

8. Акимов Л.Н., Губин С.А., Одинцов В.В. и др. // Докл. 5-го Всесоюз. совещ. по детонации. — Красноярск, 1991. — Т. 1. — С. 14.  
9. Антипенко А.Г., Дремин А.Н., Якушев В.В. // Докл. АН СССР. — 1975. — 225, № 5. — С. 1086.  
10. Петров Е.А., Сакович Г.В., Брыляков П.М. // Там же. — 1990. — 314, № 4. — С. 862.

142432, пос. Черноголовка,  
ИХФ в Черноголовке

Поступила в редакцию 28/VI 1993,  
после доработки — 27/VIII 1993

УДК 542.51

А.В. Чернай, В.В. Соболев, М.А. Илюшин,  
Н.Е. Житник

### О МЕТОДЕ ПОЛУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НАГРУЖЕНИЯ, ОСНОВАННОМ НА ЛАЗЕРНОМ ПОДРЫВЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

Для испытания прочности материалов и конструкций предложен метод создания на большой площади ( $\approx 1 \text{ м}^2$ ) механических импульсов, основанный на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов. Разработаны составы, обладающие рекордно высокой чувствительностью ( $4 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2$ ) к действию лазерного моноимпульса, а также технология получения на их основе покрытий на различных материалах. Предложенный метод позволяет получать нагрузки субмикросекундной длительности в диапазоне плотностей импульса (0,08—1,0) кПа·с.

Исследования прочности материалов и устойчивости конструкций, воспринимающих нагрузки ударного и взрывного типа, относятся к числу наиболее сложных задач механики. Быстрое изменение параметров процесса во времени, наличие волновых фронтов, возникновение пластических зон в материале конструкции — все это существенно затрудняет исследование и вынуждает прибегать к ряду упрощающих предположений и гипотез, подлежащих экспериментальной проверке. В связи с этим возрастает роль экспериментальных исследований, на основе которых можно получить необходимые данные о поведении материала и конструкции в условиях импульсного нагружения.

Особенно большие трудности возникают в исследованиях, связанных с изучением процесса воздействия на конструкции субмикросекундных импульсов умеренной интенсивности — (0,1—1,0) кПа·с, так как отсутствуют экспериментальные методы создания на больших площадях ( $\sim 1 \text{ м}^2$ ) таких импульсов. Традиционные методы нагружения, такие, как гидроудар [1], воздушный [2] и подводный взрыв [3], электрический взрыв фольги [4], подрыв листовых ВВ [5], нагружение с помощью ударных труб взрывного действия [6] и т.д., не позволяют реализовать такого рода воздействия.

Для решения этой проблемы в настоящей работе предлагается метод нагружения, основанный на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых материалов. Сущность метода заключается в нанесении на исследуемый объект взрывчатого состава в виде покрытия заданной толщины и последующем облучении (инициировании) всей его поверхности лазерным импульсом.

Для обоснования предлагаемого метода создания механических импульсов необходимо прежде всего оценить возможность достижения требуемых параметров нагружения. Для этого рассматривается плоский слой ВВ толщиной  $l$ , находящийся в контакте с преградой. В зависимости от типа используемого ВВ, дисперсности, длины волны инициирующего излучения, толщины слоя возможно объемное или поверхностное зажигание ВВ. В первом

© А.В. Чернай, В.В. Соболев, М.А. Илюшин, Н.Е. Житник, 1994.

случае взрывчатое превращение охватывает одновременно весь материал. Выделяющаяся при этом энергия приводит к резкому увеличению давления во всем слое ВВ, которое действует на преграду в течение времени распространения волны разрежения по продуктам взрыва. После отражения волны от преграды давление начинает падать.

