

О ВЛИЯНИИ ДАВЛЕНИЯ УДАРНОГО СЖАТИЯ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА В МЕТАЛЛАХ

С. А. Новиков, Л. М. Синицына

(Москва)

Во взрывных экспериментах произведено исследование величины критических напряжений сдвига σ_* за фронтом ударных волн в алюминии при давлениях 300 и 650 *кбар*, меди при давлениях 240 и 550 *кбар* и свинце при давлении 460 *кбар*. Оценки этой величины проводились путем сравнения экспериментальных данных, характеризующих уменьшение давления на фронте ударной волны за счет разгрузки, с результатами расчетов.

1. В работах [1,2] экспериментально показано, что величина критических напряжений сдвига σ_* в металлах значительно увеличивается с ростом гидростатического давления. При ударном сжатии величина критических напряжений сдвига определяется амплитуду упругой волны разгрузки в веществе, предварительно сжатом ударной волной. Схема изменения напряженного состояния при ударном сжатии и последующем расширении бесконечной среды приведена на фиг. 1, где ABC — кривая ударного сжатия (ударная адиабата); CDE — кривая расширения; CD — упругий участок, расширение осуществляется в упругой волне разгрузки; DE — участок пластической разгрузки; AF — кривая гидростатического сжатия.

Величина критических напряжений сдвига σ_* , при достижении которой происходит обратный переход от упругости к пластичности в процессе расширения ударно сжатого материала, связана с амплитудой давления в упругой волне разгрузки P_- соотношением

$$\sigma_* = \frac{P_-}{2} \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} \quad (1)$$

где μ — коэффициент Пуассона материала при данном давлении ударного сжатия.

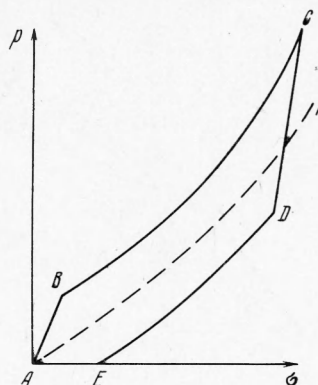
При расчетах сжатия металлов сильными ударными волнами часто пренебрегают прочностными свойствами, рассматривая металлы как жидкость (гидродинамическая теория). Учет прочности, т. е. упругого участка на кривой расширения, существенно изменяет картину течения при ударном сжатии [3].

В [4] впервые было экспериментально показано, что при давлении ударного сжатия 100 *кбар* роль прочности в алюминии весьма значительна — величина критических напряжений сдвига составляет 28.5 *кбар*. В [5] этот результат был подтвержден в экспериментах со сплавами алюминия: при давлениях ударного сжатия 110 и 345 *кбар* критические напряжения сдвига составили 8.6 и 22 *кбар* соответственно¹. В [6] приведены результаты численных расчетов, в которых учтено влияние упругой разгрузки на распространение и затухание ударных волн в твердых телах.

Оценки величины σ_* в данной работе так же, как и в работах [4, 5], проводились путем сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей, характеризующих уменьшение давления на фронте ударных волн в этих металлах, происходящего за счет догоняющей волны упругой разгрузки.

2. Для определения величины критических напряжений сдвига за фронтом ударных волн, исследовалось явление затухания давления на фронте ударной волны, вызванной ударом по образцу пластинкой из того же материала. Для описания метода рассмотрим в x, t -координатах (путь — время) схему последовательного уменьшения давления на фронте ударной волны за счет взаимодействия ее с волной упругой разгрузки, приведенную на фиг. 2, где A — ударяющая пластинка; B — полубесконечный образец.

