

## К ВИЗУАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ

С. И. Герасимов<sup>1,2</sup>, В. И. Ерофеев<sup>3</sup>, В. А. Кикеев<sup>4</sup>, С. А. Холин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

<sup>2</sup>СарФТИ НИЯУ МИФИ

<sup>3</sup>Нф ИМАШ РАН

<sup>4</sup>НГТУ им. Р. Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы, связанные с методикой наблюдения солитонов продольной деформации.

*Ключевые слова:* солитон, фоторегистрация, светочувствительное ВВ.

### 1. Солитоны продольной деформации в нелинейно-упругом стержне

В 1895 году Кортвег и де Вриз опубликовали уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 2bu \frac{\partial u}{\partial x} + d \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0,$$

описывающее волны на поверхности мелкой воды (уравнение КдВ, [1]) и имеющее решение, в пределе соответствующее уединенной волне Рассела:

$$u = 6 \frac{d}{b} k^2 ch^{-2} k(x - 4dk^2 t),$$

где волновое число  $k$  является свободным параметром.

С физической точки зрения в этой волне нелинейность и дисперсия уравниваются, что приводит к возникновению устойчивого образования – одиночной колоколообразной волны, которая распространяется на большие расстояния без изменения формы и скорости.

Большой интерес связан с возможностью генерации и наблюдения длинной уединенной волны деформации в твердотельном волноводе. Во-первых, это требует решения целого ряда задач, связанных с генерацией таких волн и методики их регистрации. Во-вторых, параметры солитона деформации связаны с упругими модулями третьего порядка, что позволяет определять значения этих модулей по измеренным параметрам солитона деформации в волноводах различного типа, сделанных из одного и того же материала.

Возможность наблюдения в обычных условиях современной физической лаборатории генерации и распространения нелинейной волны, сохраняющей свою форму и скорость, была показана в работе [2].

Излучение импульсного рубинового лазера вызывало мгновенное испарение металла на пленке, помещенной вместе со стержнем в кювету с водой, а полученная в воде ударная волна проникала в стержень. Велась съемка двухэкспозиционных голографических интерферограмм, позволявшая зафиксировать уединенную нелинейную волну с почти неменяющимися параметрами и формой.

Помимо желания повторить полученный результат с возможностью более качественной визуализации, хотелось бы упростить данную методику и повысить ее функциональность. Этой цели служит данная работа, описывающая достижимость ряда положений новой разрабатываемой методики регистрации волн сжатия в твердых телах. Основные задачи, решаемые с помощью новой методики:

- одновременное возбуждение возмущений в ряде твердотельных волноводов;
- возможность варьировать параметрами нагружающего импульса, в том числе при одновременном возбуждении волн в разных волноводах;
- качественная визуализация возбуждаемых волн и возможность использования непрозрачных материалов.

В такой постановке возможно в одном эксперименте наблюдать различие в поведении волн для волноводов различной геометрии (например, имеющих переменное поперечное сечение для усиления (ослабления) волны или контакт с внешней средой из заданного материала заданных размеров), волноводов из различных материалов; использовать отдельные волноводы для получения данных о параметрах волны с помощью датчиков давления и т. п.

Оценка диапазона значений требуемого начального нагружающего импульса проводится на основании уравнения для продольных волн в стержне со свободной боковой поверхностью [3, 4, 5]. Учет нелинейности приводит к уравнению с двумя дисперсиями для функции продольной деформации  $u = U_x$ :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \alpha_1 \frac{\partial^2 u^2}{\partial x^2} + \alpha_2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} - \alpha_3 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

где

$$c_0^2 = \frac{E}{\rho_0}, \quad E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}.$$

Выражения для дисперсионных слагаемых  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  для моделей в рамках гипотез плоских сечений и Лява равны [4]:

$$\alpha_2 = -\frac{v^2 R^2}{2}, \quad \alpha_3 = -\frac{v^2 \mu R^2}{2\rho_0},$$

для пятиконстантной модели Мурнагана [5]:

$$\alpha_2 = \frac{v(1-v)R^2}{2}, \quad \alpha_3 = \frac{vER^2}{2\rho_0},$$

$R$  – радиус стержня

Коэффициент нелинейности  $\beta$ , входящий в слагаемое  $\alpha_1 = \frac{\beta}{2\rho_0}$ , определяется через модули третьего порядка Мурнагана  $\beta = 3E + 2\ell(1-2v)^3 + 4m(1-2v)(1+v)^2 + 6nv^2$ .