Для определения величины переданного импульса хорошим приближением может быть решение задачи о разлете продуктов мгновенной детонации [7]. Воспользуемся результатом сопряжения особого решения, описывающего плоский разлет покоящегося газа, и общего решения, которое определяет движение газа за отраженной волной разрежения. Величина плотности импульса рассчитывается по формуле

$$J_s = \xi(2m_s E_s)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $m_s$  — масса ВВ, приходящаяся на единицу поверхности;  $E_s$  — внутренняя энергия продуктов детонации;  $\xi$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от показателя адиабаты продуктов взрыва. Приближенно можно считать, что величина  $E_s$  пропорциональна энергии химического превращения при постоянном объеме  $Q$ . Считаем, что показатель адиабаты продуктов взрыва  $\gamma = 3$ . Для этого значения  $\gamma$  коэффициент пропорциональности  $\xi = 0,865$ . Учитывая, что  $m_s = \rho l$ ,  $E_s = Q\rho l$ , из уравнения (1) находим

$$l = \frac{j_s}{\xi\rho Q}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность ВВ.

На примере азида свинца ( $\rho = 4,2$  г/см<sup>3</sup>,  $Q = 1667$  Дж/г) определим толщину слоя ВВ, взрыв которого создает удельный импульс  $0,1 \div 1,0$  кПа·с. Из формулы (2) следует  $l \approx 0,02 \div 0,2$  м.

Время действия давления на преграду можно оценить следующим образом:

$$t_+ \geq l/c_n, \quad (3)$$

где  $c_n$  — скорость звука в продуктах взрыва. Такая оценка, по-видимому, справедлива, так как давление на преграде после прихода волны разрежения изменяется обратно пропорционально  $t^3$  [7]

$$\frac{p_+}{p_-} = \left(\frac{l}{c_n t}\right)^3. \quad (4)$$

Подставив в (4)  $c_n = 3,7$  км/с,  $l = 0,02 \div 0,2$  мм, получим  $t \geq 10^{-8} \div 10^{-7}$  с.

В случае поверхностного зажигания детонация распространяется по нормали к поверхности преграды. Воздействие на преграду начинается в момент прихода к поверхности детонационной волны и продолжается во время разлета продуктов детонации. Для оценок величины переданного импульса воспользуемся решением задачи отражения детонационной волны от абсолютно жесткой стенки [7]. Плотность импульса, передаваемого стенке, определяется выражением

$$j_s = \frac{8}{27} \rho l D. \quad (5)$$

Оценка толщины слоя ВВ, сделанная по (5) ( $D = 5,5$  км/с для  $\rho = 4,2$  г/см<sup>3</sup> [8]), дает  $l \approx 0,015 \div 0,15$  см.

Учитывая, что действие детонационной волны начинается в момент ее прихода к стенке и продолжается в течение времени разлета продуктов в волне разрежения, следующей за волной детонации, можно считать, что время нагружения не будет превышать значений, приведенных выше.

Сравнивая полученную толщину покрытия из азида свинца, необходимую для реализации плотности импульса  $0,1-1,0$  кПа·с, видим, что

обе рассмотренные схемы взрывчатого превращения ВВ дают практически одинаковые результаты. В реальности скорее всего реализуется более сложный режим подрыва ВВ. Кроме того, необходимо учесть наличие переходного процесса от горения к детонации, что потребует более толстых покрытий из взрывчатых составов (ВС) для реализации заданных импульсов нагружения, а следовательно, длительность воздействия будет больше.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о принципиальной возможности достижения необходимых параметров импульсов давления с помощью метода нагружения, основанного на лазерном инициировании детонационного превращения покрытий из ВС. Для практической реализации данного метода нагружения необходимо найти чувствительные к лазерному импульсу ВВ и создать взрывчатые составы для получения покрытий на изучаемых материалах.

Чувствительность ВВ к действию лазерного импульса исследовали с использованием твердотельного ОКГ на неодимовом стекле (ГОС-30М), работающего в режиме модуляции добротности резонатора. Длительность лазерного импульса на полувысоте интенсивности составляла  $\approx 25$  нс. В качестве активного элемента применялся активированный неодимом стержень из стекла ГЛС-6 ( $d = 10$  мм,  $l = 300$  мм) со скошенными торцами. Для получения одномодовой структуры лазерного пятна в резонатор вводилась диафрагма диаметром 1,8 мм. Форма лазерного импульса контролировалась осциллографом С8-14, на вход которого подавался сигнал с фотоэлектрического преобразователя ФК-2.

