

**ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ УПРУГОСТИ АЛЮМИНИЯ
ОТ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ*****А. А. Воробьев, А. Н. Дремин, Г. И. Канель****(Москва)*

Единым и наиболее прямым методом измерены скорости упругих волн разрежения в сжатых ударной волной образцах технического алюминия АД1 и сплава Д16. По полученным результатам с использованием зависимости объемной скорости звука от интенсивной ударной волны, выведенной из предположения о совпадении ударной адиабаты и изэнтропы одномерной разгрузки в координатах давление — массовая скорость, рассчитаны модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона для ударно-сжатого алюминия.

В [1] экспериментально показано, что прочностные свойства материала в значительной мере определяют характер и параметры волны разрежения, распространяющейся по сжатому ударной волной материалу, и параметры затухания ударных волн. Опубликованы работы [2,3], посвященные разработке метода определения закона релаксации напряжений в среде, в которой распространяется плоская упругопластическая волна сжатия или разрежения, по серии экспериментальных профилей давления или массовой скорости. Для применения этого метода необходимо знание зависимости коэффициентов упругости от давления в материале, сжатом ударной волной. Эти коэффициенты можно рассчитать по формулам теории упругости, если известны значения скорости продольных упругих волн и «объемной» скорости звука при данном давлении. Модуль объемного сжатия и соответственно объемная скорость звука рассчитываются по уравнению состояния данного вещества; для определения скорости продольных упругих волн требуются дополнительные измерения.

Измерения скорости продольных упругих волн в ударно-сжатых металлах впервые были проведены в [1] методом боковой разгрузки. В [4-9] для определения скорости упругих волн разрежения (равной «продольной» скорости звука) при различных давлениях за фронтом ударной волны был использован метод «догоняющей разгрузки». Этот метод основан на изучении затухания в исследуемом веществе ударных волн, возникающих при ударе тонких пластинок. В [10,11] скорость упругих волн разрежения определялась с использованием профилей давления, полученных с помощью манганиновых датчиков. В этих работах регистрировались профиль давления в некотором сечении образца и скорость ударника. Скорость упругой волны разрежения определялась затем по измеренному промежутку времени между моментами прихода на датчик фронтов ударной волны и волны разрежения, с использованием данных о толщине ударника, скорости ударной волны и степени сжатия за фронтом ударной волны.

Проведено много измерений скорости продольных упругих волн в алюминии, меди и железе при различных давлениях за фронтом ударной волны. Однако полученные результаты имеют разрозненный характер, недостаточно точны и плохо согласуются между собой. В данной работе

проведены наиболее прямым методом измерения скоростей упругих волн разрежения в ударно-сжатых алюминиевых сплавах АД1 и Д16 при давлениях до 300 кбар.

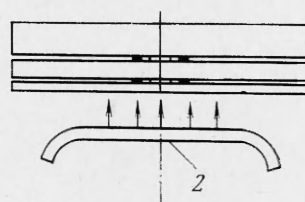
Схема опытов поясняется фиг. 1. В каждом опыте одновременно регистрировались с использованием двухлучевого осциллографа ОК-33 профили давления в двух сечениях образца 1, нагружаемого ударом разогнанной до высокой скорости пластины-ударника 2. Зная расстояние между датчиками и определив по осциллограммам промежутки времени между моментами прихода на первый и второй датчики фронтов ударной волны и волны разрежения, можно найти скорость ударной волны D и лагранжеву скорость упругой волны разрежения a_1 . По этим данным с помощью ударной адиабаты рассчитывались давление p , степень сжатия p/p_0 , массовая скорость в образце за фронтом ударной волны u и «продольная» скорость звука в эйлеровых координатах c_1 .

Для регистрации профилей давления использовались манганиновые датчики [12-14]. Чувствительный элемент датчика изготавливался из отрезка манганиновой проволоки диаметром 0.1 мм, который зигзагообразно изгибался и расплющивался на прессе до толщины 0.02—0.03 мм. К концам получившейся манганиновой ленты точечной сваркой приваривались выводы, представляющие собой полоски медной фольги толщиной 0.015 мм. Датчики после изготовления отжигались в вакууме при температуре 150° С в течение 4 час.

