

СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 539.411.5

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛН СЖАТИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В ПММА С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П. И. Зубков, Г. Н. Кулипанов*, Л. А. Лукьянчиков, Л. А. Мержиевский, К. А. Тен, В. М. Титов, Б. П. Толочко**, М. Г. Федотов*, М. Р. Шарафутдинов*, М. А. Шеромов*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, merzh@hydro.nsc.ru

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

**Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, 630128 Новосибирск

Впервые показана возможность применения синхротронного излучения для измерения распределения плотности в ударно-сжатом, разрушающемся в волне разрушения полиметилметакрилате. Приведены данные о параметрах процесса сжатия и разрушения.

Ключевые слова: волна разрушения, ударная волна, синхротронное излучение.

Возможности применения рентгеновского синхротронного излучения (СИ) для изучения детонационных и ударно-волновых процессов обсуждались в [1]. Среди уникальных свойств генерируемого излучения наиболее важными с точки зрения сформулированных задач исследования являются малая угловая расходимость при высокой интенсивности потока, малая длительность импульса излучения (менее 1 нс) и, соответственно, времени экспозиции, стабильность интервалов генерируемых импульсов. Основные параметры СИ, получаемого в Институте ядерной физики СО РАН, и стенд для проведения взрывных и ударно-волновых экспериментов описаны в [1].

Для демонстрации возможностей СИ в диагностике ударно-волновых процессов в твердых инертных средах в качестве объекта исследования выбран полиметилметакрилат (ПММА), обладающий при таких нагружениях комплексом разнообразных физических и механических свойств. В зависимости от условий нагружения этот материал может быть упругим, упруговязкопластичным, упругохрупким [2]. В последнем случае может происходить его разрушение в форме волны хрупкого разрушения, распространяющейся по сжатому образцу.

Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию свойств и поведения этого и других материалов со сходными свойствами (в основном, стекол), устоявшееся физическое представление о таком процессе (физическая модель), а следовательно, и адекватная математическая модель явления отсутствуют. Дискуссионными остаются практически все ключевые вопросы механизмов ударно-волнового сжатия и возникновения и эволюции волны разрушения [3]. Например, до сих пор не выяснен вопрос о том, какие трещины — продольного или поперечного сдвига — являются определяющими в волне разрушения. Указанное обстоятельство делает актуальным получение новой информации о структуре и кинетике волн сжатия и разрушения.

В экспериментах измерялась интенсивность проходящего через образец рентгеновского луча, меняющаяся с изменением плотности материала [1]. Схема постановки экспериментов показана на рис. 1. Нагружение цилиндрических образцов ПММА высотой 10 мм с одного из торцов проводилось взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ) ТГ 50/50 такой же формы, высотой 70 мм. Противоположный торец образца контактировал со стальным цилиндром длиной 20 мм. Диаметры всех элементов экспериментальной сборки 10 мм. Область наведения пучка СИ (3 на рис. 1), имевшего в поперечном сечении размер $2 \times 1,5$ мм, пред-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 02-02-16799), программы ведущих научных школ (грант 00-15-96181) и интеграционного гранта СО РАН № 51.

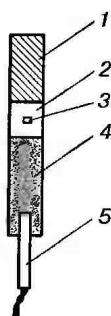


Рис. 1. Схема постановки экспериментов:

1 — металлический цилиндр, 2 — образец ПММА, 3 — область наведения пучка СИ, 4 — заряд ВВ, 5 — детонатор

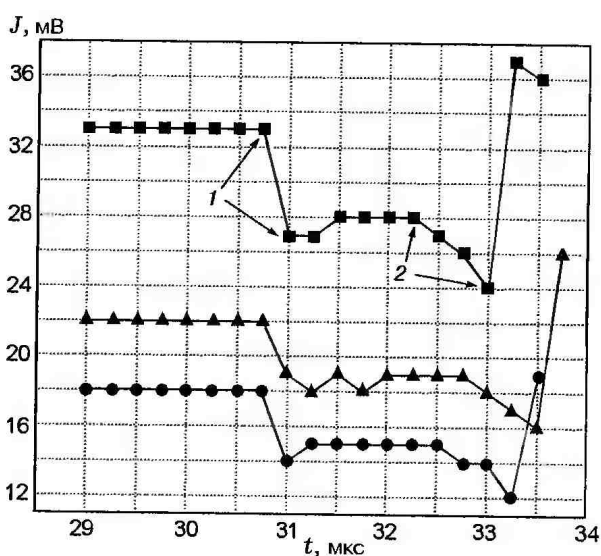


Рис. 2. Зависимость интенсивности проходящего пучка СИ от времени:

1 — ударная волна, 2 — сжатие в волне разрушения, значки ■, ●, ▲ относятся к 1, 2, 3-му каналам детектора

ставляла собой квадрат 2×2 мм. Интенсивность проходящего излучения фиксировалась с помощью микрострипового детектора [1]. Размер стрипов в направлении оси образца 0,1 мм. В экспериментах использовались три стрипа (канала), расстояние между которыми составляло 0,2 мм. Результат измерения интенсивности проходящего излучения (плотности материала) показан на рис. 2 в форме зависимости интенсивности от времени с интервалом измерений 0,25 мкс; в промежутке между ними измерялся переменный, вообще говоря, «фон» стрипов детектора. На приведенной записи четко фиксируется сжатие во фронте ударной волны (скачку интенсивности соответствует скачек плотности), за которым через некоторый

промежуток времени следует волна разрушения. Далее наблюдается увеличение интенсивности (уменьшение плотности), соответствующее разлету образовавшихся осколков в волнах разрежения.