При ударе пластинкой по образцу образуются две ударные волны 1 и 2. Догоняющая фронт ударной волны сжатия 3 волна разгрузки образуется при отражении ударной волны 1 в пластинке от ее свободной поверхности. Металл разгружается сначала в упругой волне разгрузки 3, а затем до нулевого давления в волне пластической разгрузки 4 (соответственно кривые CD и DE на фиг. 1). Скорость упругой волны разгрузки больше скорости пластической волны разгрузки. При взаимодействии упругой разгрузки с ударной волной давление на фронте волны понижается на величину, определяемую амплитудой упругой волны разгрузки, т. е. величиной критических напря-



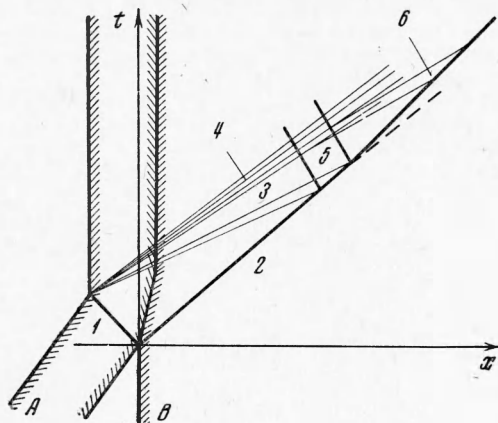
Фиг. 1

¹ Приведенные значения критических напряжений получены из определенных в работе [6] значений давления P_- при $\mu = 0.31$.

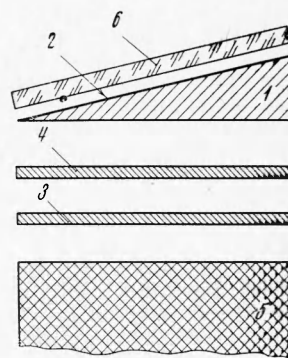
жений сдвига. При этом влево по образцу распространяется слабая упругая волна сжатия 5. Затем происходит взаимодействие этой волны с волной пластической разгрузки, вправо опять распространяется волна упругой разгрузки 6, догоняющая фронт ударной волны и т. п. Процесс повторяется до тех пор пока давление на фронте ударной волны не уменьшается до нуля.

Таким образом, давление на фронте ударной волны в процессе ее распространения по образцу уменьшается скачками. Соответствующим образом изменяется скорость вещества (массовая скорость) w за фронтом волны и скорость свободной поверхности образца w при выходе на нее ударной волны.

3. В опытах исследовались образцы из алюминиевого сплава Д1, меди М1 и свинца в состоянии поставки (без дополнительной термообработки). Измеряемой в опыте величиной являлась скорость свободной поверхности исследуемого образца w .



Фиг. 2



Фиг. 3

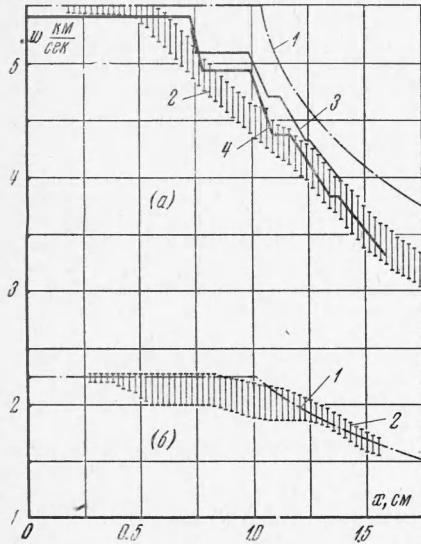
Схема опыта приведена на фиг. 3, где 1 — образец; 2 — фольга; 3, 4 — пластинки из исследуемого материала; 5 — заряд ВВ с плоской детонационной волной; 6 — блок из оргстекла, регистрирующий подлет фольги при фотохронографическом методе исследования. Зависимость $w = w(x)$ определялась в опытах с образцами, изготовленными в виде клиньев. Использование образцов такого вида позволяет получать в каждом опыте зависимость $w = w(x)$ для $0 < x < h$ (где h — максимальная толщина образца). Ударная волна с образце возбуждалась ударом пластинки 4 из того же материала толщиной 2 мм. Для исключения влияния давления продуктов взрыва на распространение ударной волны в образце между пластинкой-ударником и зарядом взрывчатого вещества помещалась вторая такая же пластинка 3, которая разогонялась взрывом.