Уравнение (1) имеет точное решение в виде бегущей уединенной волны  $A \operatorname{ch}^{-2}((x-Vt)/\lambda)$  и для двух перечисленных выше моделей имеет вид:

$$u = \frac{3(V^2 - c_0^2)}{2\alpha_1} \operatorname{ch}^{-2}(k(x-Vt)),$$

где  $k[2, 3] = \left( \frac{V^2 - c_0^2}{2v^2 R^2 (V^2 - \mu/\rho_0)} \right)^{0,5} \dots k[4] = \left( \frac{V^2 - c_0^2}{2vR^2 (c_0^2 - (1-v)V^2)} \right)^{0,5}$ .

Соответственно при положительном коэффициенте Пуассона в диапазоне  $0 < v < 0,5$  допустимые для существования солитона скорости его распространения в стержне должны быть сверх-

звуковыми ( $V > c_0$ ) по всем моделям и лежать в диапазоне  $c_0 < V < c_0/(1-v)^{0,5}$  по [4] и вне  $0 < V < (\mu/\rho_0)^{0,5}$  по [2, 3].

Некоторые данные по модулям упругости третьего порядка приведены ниже.

Модуль Лямэ, коэффициент Пуассона  $\nu$  и модули третьего порядка Мурнагана для некоторых упругих материалов

| Материал      | $\lambda$ | $\mu$ | $\nu$ | $\ell$ | $m$  | $n$  |
|---------------|-----------|-------|-------|--------|------|------|
|               | ГПа       |       |       | ГПа    |      |      |
| Полистирол    | 1,7       | 0,95  | 0,32  | -19    | -13  | -10  |
| Плексиглас    | 3,9       | 1,9   | 0,34  | -10,5  | 2,4  | 19   |
| Алюминий Д16Т | 57        | 27,6  | 0,35  | -290   | -310 | -260 |

## 2. Многоточечная генерация ударной волны в материале стержня

Для одновременного возбуждения нагружения ряда волноводов можно применять инициирование капсулей-детонаторов от одного подрывного генератора. Недостаток этого способа заключается в получении мощных нагружающих импульсов, которые будут приводить к откольному разрушению испытываемых образцов. Варьирование параметрами нагружающего импульса может быть осуществлено использованием новых энергетических светочувствительных составов, инициируемых с помощью коротких световых импульсов некогерентных источников света [6]. В качестве светочувствительного энергетического материала используются два пиротехнических состава (ВС-1 и ВС-2), отличающиеся температурами вспышки и чувствительностью к удару.

Синхронность работы инициирующего пироставы ВС-2 проверялась в серии экспериментов, схема которых представлена на рис. 1. Пять латунных колпачков (диаметр 5 мм, высота 3 мм, толщина стенки 0,5 мм, навеска ВС-2 ~0,1 г) размещались вдоль оси импульсного газоразрядного плоскостного излучателя, подключённого к управляемому накопителю электрической энергии (150 Дж, 15 кВ) [7]. Управление запуском накопителя производилось посредством блока задержек времени запуска, который после выдачи сигнала на запуск накопителя в момент времени  $t$  обеспе-