Каждый образец состоял из трех пластин диаметром 120 мм, между которыми располагались датчики давления. Поверхности пластин, обращенные к датчикам, полировались. Датчики отделялись от образца изолирующими лавсановыми или фторопластовыми пленками по 0.04—0.07 мм с каждой стороны датчика. Наклейка изолирующих пленок и датчиков на пластины образца и заполнение пустот осуществлялись вакуумной смазкой. Толщина пластины, обращенной к ударнику, составляла 4—5 мм, толщина второй пластины (база измерения скорости ударной волны и скорости фронта волны разрежения) 10—15 мм, третья пластина имела толщину 15 мм.

Ударные волны в образцах создавались разгоняемыми взрывом алюминиевыми ударниками толщиной 5 или 7 мм при диаметре плоского участка в момент соударения не менее 60 мм. Скорости ударников составляли 1.96 ± 0.05 , 2.20 ± 0.07 , 2.72 ± 0.1 км/сек. Для понижения давления ударного сжатия образцов в ряде опытов использовались медные экраны толщиной 4 или 5 мм, заменявшие первую пластину образца. Измерения при давлении ниже 100 кбар были проведены с использованием пороховой пушки. В этих опытах сжатие образцов осуществлялось ударом алюминиевого снаряда диаметром 50 мм с медным наконечником толщиной 4 мм.

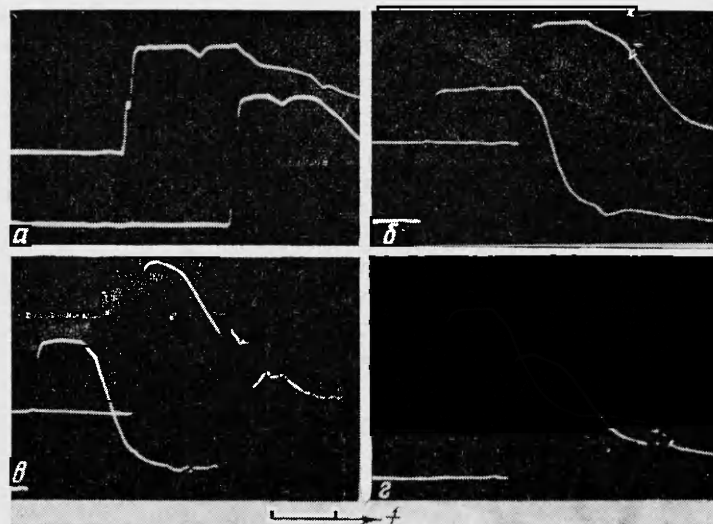
Типичные осциллограммы опытов приведены на фиг. 2, где *a* — осциллограмма опыта с образцом из АД1, нагружаемым до давления 95 кбар ударом алюминиевого снаряда с медным наконечником; *b* — нагружение образца из АД1 до 180 кбар ударом алюминиевой пластины толщиной 7 мм; *в*, *г* — соответственно нагружение образцов из АД1 и Д16 до 270—277 кбар ударом алюминиевой пластины толщиной 5 мм. В опытах с пороховой пушкой обоими датчиками регистрируется «провал» на вершине прямоугольного импульса давления (фиг. 2, *a*). Появление области пониженного давления, движущейся вслед за фронтом ударной волны, есть следствие отражения от поверхности раздела между алюминиевым



Фиг. 1

образцом и медным наконечником снаряда волны разрежения, возникающей при прохождении ударной волны через изоляцию первого датчика.

Как видно из профилей давления на фиг. 2, б — г, разделение волны разрежения на упругую и пластическую с зоной релаксации напряжений между ними фиксируется достаточно четко.



Фиг. 2

При определении из осциллограмм промежутков времени между моментами прихода на каждый датчик фронтов ударной волны и волны разрежения учитывались смещение лучей осциллографа друг относительно друга по оси x , нелинейность развертки и неперпендикулярность осей x и y отклонения лучей осциллографа. Расчет скоростей ударной волны и волны разрежения проводился с учетом поправки на толщину изоляции датчиков.