При соударении пластинок пластинка 4 приобрела скорость, равную скорости пластинки 3, а последняя двигалась со значительно меньшей скоростью. Между зарядом ВВ и пластинкой 3 для исключения откола в ней устанавливался воздушный зазор, равный 5 мм. Скорость подлета пластины 4 к образцу измерялась в специальных опытах. Величина скорости изменялась за счет использования зарядов ВВ различного состава. Для измерения скорости свободной поверхности использовались фотохронографический и электроконтактный методы, описанные, например, в [7]. При этом регистрировались интервалы времени между моментами выхода ударной волны на свободную поверхность и моментами подлета ее к контактам (или блоку оргстекла 6 при использовании фотохронографического метода), расположенным на расстоянии 3 ± 4 мм от поверхности образца. Для исключения влияния откола на величину измеряемой в опытах скорости на поверхности алюминиевых образцов 1 была плотно притерта алюминиевая фольга 2 толщиной 0,2 мм. Поправка на величину уменьшения скорости свободной поверхности при отколе в опытах с медными образцами проводилась на основе экспериментальных данных [8].

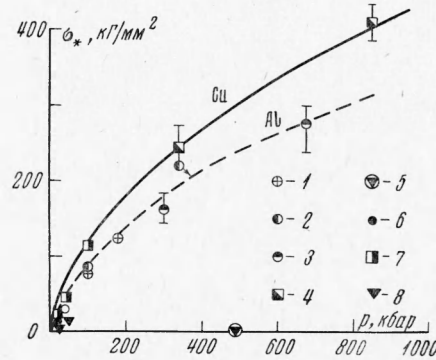
4. Расчет течения за фронтом ударной волны с учетом взаимодействия ее с догоняющими волнами упругой разгрузки производился на основании известных уравнений состояния этих металлов, изложенных в [9]. Экспериментальные и расчетные зависимости $w = w(x)$ для алюминия при $P = 680$ кбар и свинца при $P = 460$ кбар представлены на фиг. 4, а и 4, б соответственно. Заштрихованные области 2 определяются разбросом экспериментальных данных в каждой серии однотипных опытов. Пунктирные кривые 1 — расчетные зависимости для $\sigma_* = 0$ (гидродинамическая

теория), сплошные линии 3 и 4 (фиг. 4, а) — расчетные зависимости для $P_- = 70$ кбар и $P_- = 100$ кбар. При проведении расчетов так же, как и в [4], не учитывалось изменение коэффициента Пуассона с давлением; значения μ принимались равными 0.31, 0.34 и 0.44 соответственно для алюминия, меди и свинца¹.

Отметим, что ни на одной из экспериментальных кривых не проявляется скачкообразное уменьшение скорости свободной поверхности. По-видимому, это можно объяснить тем, что переход от упругости и пластичности при расширении ударно сжатых металлов происходит по плавной кривой, а не по кривой с изломом (CDE на фиг. 1). Такого поведения металлов при переходе от упругости и пластичности следует ожидать из результатов работы [10].



Фиг. 4



Фиг. 5

Для каждого материала при одинаковой скорости полета пластинки-ударника проводилось по 3—4 однотипных опыта.

За величину критических напряжений сдвига, соответствующую данному давлению за фронтом ударной волны, принималось то значение σ_* , расчетная зависимость $w = w(x)$ для которого лучше всего описывала экспериментальные данные.

За величину погрешности в определении σ_* из сравнения данных эксперимента и расчета принимался интервал между значениями σ_* , расчетные кривые $w = w(x)$ для которых касались верхней и нижней границ заштрихованной области.

Как видно из фиг. 4, б, экспериментальная зависимость $w = w(x)$ для свинца хорошо описывается расчетной кривой, полученной по гидродинамической теории ($\sigma_* = 0$).