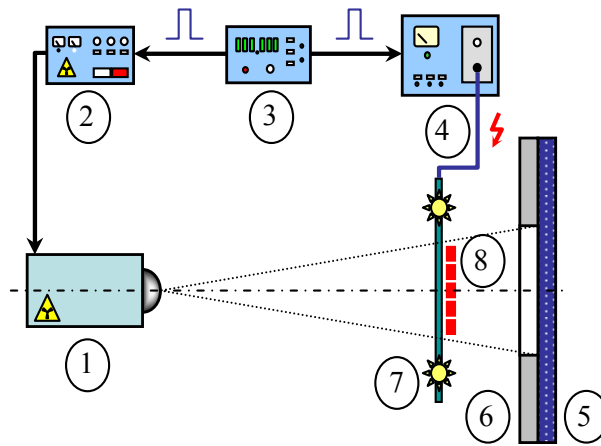


Рис. 1. Схема проведения рентгенографических исследований: 1 – рентгеновский аппарат (РА); 2 – пульт управления РА; 3 – блок задержек времени запуска; 4 – управляемый накопитель электроэнергии; 5 – кассета с радиографической пленкой; 6 – свинцовая маска-поглотитель; 7 – излучатель; 8 – пять колпачков с составом ВС-2

чивал запуск рентгеновского аппарата «МИРА-3Д» в момент  $t + \Delta t$ . Интервалы времени съёмки  $\Delta t$  в четырёх экспериментах выбирались равными: 0, 5, 10, 30 мкс от момента генерации светового импульса.

Дистанция удаления излучателя рентгеновского аппарата от объекта съёмки относилась к расстоянию от объекта съёмки до плёнки как  $\frac{L}{l} = 2,38$ , что обеспечивало коэффициент увеличения изображения на плёнке  $K = 1,42$ . Толщина контрастной маски-поглотителя 5 мм, размер окна  $60 \times 120$  мм.

Полученные рентгеновские снимки приведены на рис. 2. По изображениям можно заключить, что в интервале времени, в течение которого производилась съёмка (диапазон  $0 \leq \Delta t \leq 30$  мкс заве-

домо перекрывает период передачи детонации от пиротехнического состава вторичному заряду), донца колпачков, метаемые продуктами детонационного разложения пиротехнического состава, не расходятся от общей для них плоскости начальной установки на 0,5 мм (толщину донца). При расчётной скорости детонации перхлората ртути 6 мм/мкс и учете её снижения при добавлении флегматизатора не более чем вдвое ожидаемая оценка «сверху» разновременности работы изделий лежит в пределах  $\Delta t_{снс} = \pm 0,17$  мкс, что можно признать удовлетворительным для применения в большинстве газодинамических схем.

Достижимый уровень давлений до 0,5 ГПа, подтверждается инициированием детонации в насыпном тэне, контактирующим со срабатываемым колпачком с ВС-2. Варьирование уровнем нагружающего импульса осуществляется за счет уменьшения толщины инициируемого светочувствительного слоя (до 0,1 мм).

### 3. Оптические методы регистрации

Принципиальный вопрос, связанный с использованием энергетических инициирующих составов, наличие фонового излучения, способного внести ограничения в теневые фотографические методы регистрации. Нами разработаны схемы теневого фотографирования [8, 9], позволяющие использовать широкоформатные ортохроматические фотопленки чувствительностью в несколько ед. ГОСТ при взрывном нагружении исследуемых образцов. Высокое разрешение схемы – более 300 линий/мм – и возможность визуализации оп-