Результаты измерений представлены кружками на фиг. 3, а в координатах лагранжева скорость упругой волны разрежения a_1 — массовая скорость вещества за фронтом ударной волны u . Каждая точка получена усреднением 3—6 независимых измерений. Значения величины массовой скорости, превышающие 0.7 км/сек, рассчитаны по скорости ударной волны с использованием ударной адиабаты образцов. Для ударных волн с меньшей интенсивностью значения массовой скорости рассчитывались по измеренному давлению за фронтом ударной волны ввиду недостаточной точности измерения скорости фронта ударной волны. Для технического алюминия АД1 и для дюралюмина Д16 использовалась ударная адиабата в виде

$$(1) \quad D = (5.34 + 1.36u) \text{ км/сек}$$

Таким выражением описываются приведенные в [15] данные при давлениях до 1000 кбар для сплава 2024 с составом, аналогичным составу Д16. Это выражение получается и для ударной адиабаты технического алюминия при использовании объемной скорости звука при нормальных условиях, усредненной по приведенным в [16–19] данным, и экспериментальным данным об ударной сжимаемости при давлениях до 1 Мбар [20].

Погрешность определения a не превышает $\pm 2.5\%$; для u она составляет $+0.075$ км/сек. Эксперименты не выявили различия в скоростях упругих волн для сплавов Д16 и АД1, выходящего за пределы погрешности измерений.

Из фиг. 3, а видно, что зависимость лагранжевой скорости упругих волн разрежения от скачка массовой скорости в ударной волне хорошо описывается линейным выражением (прямая 1)

$$(2) \quad a_l = (6.30 + 3.36u) \text{ км/сек}$$

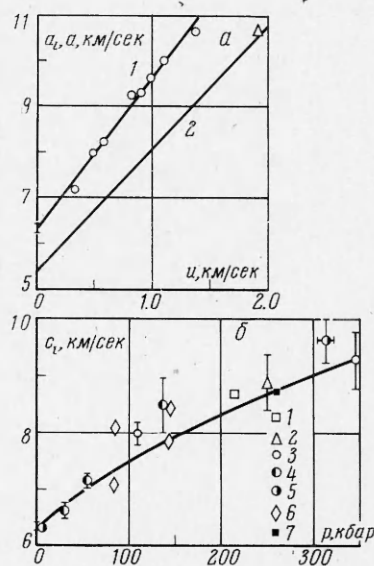
На фиг. 3, б показана зависимость «продольной» скорости звука в эйлеровых координатах от давления ударного сжатия для технического алюминия АД1, полученная из (2) с использованием ударной адиабаты алюминия (1) и законов сохранения для ударной волны. Аналогичная зависимость для Д16 смещена по оси давлений на 2.7% вправо ввиду различия в начальной плотности (2.71 г/см^3 для АД1 и 2.785 г/см^3 для Д16). Там же приведены литературные данные, взятые из [21] — 1, [4] — 2, [5] — 3, [11] — 4, [6] — 5, [10] — 6, [7] — 7. Значения продольной скорости звука, приводимые в литературе, лежат преимущественно выше полученной в данной работе зависимости. Возможная причина такого расхождения заключается в том, что толщина ударника, метаемого взрывом, в момент соударения может отличаться от начальной его толщины.

В данной работе по измеренным скоростям ударной волны и упругой волны разрежения и длительностям импульсов сжатия (от момента прихода на датчик фронта ударной волны до момента прихода фронта упругой волны разрежения) определялась толщина ударника в момент соударения. Установлено, что в момент соударения толщина ударника, как правило, на $5-10\%$ меньше исходной. Утончение ударника происходит из-за его деформации при разгоне. У тех ударников, которые удавалось найти после проведения опыта, поверхность, обращенная к заряду взрывчатого вещества, была очень неоднородной, бугристой, что тоже является причиной уменьшения эффективной толщины ударника в момент соударения. Взятая из [7] точка, полученная с использованием легкогазовой пушки, соответствует зависимости, найденной в данной работе.

Для расчета изэнтропических коэффициентов упругости нужно знать величину не только продольной, но и объемной скорости звука. Последняя с достаточной точностью рассчитывается в приближении совпадения ударной адиабаты и изэнтропы одномерной разгрузки в координатах $p-u$ [22]. В этом случае

$$(3) \quad (dp/du)_S = \rho c = (dp/du)_H = \rho_0 (c_0 + 2bu)$$

Здесь $(dp/du)_S$ и $(dp/du)_H$ — соответственно производные вдоль изэнтропы и ударной адиабаты; c_0 и b — коэффициенты ударной адиабаты в линейном виде $D = c_0 + bu$ (c_0 — объемная скорость звука при нулевом давлении); ρ_0 , ρ — начальная плотность и плотность сжатого мате-