Энергия лазерного импульса измерялась путем отщепления части излучения ОКГ тонкой стеклянной пластиной за счет френелевского отражения. Для сохранения подобия геометрических условий расстояния от делительной пластины до измерительной головки прибора ИМО-2Н и образца ВВ выбирались одинаковыми. При калибровке измерительного тракта использовался калориметр ИКТ-1Н, устанавливаемый на место образца ВВ. Плотность лазерной энергии на образце изменялась с помощью отрицательной линзы и калиброванных светофильтров. Для инициирования ВВ использовалась центральная часть пучка по уровню  $\approx 0,8$ , которая вырезалась диафрагмой диаметром 4 мм. Такая же диафрагма устанавливалась перед измерительной головкой ИМО-2Н. Полная энергия лазерного импульса составляла 40 мДж.

Образцы (ВС) состояли из смеси мелкодисперсного порошка ВВ и связующего вещества, в качестве которого использовались органические лаки, позволяющие получать на различных материалах (сталь, алюминий, пластмасса и т.д.) покрытия заданной толщины.

Чувствительность ВС к лазерному импульсу исследовалась на образцах покрытий с поверхностной плотностью массы  $50$  мг/см<sup>2</sup>, наносимых на алюминиевую фольгу толщиной 0,1 мм. Площадь поверхности покрытия составляла  $\approx 1$  см<sup>2</sup>, массовая концентрация связующего вещества в покрытии 8—10 %.

Проведены эксперименты по определению чувствительности ряда взрывчатых составов на основе комплексных ВВ. При отборе ВС исходили из соображений возможности их использования для практической реализации предлагаемого метода нагружения. Прежде всего этот метод должен позволять нагружение на площади в десятки квадратных сантиметров при использовании доступных для потребителя лазерных установок. К таким установкам следует отнести твердотельный ОКГ типа ГОС-1001, на базе которого можно получать моноимпульсы ( $\tau = 20 \div 50$  нс) с энергией  $\sim 100$  Дж.

В опытах установлены четыре состава, удовлетворяющие указанным требованиям. Критические плотности энергии инициирования, соответствующие 50 %-й вероятности подрыва, следующие (в скобках указаны максимально возможные площади инициирования лазерным импульсом с энергией 100 Дж): ВС2 —  $4 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> (2,5 м<sup>2</sup>), ВС7 —  $5 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> (2 м<sup>2</sup>), ВС16 —  $8 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> (1,25 м<sup>2</sup>), ВС17 —  $4 \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup> (0,25 м<sup>2</sup>). Погрешность определения этих величин не превышала 20 %.

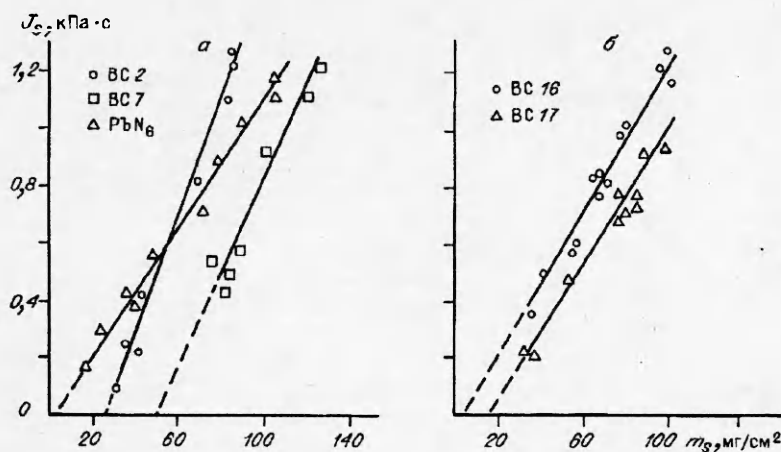


Рис. 1.

