

УДК 534.222.2

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОГО ВЗРЫВА

В. С. Жученко, Г. П. Постников, Н. В. Шихунов

*Научно-исследовательский машиностроительный институт,
125212 Москва*

Описан комплекс оптических методов изучения кумулятивного взрыва, включающий модификации известных методик (щелевая фоторегистрация, метод светящихся точек, лазерное зондирование), а также два новых способа — измерение волновых скоростей световодными датчиками и лазерную визуализацию кумулятивной струи. Оптические методы применены для исследования лабораторных кумулятивных зарядов. Выявлены характерные искажения симметрии детонационного фронта и их воздействие на кумулятивную струю, установлен вероятностный характер разрыва кумулятивной струи, получена функция распределения частиц струи по размерам, определены максимальные значения средних величин предельного растяжения для меди.

При изучении кумулятивного взрыва традиционно применение рентгеноимпульсной техники, обеспечивающей визуализацию кумулятивной струи и измерение ее характеристик на разных стадиях: от схлопывания облицовки и формирования струи в продуктах детонации до разрыва растягивающейся струи на отдельные фрагменты. Наряду с этим получили развитие оптические методы, позволяющие с высоким пространственно-временным разрешением регистрировать конфигурацию детонационной волны (ДВ), форму и структуру кумулятивной струи, ее воздействие на различные мишени. В работах [1–7] предложен ряд оригинальных способов оптической съемки.

В настоящей статье описан комплекс оптических методов, примененных авторами при исследовании лабораторных кумулятивных зарядов.

Многощелевая фоторегистрация детонационного фронта

Многощелевая фоторегистрация осуществляется с помощью растров — систем параллельных или концентрических щелей. Растр может устанавливаться как в плоскости промежуточного изображения фотокамеры, так и на торце заряда. Второй способ предпочтительнее, поскольку обеспечивает жесткую центровку растра относительно торца заряда.

В опытах использовался растр — тонкая пластина из зачерненного оргстекла с нанесенными прозрачными штрихами (щели глубиной $\sim 0,1$ мм). Воздушные зазоры, образованные щелями, служат источниками свечения при выходе детонации на торец заряда. Свечение регистрировалось фотокамерой ЖЛВ-2 в режиме непрерывной развертки. Временное разрешение оптической системы $t_p = \beta b / v_p$, где v_p — линейная скорость развертки, b — ширина щели, β — коэффициент увеличения. Минимальная величина b рассчитывается из соотношения [8] $\beta b = \frac{1}{0,7N}$ (N — пространственное разрешение оптической системы, 0,7 — коэффициент, учитывающий распределение плотности почернения на краях линии). В опытах $v_p = 5,5$ мм/мкс, $\beta = 0,3$, $N = 19$ лин/мм, следовательно, $b = 0,25$ мм, $t_p = 15$ нс.

Ширина линии на пленке определяется оптическим изображением щели и его смазыванием при фоторазвертке, которое зависит от длительности свечения воздушного зазора. Согласно [9], после трех отражений

ударной волны (УВ) в зазоре оргстекло теряет прозрачность и последующее свечение отсекается. При толщине зазора 0,1 мм и скорости разлета продуктов взрыва ~ 10 мм/мкс время прохождения по зазору первой УВ составляет ~ 10 нс. За это время толщина зазора уменьшается почти на порядок, поэтому второе и третье отражения УВ занимают не более 5 нс, а полное время свечения составляет $\tau \approx 15$ нс. При $v_p = 5,5$ мм/мкс смазывание изображения $\delta = v_p \tau \approx 0,08$ мм, а суммарная толщина линии $\beta b + \delta \approx 0,15$ мм. Эта оценка точно совпала с фактической толщиной линий, полученной усреднением по всем фоторегистрограммам.

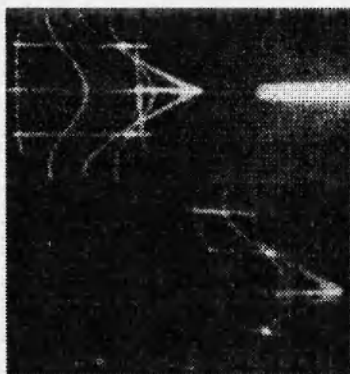


Рис. 1. Регистрограмма тороидального детонационного фронта при ортогональной съемке (линейный растр).