Полученные данные позволяют провести количественные оценки параметров наблюдаемого процесса. Интенсивность проходящего пучка J связана с интенсивностью исходного пучка J_0 соотношением

$$J = J_0 \exp(-k\rho d), \quad (1)$$

где d — размер образца в направлении хода луча, ρ — плотность материала, k — коэффициент ослабления. Для определения k были проведены специальные опыты, в которых луч постоянной начальной интенсивности пропусклся через ненагруженные образцы различной толщины d . В этом случае

$$k = \frac{1}{\rho_0 d} \ln \frac{J_0}{J},$$

ρ_0 — плотность несжатого материала. В предположении постоянства k на основе полученных данных $k \approx 0,65 \text{ см}^2/\text{г}$.

Дополнительно с использованием простых контактных датчиков была измерена скорость ударной волны D , возбуждаемой в исследуемом образце зарядом ВВ. Оказалось, что на базе 10 мм $D \approx 4,3 \text{ км/с}$. Так как ударная адиабата ПММА в форме зависимости $D = a + bu$ (u — массовая скорость, a, b — постоянные) известна [4], можно сделать две независимые оценки параметров сжатия в фиксируемой на рис. 2 ударной волне: по формуле (1) с использованием полученного значения $k \rho/\rho_0 = 1,31$, а по ударной адиабате $\rho/\rho_0 = 1,35$, что показывает достаточно хорошую точность, достигаемую в измерениях с помощью СИ.

Как видно из данных рис. 2, в волне разрушения, распространяющейся за ударной волной с интервалом 1,25 мкс, происходит дальнейший рост плотности. Эффект уплотнения хрупких материалов в волне разрушения известен [5], однако для ПММА, по-видимому, наблюдается впервые. Сжатие длится $\approx 0,75$ мкс, до момента, когда начинается диспергирование потерявшей прочность на растяжение и сдвиг разрушенной среды под действием волн разрежения. Достигнутое максимальное сжатие $\rho/\rho_0 \approx 1,52$. Вычисленная по данным опытов скорость волны разрушения $D_R = 0,8 \text{ км/с}$, что хорошо согласуется с известной оценкой [3]

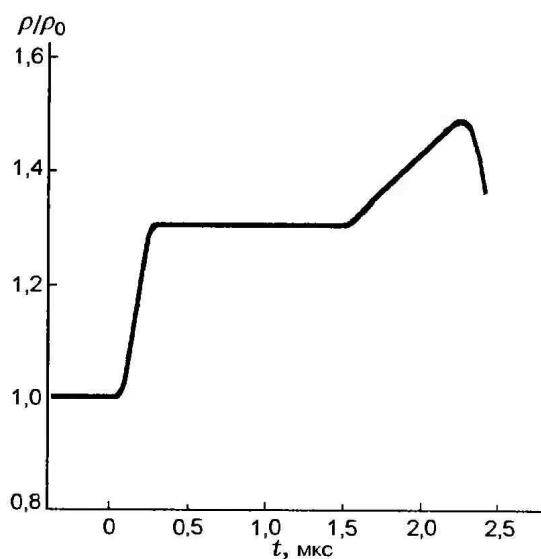


Рис. 3. Распределение плотности во времени

$D_R \approx 0,5C_t$, где $C_t = 1,4$ км/с — поперечная скорость звука. Данное значение D_R , однако, является локальным, поскольку если бы это была скорость стационарной волны разрушения, то, как показывает простейший подсчет, отставание фронта разрушения от фронта ударной волны должно было бы начаться скачком за 1,2 мм до места измерения. Логично предположить, что, как и в случае разрушения ПММА при взрыве сферического заряда ВВ внутри плексигласового блока [6], скорость фронта разрушения в рассматриваемых условиях является убывающей функцией пройденного расстояния, асимптотически приближающейся к стационарному значению $D_R \approx 0,5C_t$.

Полный профиль плотности при прохождении ударной волны и волны разрушения,

построенный по результатам измерений (см. рис. 2), приведен на рис. 3. Качественно он соответствует профилю напряжений в стекле, наблюдавшемуся в [5] в аналогичном процессе.

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что проведенный анализ результатов измерений плотности в ударно-сжатом ПММА с помощью синхротронного излучения дал представление о динамике волн сжатия (ударных волн) и разрушения, полностью согласующееся с имеющимися представлениями о развитии рассматриваемого явления. Таким образом, впервые показана применимость СИ для исследования данного класса процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешаев А. Н., Зубков П. И., Кулипанов Г. Н. и др. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 104–113.
2. Barker L. M., Hollenbach R. E. Shock-wave studies of PMMA, fused silica and sapphire // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, N 10. P. 4208–4226.
3. Николаевский В. Н. Динамическая прочность и скорость разрушения // Удар, взрыв и разрушение. М.: Мир, 1981. С. 166–203.
4. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн. Высоко-скоростные ударные явления / Р. Мак-Куин, С. Марш, Дж. Тейлор и др. М.: Мир, 1973. С. 299–427.
5. Bourne N. K., Rosenberg Z. The dynamic response of soda — lime glass. Shock compression of condensed matter — 1995 // Proc. of AIP Conf. New York, Woodburg, 1996. Pt. 1. P. 567–572.
6. Адушкин В. В., Сухотин А. Н. О разрушении твердой среды взрывом // ПМТФ. 1961. № 4. С. 94–101.

Поступила в редакцию 20/XI 2002 г.