Фиг. 3

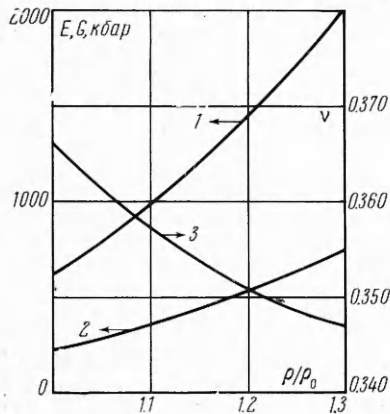
риала. Из (3) следует линейная зависимость объемной скорости звука в лагранжевых координатах a от массовой скорости вещества за фронтом ударной волны:

$$(4) \quad a = c_0 + 2bu$$

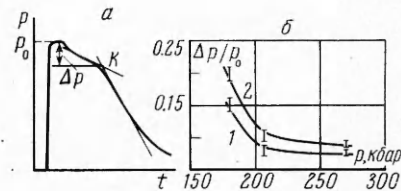
Для алюминия получаем

$$(5) \quad a = (5.34 + 2.72u) \text{ км/сек}$$

Из фиг. 3, a видно, что зависимость (5), представленная прямой 2, удовлетворительно согласуется с изображенной треугольником экспериментальной точкой, взятой из [1].



Фиг. 4



Фиг. 5

Если известны величины «объемной» и продольной скорости звука за фронтом ударной волны, то с помощью формул теории упругости можно рассчитать изэнтропические коэффициенты упругости сжатого материала

$$(6) \quad c / c_l = a / a_l = [(1 + \nu) / 3(1 - \nu)]^{1/2}$$

$$K = \rho c^2, \quad E = 3K(1 - 2\nu), \quad G = E / 2(1 + \nu)$$

Здесь ν — коэффициент Пуассона, K — модуль всестороннего сжатия, E — модуль Юнга, G — модуль сдвига, ρ — плотность, связанная с D и u соотношением $\rho = \rho_0 D / (D - u)$. В том случае, если коэффициент Пуассона постоянен, как это предполагалось в [4, 8, 23], а a_l и a линейно зависят от u , то должно выполняться соотношение $d(a / a_l) / du = 0$, откуда следует, что второй коэффициент в соотношении $a_l = a_{l0} + du$ равен

$$(7) \quad d = 2ba_{l0} / c_0$$

Для алюминия при $b = 1.36$, $c_0 = 5.34$ км/сек, $a_{l0} = 6.3$ км/сек это дает $d = 3.21$, т. е. на 4.5% ниже экспериментального значения.

На фиг. 4 представлены рассчитанные с использованием (1), (2), (5), (6) зависимости изэнтропических модуля Юнга (кривая 1), модуля сдвига (кривая 2) и коэффициента Пуассона (кривая 3) технического алюминия АД1 от степени сжатия ρ / ρ_0 вещества за фронтом ударной волны. Для сплава Д16 модуль Юнга и модуль сдвига на 2.7% выше, чем для АД1; коэффициенты Пуассона для АД1 и Д16 равны.

Представляют интерес сравнение влияния прочности на процесс разгрузки сплавов АД1 и Д16, начальная прочность которых существенно различна. Точно охарактеризовать прочностные свойства сжатого материала по профилю давления не представляется возможным. Для грубой оценки в данной работе определялась доля негидродинамической части волны разрежения от полной амплитуды волны разгрузки. За характерную точку, отделяющую негидродинамическую часть волны, бралась точка K (фиг. 5, а). На фиг. 5, б показана зависимость относительной доли негидродинамической части волны разрежения от давления за фронтом ударной волны для сплавов АД1 (кривая 1) и Д16 (кривая 2). Видно, что более прочный в исходном состоянии сплав Д16 остается более прочным и за фронтом ударной волны, а доля негидродинамической части волны разрежения с ростом давления за фронтом ударной волны для обоих сплавов падает.

Интересно проверить, насколько общий характер имеет вывод о линейности соотношения между лагранжевой продольной скоростью звука и скачком массовой скорости u в ударной волне. Экспериментальные данные для меди, взятые из [1,7,9] с точностью $\pm 1\%$ описываются соотношением $a_l = (4.65 + 3.26u)$ км/сек при $u \leq 2$ км/сек.