Конфигурация детонационных фронтов в кумулятивном заряде определялась с помощью линейных растров. Съемка осуществлялась в двух вариантах: стандартном и ортогональном [1]. В стандартном варианте растр представлял собой несколько щелей, перпендикулярных направлению фоторазвертки. При ортогональной съемке использовались растры в виде сетки из взаимно перпендикулярных щелей. Принцип ортогональной съемки состоит в следующем. Растр проецируется на дополнительное зеркало. Если зеркало установить под углом 45° к двум ортогональным осям, то их изображение в зеркале повернется на 90° , т. е. оси поменяются местами. Теперь фотокамера строит изображение растра и одновременно его отражение в зеркале; таким образом процесс фиксируется в двух ортогональных направ-

влениях. Пример ортогональной съемки показан на рис. 1.

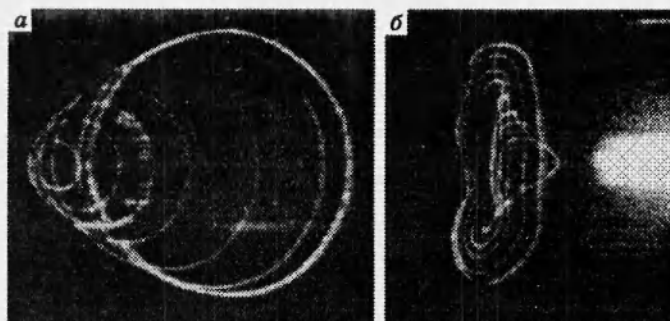


Рис. 2. Регистрограммы выхода детонации на торец заряда (круговой растр).

Для контроля симметрии детонационного фронта применялись круговые растры — системы концентрических круговых щелей [1]. Если фронт детонации симметричен относительно оси заряда, то волна выходит на щель одновременно, и на пленке фиксируется правильная окружность. Нарушение симметрии приводит к деформированию окружности, при этом величина деформации в направлении развертки определяет время искажения. Обработка фоторегистрограмм с помощью компаратора позволяет оценить временное искажение с точностью 25 нс. На рис. 2 показаны характерные снимки при слабом (а) и сильном (б) нарушении осевой симметрии.

Метод светящихся точек

Для регистрации детонационного фронта у основания кумулятивно-го заряда, перекрытого металлическим буртиком кумулятивной воронки, применялся метод светящихся точек. В буртике высверливались сквозные отверстия диаметром 1,2 мм, заполняемые кристаллическим гексогеном. Локальные взрывы гексогеновых столбиков фиксировались фотокамерой в режиме развертки. Свечение отсекалось кольцом из оргстекла, приложенным к буртику с внешней стороны. Пример регистрации методом светящихся точек показан на рис. 3. Заметим, что описанный способ не препятствует нормальному формированию и движению кумулятивной струи и потому может использоваться в стандартных испытаниях кумулятивных зарядов с рентгенографированием струи и оценкой ее воздействия на мишень.



Рис. 3. Регистрограмма выхода детонации на основании кумулятивного заряда (метод светящихся точек).

Применение оптических методов в лабораторных исследованиях выявило новые факты. Установлено, в частности, что характерные для зарядов конструктивные и технологические дефекты (несоосность и перекося деталей, неоднородность заряда по плотности, структуре и распределению флегматизатора) вызывают перекося детонационного фронта относительно оси заряда. Обычно угол перекося не превышает 1° , однако при слабом (околокритическом) инициировании осевая несимметрия резко возрастает. Рентгено съемка показала, что перекося детонационного фронта в несколько градусов приводит к отклонению струи от оси симметрии, деформации ее поперечного сечения, а также к сильному искривлению и разрушению головной части струи.

Световодный и лазерный измерители волновых скоростей

Световодные линии связи успешно заменяют электрические контактные схемы регистрации ударных и детонационных волн [10]. Набор тонких (диаметром $\sim 0,05$ мм) световодов устанавливается в образце по пути движения волны для измерения волновой скорости или в поперечной плоскости — для регистрации формы фронта. Волоконная линия передает к регистрирующей аппаратуре световые импульсы, возникающие в области светочувствительных окончаний датчиков. Схема измерения обладает высоким пространственно-временным разрешением и помехозащищенностью, что достигается за счет использования световодов с малыми оптическими потерями и малой площадью регистрации (до $0,01$ мм²).

Движение УВ в прозрачной слоистой преграде может регистрироваться одним датчиком. Световод, приставленный к внешней поверхности преграды, фиксирует вспьшки воздушных зазоров, разделяющих отдельные слои. Узкое поле зрения, определяемое входной апертурой световода, обеспечивает локальность измерений. В реализованной схеме удалось достичь временного разрешения 10–20 нс за счет уменьшения воздушных зазоров до 5–10 мкм и повышения чувствительности приемных оптико-электронных преобразователей. Осциллографическая запись сигнала световодного датчика показана на рис. 4.