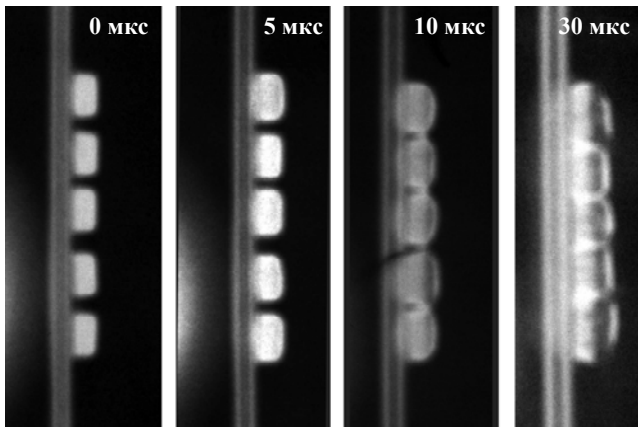


Рис. 2. Результаты рентгенографирования

тических неоднородностей позволяют получать волновой процесс исследуемых явлений на момент регистрации – циркуляцию ударной волны по материалу, что выражается генерацией возмущения при соответствующем распаде разрыва на границе свободной поверхности металла и воздуха. Теневая схема с использованием миниатюрного точечного взрывного источника света с  $T_{\text{яп}} \sim 41 \text{ кК}$  позволяет проводить модельные опыты по исследованию отколов, струеобразований, пыления, гидродинамических неустойчивостей при ударно-волновом нагружении исследуемых образцов, что делает ее привлекательной для уточнения характеристик параметров уравнения состояния исследуемых материалов, разработки и тестирования численных методик. На рис. 3 приведены характерные теневые фотографии процесса взрывного нагружения стальной пластинки толщиной 5 мм на разные моменты времени. Хорошо различимы особенности процесса – пылеобразование, осцилляции свободной поверхности, расщепление первой ударной волны, свечение возмущенного воздуха за ударной волной. На рис. 4 показана картина течения данного процесса на более позднее время регистрации.

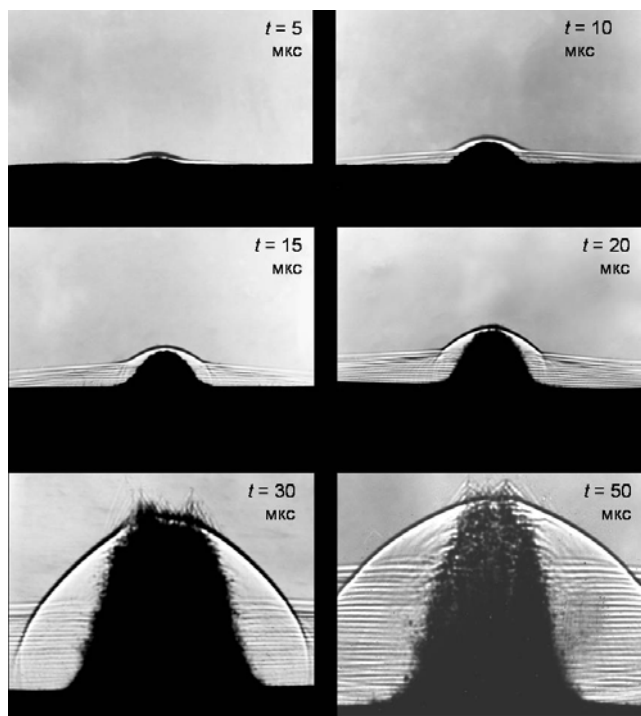


Рис. 3. Динамика нагружения закрепленной стальной пластины (толщина 5 мм, необработанная поверхность) (время в мкс отсчитывается от момента инициирования капсюля-детонатора, установленного под пластиной через 1-мм слой пластического состава на основе мелкодисперсного тэна)

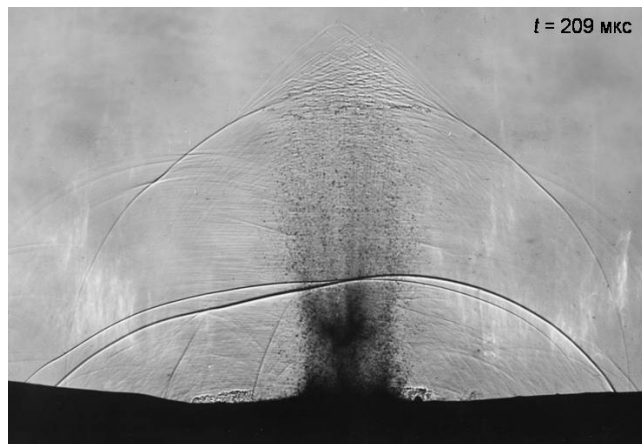


Рис. 4. Теневая картина процесса (рис. 3) на момент времени  $t = 209 \text{ мкс}$

Возможность регистрации при одновременном возбуждении волн в разных точках иллюстрируется ниже. На рис. 5 показано нагружение стальной пластины толщиной 4 мм тремя разнесенными источниками при их одновременном инициировании через 20 мкс после срабатывания. При этом крайний левый капсюль-детонатор (масса ВВ  $\sim 0,4 \text{ г}$ ) был установлен вплотную к пластине, центральный и крайний справа – в 1 мм от поверхности, пространство между капсюлем центрального детонатора (диаметр – 14 мм) и поверхностью пластины заполнено пластифицированным взрывчатым веществом по диаметру капсюля. Здесь и далее в качестве репера в плоскости регистрируемых объектов устанавливалась проволока диаметром 7,5 мм с шагом между витками 2,5 мм, длиной 50 мм.