Авторы благодарят С. С. Набатова и В. В. Якушева, предоставивших созданную ими пороховую пушку, и В. А. Варнаву за помощь в проведении измерений.

Поступила 7 VIII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Бражник М. И., Владимиров Л. А., Сперанская М. П., Фунтиков А. И. Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях. ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 4, стр. 1061.
2. Fowles R., Williams R. F. Plane stress wave propagation in solids. J. Appl. Phys., 1970, vol. 41, No. 1, p. 360.
3. Couperthwaite M., Williams R. F. Determination of constitutive relationships with multiple gauges in nondivergent waves. J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, No. 1, p. 456.
4. Curran D. R. Nonhydrodynamic attenuation of shock waves in aluminium. J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, No. 9, p. 2677.
5. Erkman J. O., Christensen A. B. Attenuation of shock waves in aluminium. J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, No. 13, p. 5395.
6. Kusubov A. S., Thiel M. van. Dynamic yield strength of 2024-T4 aluminium at 313 kbar. J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, No. 2, p. 893.
7. McMillan A. R. Shock-wave attenuation at high pressure. Bull. Amer. Phys. Soc., 1968, vol. 13, No. 12, p. 1680.
8. Новаков С. А., Сеницина Л. М. О влиянии давления ударного сжатия на величину критических напряжений сдвига в металлах. ПМТФ, 1970, № 6.
9. Альтшулер Л. В., Бражник М. И., Телегин Г. С. Прочность и упругость железа и меди при высоких давлениях ударного сжатия. ПМТФ, 1971, № 6, стр. 159.
10. Fuller P. J. A., Price J. H. Dynamic stress-strain release paths for aluminium and magnesium measured to 200 kb. Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D), Ser. 2, 1969, vol. 2, No. 2.
11. Kusubov A. S., Thiel M. van. Measurement of elastic and plastic unloading wave profiles in 2024-T4 aluminium alloy. J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, No. 9, p. 3776.
12. Fuller P. J. A., Price J. H. Dynamic pressure measurements to 300 kilobars with a resistance transducer. Brit. J. Appl. Phys., 1964, vol. 15, No. 6, p. 751.
13. Христовов Б. Д., Голлер Е. Э., Сидорин А. Я., Лившиц Л. Д. Манганиновый датчик для измерения давления ударных волн в твердом теле. Физика горения и взрыва, 1971, т. 7, № 4, стр. 613.
14. Дремин А. Н., Канель Г. И. Зависимость электросопротивления манганина МНМц 3—12 и константа МНМц 40—1.5 от давления при ударном сжатии. Физика горения и взрыва, 1972, т. 8, № 1, стр. 147.
15. Compendium of shock wave data. Univ. California, Livermore, 1970, vol. 1, Ser. A-1.
16. Воронов Ф. Ф., Вережагин Л. Ф. Влияние гидростатического давления на упругие свойства металлов. I. Экспериментальные данные. Физика металлов и металловедение, 1961, т. 11, вып. 3.

17. *Schmunk R. E., Smith C. S.* Pressure derivatives of the elastic constants of aluminium and magnesium. *J. Phys. Chem. Solids*, 1959, vol. 9, No. 2, pp. 100—112.
18. *Vallin J., Mongy M., Salama K., Beckman O.* Elastic constants of aluminium. *J. Appl. Phys.*, 1964, vol. 35, No. 6, p. 1825.
19. *Kamm G. N., Alers G. A.* Low-temperature elastic moduli of aluminium. *J. Appl. Phys.*, 1964, vol. 35, No. 2, p. 327.
20. *Альтшулер Л. В., Коржер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф.* Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. *ЖЭТФ*, 1960, т. 38, вып. 3, стр. 790.
21. *Альтшулер Л. В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений. *Усп. физ. н.*, 1965, т. 85, вып. 2, стр. 197.
22. *Дремин А. Н., Канель Г. И.* Преломление фронта кривой ударной волны на границе с менее жесткой средой. *ПМТФ*, 1970, № 3, стр. 140.
23. *Pastine D. J., O'Keefe D. J.* Theoretical estimates of elastic relief wave velocities for metals with applications to Al and Cu. *J. Appl. Phys.*, 1970, vol. 41, No. 6, p. 2743.