Наряду со световодным регистратором использовался известный лазерный измеритель волновых скоростей [11]. В этом методе на прозрачную слоистую преграду направляется зондирующий лазерный луч, отражающийся от каждой границы раздела. Ударная волна, последовательно закрывая зазоры, уменьшает суммарную интенсивность отраженного светового луча, направляемого системой зеркал и линз на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Применяемая схема построена на использовании гелий-неонового лазера. Преградой служил набор плексигласовых пластин толщиной по 0,4–0,5 мм, установленных с зазором 5–10 мкм. Сигналы регистрировались с помощью ФЭУ-128 и осциллографа С1-75. Временное разрешение, определяемое быстродействием ФЭУ, составляло 20 нс. Характерная запись показана на рис. 5.

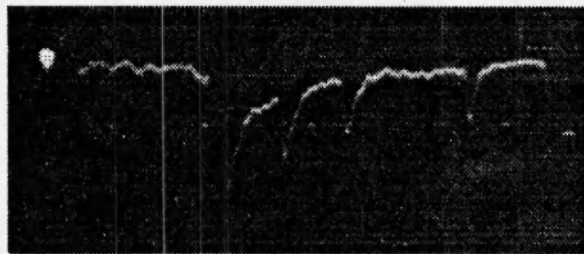


Рис. 4. Осциллограмма сигнала световодного датчика. Развертка 0,2 мкс/дел.

Световодный и лазерный измерители позволяют с большой точностью определять параметры на фронте УВ в прозрачной преграде, приставленной к исследуемому образцу. Для плоских течений зафиксированные в опытах состояния на фронте УВ однозначно определяют изменение параметров на границе преграды с образцом. В этом случае состояния, возникающие на границе через некоторое время t_r , переносятся на фронт УВ через время t_n , при этом $t_r = t_n(u_n + c_n - \bar{D}_n)/(u_n + c_n - \bar{u}_n)$, где u_n и c_n — массовая скорость и скорость звука на фронте УВ в преграде; \bar{D}_n и \bar{u}_n — средние волновые и массовые скорости на пройденном участке.

Световодный и лазерный измерители могут применяться для прецизионного исследования плоских стационарных ДВ. Измеренные в опытах волновые скорости в преграде, приставленной к заряду ВВ, позволяют рассчитать лагранжевые профили ДВ, используя простые соотношения:

$$u = \frac{D}{2} \frac{L + u_n t_r}{L + D t_r} - \frac{D}{4}, \quad c = \frac{D}{2} \frac{L + u_n t_r}{L + D t_r} + \frac{D}{4},$$

$$p = \rho c J \left(\frac{c}{c c J} \right)^3, \quad t = t_r \frac{u + c - \bar{u}_n}{u + c - u},$$

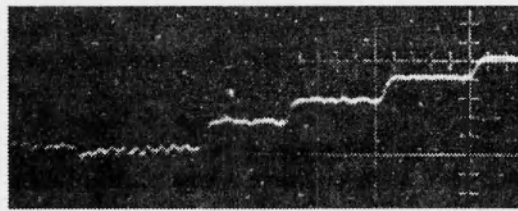


Рис. 5. Оциллограмма сигнала ФЭУ (метод лазерного зондирования). Развертка 0,2 мкс/дел.

где L — длина заряда; D — скорость детонации ВВ; c_{CJ} и p_{CJ} — скорость звука и давление в плоскости Чепмена — Жуге. В [12] с помощью лазерного зондирования были выявлены новые, не описываемые классической теорией детонационные режимы.

В настоящей работе световодный и лазерный измерители использовались в экспериментах, моделирующих инициирующие устройства кумулятивных зарядов. Определены закономерности затухания расходящихся УВ, возникающих в преграде при взрыве детонаторных шашек разных размеров, выявлены критические условия передачи детонации через инертную прослойку. На основе экспериментальных данных и двумерных газодинамических расчетов выбран простой критерий инициирования детонации расходящейся ударной волной.