Рис. 5. Одновременное нагружение стальной пластины тремя разнесенными источниками вдоль одной линии

Ударно-волновое нагружение прозрачных объектов при теневой регистрации позволяет визуализировать оптические неоднородности при выходе возмущений на границу нагружаемого тела с воздухом и одновременно – зоны потери прозрачности в самом теле. На рис. 6 приведена фотография одновременного нагружения с торцов образцов из плексигласа (справа) и LiF на момент 3,1 мкс от подрыва электродетонатора. Образцы – столбики высотой 27,5 мм с прямоугольным попе-

речным сечением со сторонами  $15 \times 10$  мм. На рис. 7 – одновременные нагружения с помощью электродетонаторов плексигласовых параллелепипедов размером  $(55 \times 55 \times 10)$  и  $(55 \times 10 \times 10)$ . Детонаторы располагались снизу, контактируя с центром нижней грани образцов. В ближайшей плоскости к фотопленке на образцы наносилась сетка  $10 \times 10$ .

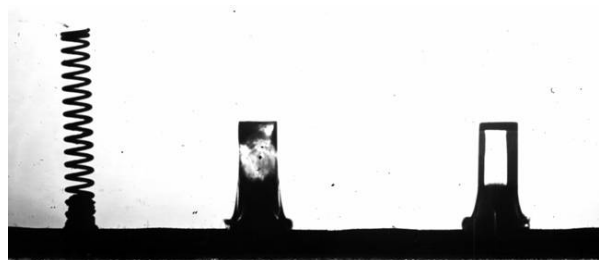


Рис. 6. Одновременное взрывное нагружение образцов из плексигласа (справа) и LiF (3,1 мкс)



а



б



в



г

Рис. 7. Одновременное взрывное нагружение образцов из плексигласа (6,1 мкс (а), 12 мкс (б), 20,1 мкс (в), 30 мкс (г))

## Выводы

Отработаны элементы методики, позволяющие визуализировать волновые течения теньвым методом при наличии фоновых излучений и при одновременном нагружении ряда исследуемых образцов. Предлагается использовать данную методику для исследования уединенных волн сжатия в различных материалах.

## Список литературы

1. Korteweg, D J, de Vries, G. (1895). On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal and on a new type of long stationary waves. *Phil. Mag.*, 39 (240), 322 .
2. Дрейден Г. В., Порубов А. В., Самсонов А. М., Семенова И. В., Сокурнская Е. В. Об экспериментах по распространению солитонов продольной деформации в нелинейно-упругом стержне // *Письма в ЖТФ*. 1995. Т. 21. Вып. 2. С. 42–46.
3. Самсонов А. М. О существовании солитонов продольной деформации в бесконечно нелинейно-упругом стержне // *ДАН СССР*. 1988. Т. 299, С. 1083–1086.
4. Ерофеев В. И., Кажаяев В. В., Семерикова Н. П. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность. М.: Физматлит, 2002.
5. Порубов А. В. Локализация нелинейных волн деформации. М.: Физматлит 2009.
6. S. Gerasimov M. Plushin A. Len Definition of diversity for ignition of light-sensitive pyrotechnic composition pellets with roentgraph method *Proceedings of the 14<sup>th</sup> seminar of New Trends in Research of Energetic Materials. University of Pardubice. Pardubice, Czech Republic, April 13-15, 2011. Part I. P. 160–163.*

7. Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. Изд. 2-е, Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011.

8. Герасимов С. И. Диагностика при исследовании эффектов, сопровождающих выход ударной волны на свободную поверхность при ударно-волновом нагружении // *Нелинейный мир*. 2009, № 7. Т. 7. С. 526.

9. Герасимов С. И., Файков Ю. И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света. Саров, 2010.

Статья поступила в редакцию 12.11.2012