

К ОЦЕНКЕ ЗАТУХАЮЩИХ УДАРНЫХ ВОЛН В МЕТАЛЛАХ ПРИ МЕТЕОРНОМ УДАРЕ

В. П. Козлов, И. Е. Хорев,
В. В. Бельский, А. А. Коняев

В настоящее время имеется ограниченное число работ, посвященных экспериментальному исследованию пространственных ударных волн в металлах, создаваемых ударом компактных частиц [1—4]. Ниже представлены результаты экспериментальной регистрации кинематических параметров осесимметричных волн сжатия в различных однородных преградах при высокоскоростном соударении. Исследуемые плоские преграды из дюралюминия (Д16), железа (Ст. 3) и свинца различной толщины нагружались ударом алюминиевых и железных частиц с характерным размером 4 и 8 мм, ускоряемых легкогазовой баллистической установкой до скоростей 5 км/с. Массовая скорость в ударной волне при выходе на свободную тыльную поверхность преграды определялась по известному методу откола [3, 5], отработанному для различных материалов и известному своей надежностью в области умеренных давлений. Для исключения влияния динамической прочности материала преград на измеряемую скорость свободной поверхности использовалась свинцовая фольга толщиной $\sim 0,03 \div 0,05$ мм. Фольга накатывалась на полированную тыльную поверхность плиты и разрезалась на квадраты размером 5×5 мм для исключения влияния сплошности «искусственного откола». Измерение скорости различных участков фольги дало возможность получить в экспериментах распределение массовых скоростей вдоль тыльной поверхности преград [4]. Скорость движения «искусственного откола» регистрировалась импульсной рентгеновской установкой ИРА-4Б [6, 7], позволяющей получить в различных плоскостях три последовательных во времени рентгенограммы выхода ударной волны на тыльную поверхность и развития купола. Промежутки времени между срабатыванием установки задавались блоком задержки запускающих импульсов и фиксировались на электронно-счетном измерителе временных интервалов. Использование реперного устройства [6] позволяло определять скорость перемещения искусственного откола с погрешностью 8%. Погрешность измерения скорости частиц в опытах не превышала 0,7%. При измерении параметров волн сжатия в дюралюминии с использованием свинцовой фольги из-за расхождения ударных адиабат дюралюминия и свинца проводились тарировочные опыты, в которых находилась зависимость скорости фольги на тонких преградах от скорости удара плоским бойком.

В отличие от работ [1—3], где регистрация параметров затухающих ударных волн проводилась для фиксированных скоростей удара и различного набора толщин преград, в данной работе для различных толщин преград исследовался диапазон скоростей удара $2 \div 5$ км/с. Используя экспериментально полученные значения массовых скоростей, соотношения Ренкина — Гюгонио на ударном разрыве и ударные адиабаты исследуемых материалов [5], рассчитывались параметры среды на фронте ударной волны в зависимости от пройденного расстояния в преграде. Было проведено пять серий экспериментов для соударяющихся пар Al—Al, Fe—Al, Fe—Fe, Al—Pb, Fe—Pb, причем наибольшее количество опытов в исследованном диапазоне скоростей получено для первых трех пар. Для всех исследованных пар в указанном диапазоне массовая скорость за фронтом осесимметричной ударной волны линейно зависит от скорости соударения. Решение задачи о затухании численным методом, как показано в [8] для удара компакт-

ных частиц, дает линейный характер указанной зависимости до 10 км/с. Показатель затухания, определяемый соотношением

$$p = p_0(r_0/r)^n, \quad (1)$$

где n — показатель затухания; p_0 и r_0 — начальное давление и расстояние, на котором ударный фронт перекрывается боковыми волнами разгрузки, монотонно возрастает с ростом скорости соударения.

На основе полученных теоретических оценок экспериментальные результаты в виде зависимости массовой скорости от скорости удара экстраполировались до скоростей встречи 10 км/с. По данным экстраполяции рассчитывались среднеквадратичные значения и строились зависимости показателя затухания осесимметричных ударных волн от начальной массовой скорости, соответствующей плоскому удару. Показатель затухания растет с увеличением начальной массовой скорости (скорости удара) и стремится к предельному значению ($n=3$), установленному Л. И. Седовым для сильного точечного взрыва в газе [9].

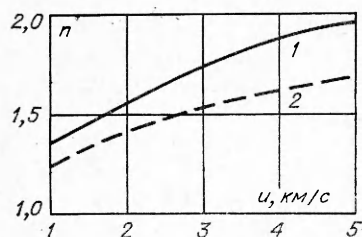


Рис. 1. Показатель затухания осесимметричных ударных волн в железных (1) и дюралюминиевых (2) преградах.