Щелевая регистрация кумулятивной струи

Оптическая щелевая регистрация применяется для исследования процесса растяжения и разрушения кумулятивной струи, а также для определения прочностных свойств металлов при сверхвысоких скоростях деформирования ($\dot{\epsilon} \sim 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$). При щелевой съемке реальная длина каждой частицы струи $l_i = \bar{M}_i l_i^n$ определяется масштабным коэффициентом $M_i = v_i/v_p$, где v_i и v_p — скорости частицы и развертки, l_i^n — длина частицы на пленке. Так как величина v_p известна с высокой точностью, то для определения l_i необходимо измерить v_i . В [7] для этой цели использовался временной отметчик — дополнительный капсюль-детонатор, момент высвечивания которого фиксировался фоторегистратором. В опытах реализована модифицированная схема оптической щелевой развертки, позволяющая существенно повысить точность за счет использования оптического блока, задающего базу измерения. Кумулятивная струя регистрировалась камерой ЖЛВ-2 через щель при подсветке импульсной лампой. С помощью оптического блока, состоящего из глухого и полупрозрачного зеркал, щель проецировалась объективом в плоскости, перпендикулярные оси струи, задавая базу измерения на известном расстоянии от кумулятивного заряда. Во избежание наложения дорожек записи плоскости зеркал развернуты относительно друг друга. Для регистрации струи в двух ортогональных плоскостях используется перископ, устанавливаемый соосно с зарядом.

Скорость развертки и длительность подсветки выбираются из условия записи всех элементов струи вплоть до песта. Длительность импульса подсвета составляла $\sim 2 \text{ мс}$ при $v_p \approx 2000 \text{ м/с}$. Время экспозиции каждого фрагмента струи определяется его скоростью и шириной щели и составляло в опытах 15–150 нс. Выбор базы измерения определяется требованиями: 1) база не должна превышать допустимую величину глубины

резкости Δ , возникающей из-за разных оптических путей в зеркальном блоке; 2) относительное смещение изображения одноименных частиц на дорожках записи должно составлять заметную величину, измеряемую с высокой точностью. Глубину резкости можно оценить по формуле [13]

$$\Delta = \frac{a}{1 - (\theta' a / A f'^2)} - \frac{a}{1 + (\theta' a / A f'^2)} \geq S,$$

где a — расстояние от струи до фоторегистратора; \bar{A} и f' — относительное отверстие и фокус объектива; $\theta = (0,1 \div 0,2) / \beta$ — допустимый круг рассеяния в плоскости изображения; β — коэффициент увеличения снимка для последующей обработки. При пятикратном увеличении $\theta' = 0,02 \div 0,04$. Тогда при использовании ЖЛВ-2 ($A = 1 : 20$, $f' = 220$ мм) и съемке с расстояния $a = 1,4 \div 1,5$ м глубина резкости $\Delta \approx 30$ мм, поэтому база измерения $S \approx 20 \div 25$ мм. Скорость и длина частицы струи рассчитывается из соотношений $v_i = S v_p / x_i$ и $i_i = S l_i^0 / x_i$, где x_i — расстояние на пленке между одноименными элементами струи на верхней и нижней дорожках. Диаметр струи зависит только от оптического увеличения объектива фотокамеры. Точность измерения диаметра, длины и скорости фрагмента струи составляет 3–5%. Характерная фоторазвертка кумулятивной струи показана на рис. 6.

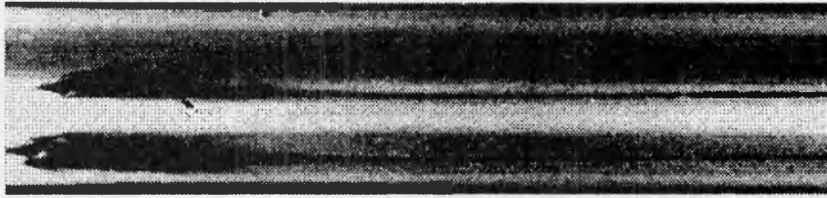


Рис. 6. Щелевая фоторазвертка алюминиевой кумулятивной струи.

Исходные данные, полученные обработкой регистрограмм, закладывались в базу данных компьютера и по специальной программе рассчитывались значения параметров, характеризующих процесс растяжения и разрушения струи: коэффициент предельного удлинения металла в струе, время разрушения каждого участка струи, начальная длина и диаметр струи при ее формировании, расстояние разрыва.

В проведенных опытах исследовались кумулятивные струи из меди марок М1 и М2 и из алюминия АД1. Остаточный градиент скорости после разрыва оценивался из соотношения $\Delta v' = \Delta l_i / l_i t$, где l_i — длина элемента на первой дорожке; Δl_i — приращение длины за время пролета базы (на второй дорожке). Полученная величина $\Delta v' = 0,008 \div 0,015$ мкс⁻¹ на порядок меньше начальной, следовательно элемент после разрыва практически не тянется и полностью разгружен. Этот экспериментальный факт важен для изучения механизма разрушения кумулятивной струи. Установлено, что разрыв кумулятивной струи имеет вероятностный характер. Определены количественные статистические параметры фрагментов струи. Получена функция распределения частиц струи по размерам. Для меди двух марок определены максимальные значения средних величин предельного растяжения.

