТНТ) и гексогена с 25% графита и графитоподобного нитрида бора ($\text{BN}_{\text{ГР}}$). Показано, что появление изломов обусловлено влиянием на процесс детонации полиморфных превращений, протекающих в веществе добавки в зоне химической реакции. Представляло интерес зарегистрировать профиль массовой скорости детонационной волны в надежде обнаружить на нем особенность, обусловленную этим влиянием.

В опытах по магнитоэлектрической методике [2] использовался П-образный датчик из алюминиевой фольги толщиной 0,02 мм. Он размещался внутри заряда диаметром 60 мм, спрессованного из смеси ТНТ/гексоген/ $\text{GN}_{\text{ГР}}$ (18,75/56,25/25,00) до плотности 1,58 или 1,63 г/см³, или во фторопласте-4 так, что его перекладина находилась в контакте с зарядом ВВ или смеси гексогена с графитом (75/25) с $\rho_0 = 1,63$ г/см³. Плотности смесей, содержащих нитрид бора, как это видно на рис. 1, отвечают, второму и третьему участкам D , ρ_0 -зависимости, а содержащей графит — второму. Согласно [1], скорость полиморфных превращений на втором участке зависит от давления в детонационной волне, а на третьем не зависит.

Массовую скорость регистрировали осциллографом ОК-33 при длительности развертки 1 и 3 мкс. Типичная осциллограмма приведена на рис. 2. Она получена с датчика, расположенного внутри заряда с $\rho_0 = 1,58$ г/см³, состоящего из указанной выше смеси ТГ с нитридом бора. Особенность состоит в резком увеличении крутизны спада массовой скорости с последующим выходом ее на практически постоянное значение. Положение участка резкого спада, отстоящего от ударного скачка приблизительно на 0,2 мкс, хорошо воспроизводится как по времени, так и по амплитуде. Профиль, несущий эту особенность, остается постоянным при изменении расстояния (60—180 мм) перекладины датчика от плоскости инициирования. Аналогичные результаты получаются и при детонации зарядов с $\rho_0 = 1,63$ г/см³.

Предположение о том, что резкий спад массовой скорости вызван торможением датчика волной ретонации, возникающей при повторном инициировании детонации, прерванной, якобы, его перекладиной, опровергается результатами опытов с датчиком, расположенным на границе ВВ — фторопласт: зарегистрированные в этом случае профили содержат ту же особенность, которая должна была бы исчезнуть в случае правильности предположения.

Обнаруженная особенность профиля регистрируется также датчиком на границе

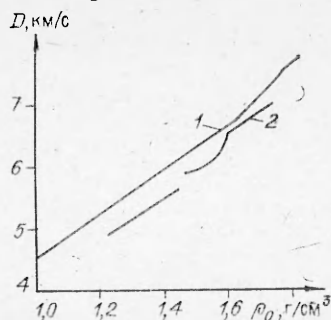


Рис. 1. Зависимость $D(\rho_0)$ смесей гексоген/графит 75/25 [1] (1) и ТНТ/гексоген/ $\text{BN}_{\text{ГР}}$ 18,75/56,25/25,0 (2).