Для оценки затухания параметров волны при ударе частицей из графика (рис. 1) для фиксированной скорости соударения определяется показатель затухания, по которому на заданном расстоянии от точки удара рассчитываются параметры волны сжатия. Сравнение полученных экспериментальных данных с данными [1—3] проведено

на рис. 2 в безразмерных координатах: массовая скорость за фронтом волны, отнесенная к начальной массовой скорости, соответствующей плоскому удару, — расстояние, пробегаемое ударной волной, отнесенное к диаметру ударяющей частицы. В отличие от результатов других работ, где точки фиксированы для одной скорости удара, экспериментальные точки, полученные в данной работе, осреднены по 4—10 опытам для исследованного диапазона скоростей. Сплошная кривая соответствует расчету по полуэмпирической формуле

$$u/u_0 = r_0/r \exp[-\omega(r-r_0)/r], \quad (2)$$

полученной из [10], где ω — эмпирический коэффициент; r_0 — расстояние, определяемое [5] по тангенсу угла разгрузки $r_0 = d_0/2 \operatorname{tg} \alpha_0$; d_0 — диаметр частицы. Как видно из рис. 2, независимо от скорости удара, размера частиц и их материала результаты экспериментов по затуханию осесимметричных ударных волн в дюралюминии, железе и свинце (в пределах разброса точек до 20%) описываются зависимостью (2). Значительное расхождение (до 100%) наблюдается для удара медной частицей по медным плитам [2], что вызывает необходимость проведения дополнительных исследова-

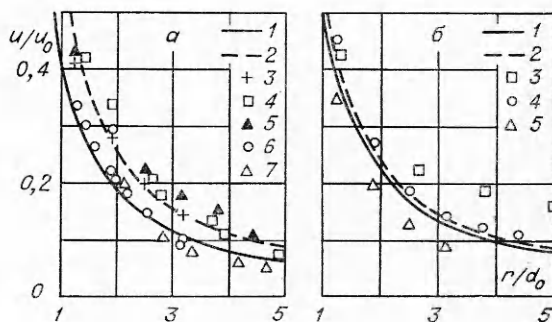


Рис. 2. Зависимость u/u_0 от r/d_0 .

а) расчет для железных (1) и дюралюминиевых (2) преград, экспериментальные точки: 3 — Al — Al, 4 — Al — Al [4], 5 — Fe — Al, 6 — Fe — Fe, 7 — Fe — Fe [3]; б) расчет для свинцовых (1) и медных (2) преград, эксперимент: 3 — Cu — Cu [2], 4 — Fe — Pb; 5 — Al — Pb.

ний затухающих ударных волн в меди.

Тыльная поверхность плит разных материалов, использованных в опытах по определению параметров волн напряжений, испытывала при ударе частицей значительное откольное разрушение. Определенный интерес представляло выявление закономерностей распределения скоростей тыльной поверхности плиты в зоне откола, в направлении, перпендикулярном оси удара. Для этого проводилось определение скоростей перемещения точек свободной поверхности, строилась полная эпюра скоростей и определялись средние значения скоростей отдельных точек тыльной поверхности преград на фиксированном расстоянии от оси симметрии. На рис. 3 приведены эпюры скоростей тыльной поверхности алюминиевых и железных плит для соударяющихся пар Fe—Al, Al—Al, Fe—Fe, толщина плит 15 мм, скорость встречи 3,5 км/с. На оси ординат для удобства отложены половинные значения скоростей свободной поверхности, максимальные значения которых (на оси удара) равны массовой скорости за фронтом ударной волны. Из представленных графиков следует, что скорость тыльной поверхности преград быстро убывает вдоль свободной поверхности, а распределение скоростей локализовано вблизи оси симметрии соударяющихся тел.

Проведенные исследования показали, что полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для оценки параметров затухающих ударных волн при метеорном ударе в широком диапазоне скоростей встречи.

Авторы признательны проф. Т. М. Платовой за обсуждение работы и высказанные замечания.

Научно-исследовательский институт
прикладной математики и механики
при Томском государственном
университете

Поступила в редакцию
29/III 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. V. G. Gregson. Appl. Phys., 1967, 38, 4.
2. I. P. Billingsley. AIAA Paper, 1969, 361.
3. В. М. Титов, Ю. И. Фадеев. ЖКИ, 1972, 10, 4.
4. В. В. Бельский, И. Е. Хорев. I Всесоюзный симпозиум по импульсным давлениям (тезисы). М., 1973.
5. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 2.
6. Т. М. Платова, И. Е. Хорев, В. В. Бельский. Тр. НИИПММ, вып. 2. Томск, Изд-во ТГУ, 1973.
7. Т. М. Платова, И. Е. Хорев и др. V Международная конференция по физике и технике высоких давлений (тезисы). М., 1975.
8. Т. М. Платова, И. Е. Хорев и др. Тр. НИИПММ, вып. 4. Томск, Изд-во ТГУ, 1974.
9. Л. И. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М., «Наука», 1965.
10. В. П. Козлов. ЖТФ, 1965, 36, 7.

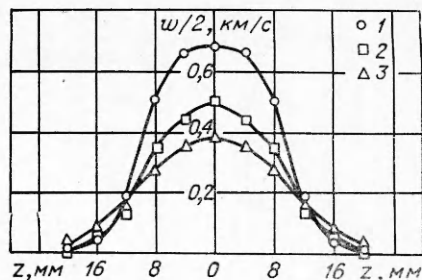


Рис. 3. Распределение скоростей отдельных точек тыльной поверхности алюминиевых и железных преград: 1 — Fe—Al; 2 — Al—Al; 3 — Fe—Fe.