Лазерная визуализация кумулятивной струи

Твердотельные лазеры, работающие в режиме модуляции добротности резонатора, имеют длительность импульса излучения 10–50 нс при

пиковой мощности порядка десятков мегаватт. Это обеспечивает высокое временное разрешение при съемке кумулятивной струи и достаточный контраст изображения за счет спектральной селекции монохроматического лазерного подсвета на фоне сплошного спектра свечения продуктов взрыва. По оценке, при площади поля съемки 100 см^2 интенсивность подсвета лазером мощностью 10 МВт как минимум в 100 раз превосходит собственное свечение продуктов взрыва.

Оптическая съемка кумулятивной струи проводилась камерой ЖЛВ-2 в режиме развертки. Кадрировка осуществлялась самими лазерными импульсами, что позволило, во-первых, повысить контраст изображения за счет развертывания свечения продуктов по всей пленке и, во-вторых, обеспечить высокую частоту съемки.

Метод лазерной визуализации реализован по теневой схеме в двукадровом режиме с помощью рубиновых лазеров ОГМ-20 ($t_n = 30 \text{ нс}$, $p_n = 20 \text{ МВт}$). Излучение двух лазеров сводилось полупрозрачным зеркалом и телескопом в коллимированный пучок диаметром $\sim 100 \text{ мм}$, который направлялся на кумулятивный заряд. Съемка проводилась через интерференционный фильтр. Время между кадрами и момент съемки устанавливались генератором задержанных импульсов ГЗИ-6.

В качестве примера использования лазерной методики на рис. 7 показана фотография головного участка медной кумулятивной струи, зафиксировавшая характерную пелену диспергированного металла, а также разрыв струи на фрагменты.

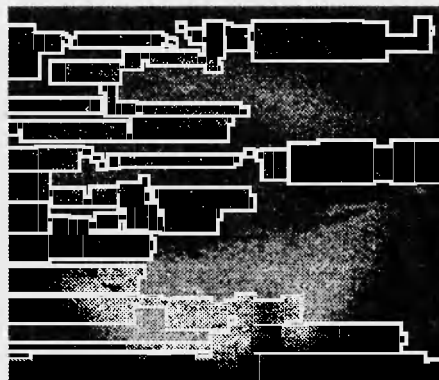


Рис. 7. Лазерная съемка головной части медной кумулятивной струи.

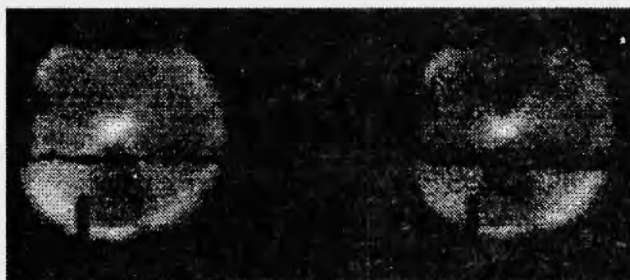


Рис. 8. Двухкадровая лазерная съемка алюминиевой кумулятивной струи.

Известно, что разрешающей способности импульсной рентгенографии недостаточно для съемки кумулятивной струи из малоплотных материалов. В этом случае очевидно преимущество лазерной съемки, нечувствительной к материалу струи. На рис. 8 представлена фотография среднего участка алюминиевой кумулятивной струи. Съемка выявила специфический характер распада струи на элементы различной формы. Наблюдаются отдельные частицы струи с резкими границами разрыва, что свойственно хрупкому разрушению, однако между фрагментами имеются нитевидные перетяжки, присущие вязкому течению металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Held M. IX International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Denver, 1970.
2. Held M., Ludwig D., Nikowitsch P. XII International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Toronto, 1977.
3. Held M. VII Symp. on Detonation. Annapolis, 1981.
4. Held M. XV International Congress on High-Speed Photography and Photonics. San-Diego, 1982.
5. Held M. XVI International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Strasbourg, 1984.
6. Held M., Nikowitsch P. International Society Optical Engineering. 1984. V. 491.
7. Held M. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1986. V. 11.
8. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. М.: Наука, 1975.
9. Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 127-132.
10. Rai-Lier Lu, Naiman E. A. VIII International Symposium on Ballistics. 1984.
11. Ашаев В. К., Левин А. Д., Миронов О. Н. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6, № 5.
12. Альтшулер Л. В., Доронин Г. С., Жученко В. С. Режимы детонации и параметры Жуге конденсированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 84-103.
13. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1966.

Поступила в редакцию 6/XII 1994 г.