Приводим полученные, таким образом, оценки σ_* и соответствующие им амплитуды давления в упругой волне разгрузки \bar{P}_- в кбар при давлении ударного сжатия P в кбар для исследованных металлов

	P	σ_*	P
Al	300—680	17—29	60—100
Cu	340—860	25—41	90—150
Pb	460	0	0

5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что роль прочности для алюминия и меди в исследуемой области давлений ударного сжатия (до 680 кбар для алюминия и 860 кбар для меди) значительна.

Полученные в работе значения σ_* для исследованных материалов в зависимости от давления за фронтом ударной волны представлены на фиг. 5: точки 3, 4, 5 соответствуют алюминию, меди и свинцу. Там же приведены результаты аналогичных исследований для алюминия (точки 1 и 2) из работ [4, 5] соответственно. На этой фигуре приведены также данные о влиянии гидростатического давления на величину σ_* в алюминии, меди и свинце: точки 6 и 8 из работы [1] для алюминия и свинца, точка 7 из работы [2] для меди. Приведенные данные по алюминию вполне удовлетворительно описываются общей кривой.

¹ Учет зависимости коэффициента Пуассона от давления в ударной волне может несколько изменить величину σ_* .

С повышением давления ударного сжатия увеличивается температура за фронтом ударной волны. Действие этих факторов, давления и температуры, на величину критических напряжений сдвига прямо противоположно. Очевидно, что при давлении ударного сжатия, при котором происходит плавление металла, величина σ_* практически равна нулю. Таким образом, зависимость $\sigma_* = \sigma_*(P)$ при ударном сжатии должна иметь максимум.

Согласно результатам теоретических и экспериментальных исследований [11, 12] плавление алюминия за фронтом ударной волны происходит в области давлений 1050—2020 *кбар*, меди — при 2050—2550 *кбар*, свинца — при 410—1240 *кбар*.

То, что по результатам проведенных опытов величина σ_* для свинца при давлении 460 *кбар* практически равна нулю, подтверждает факт плавления его за фронтом ударной волны при этом давлении.

Поступила 27 VI 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Воронов Ф. Ф., Верещагин Л. Ф. Влияние гидростатического давления на упругие свойства металлов. I. Экспериментальные данные. Физика металлов и металловедение, 1961, т. 11, вып. 3.
3. Morland L. W. The propagation of plane irrotational waves through an elastoplastic medium. Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 1959, vol. 251, No.997.
4. Curran D. R. Nonhydrodynamic attenuation of shock waves in aluminum. J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, No.9.
5. Erkman J. O., Christensen A. B. Attenuation of shock waves in aluminum. J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, No.13.
6. Che-Hung Mok Effects of solid strength on the propagation and attenuation of spherical and plane shock waves. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No.4.
7. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, вып. 2.
8. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия, меди при взрывном нагружении. Физика металлов и металловедение, 1966, т. 21, вып. 4.
9. 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.
10. Новиков С. А., Синицын В. А., Иванов А. Г., Васильев Л. В. Уруго-пластические свойства ряда металлов при взрывном нагружении. Физика металлов и металловедение, 1966, т. 21, вып. 3.
11. Минеев В. Н., Савинов Е. В. Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии. ЖЭТФ, 1967, т. 52, вып. 3.
12. Урлин В. Д. Плавление при сверхвысоких давлениях, полученных в ударной волне. ЖЭТФ, 1965, т. 49, вып. 2.

К ВОПРОСУ О ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОРООБРАЗОВАНИЕ

Б. В. Войцеховский, Б. И. Михайлов

(Новосибирск)

Рассматривается способ формирования дюралюминиевых пластин из расплава в условиях всестороннего сжатия. Обсуждается механизм воздействия высокого давления при кристаллизации на структуру металла. Приводятся данные по изменению плотности, прочности и удельного электрического сопротивления.

Серьезным недостатком известной технологии изготовления пластин из стандартного листа дюралюминиевого проката является наличие в них интерметаллических включений, пор и остаточных напряжений.

В работе для изготовления пластин использован простой и эффективный способ, заключающийся в задавливании расплава вместе с формой, внутри которой он нахо-