Для измерения импульса нагружения, возникающего при лазерном подрыве ВС, использовался баллистический маятник. Погрешность измерения не превышала 7%. Диски маятника изготавливались из тех материалов, для которых необходимо было получить характеристические зависимости плотности импульса  $J_s$  от поверхностной плотности ВС  $m_s$ . Приводимые в дальнейшем зависимости  $J_s(m_s)$  соответствуют нагружению стальных образцов. При измерении импульсов использовались такие же образцы, как и при исследовании чувствительности. Лазерный пучок расширялся, чтобы плотность энергии в центре пучка не превышала более чем на 20% плотность энергии на периферии образца. Кроме того, средняя плотность энергии излучения на образце в 2 раза превышала критическое значение. В этом случае реализовался плоский подрыв образцов ВС, в чем убеждались по характеру разрушения материалов, нагружаемых при подрыве покрытий из ВС площадью 1 и 20 см<sup>2</sup>.

На рис. 1 приведены зависимости  $J_s(m_s)$  для различных ВС, а также для азида свинца, образцы которого готовились прессованием при давлении  $2 \cdot 10^8$  Па. Экспериментальные данные обрабатывались по методу наименьших квадратов. Видно, что при уменьшении толщины покрытия плотность импульса снижается по линейному закону. Однако получить сколь угодно малые импульсы не представляется возможным, так как начиная с некоторой толщины покрытия не удастся вызвать подрыв ВС при плотностях энергии лазерного излучения, соответствующих критическим значениям подрыва толстых образцов. Дальнейшее уменьшение  $J_s$  возможно только при увеличении плотности энергии иницирующего лазерного импульса, что снижает возможности метода нагружения, так как уменьшается площадь подрыва ВС. Минимальное значение  $J_s = 0,08$  кПа·с получено при подрыве покрытия из ВС2 с поверхностной плотностью  $m_s = 30$  мг/см<sup>2</sup> (см. рис. 1).

Из соотношений (2), (5) следует, что  $J_s \rightarrow 0$  при  $m_s \rightarrow 0$ . Однако в экспериментах этого не наблюдается. Это значит, что часть массы ВС не дает вклада в регистрируемый импульс нагружения. Вероятно, эта часть расходуется при переходе горения в детонацию.

Тангенс угла наклона прямых на рис. 1 коррелирует с величиной скорости детонации ВВ, на основе которых приготовлены взрывчатые составы, что согласуется с зависимостями (2), (5).

Наиболее полная характеристика механического импульса, используемого при изучении прочности материалов, — профили давления на нагружаемой поверхности. Получение зависимостей давления от времени в данном методе нагружения представляет самостоятельную задачу, сложность решения которой обусловлена малыми временами (< 1 мкс) и высокими амплитудами импульсов нагружения.

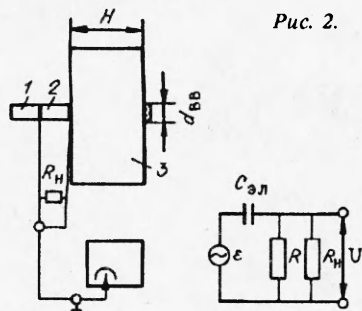


Рис. 2.

В настоящей работе предпринята попытка экспериментальной оценки длительности механического импульса, возникающего при подрыве ВС. Для этого использовался датчик давления, схема которого приведена на рис. 2. В качестве чувствительного элемента использовался пьезоэлемент 2 из керамики ЦТС-19, который размещался между ослабителем 3 ударной волны (УВ) и стержнем 1. Ослабитель и стержень изготовлены из латуни, так как этот материал обладает волновым сопротивлением, близким к волновому сопротивлению

керамики. Необходимость применения ослабителя вызвана высокой чувствительностью пьезокерамики и возможностью ее разрушения большими ударными нагрузками. В основе работы ослабителя лежит процесс превращения плоской УВ в сферическую на расстоянии  $\approx d_{\text{вв}}$ . Распространение УВ (как плоской, так и сферической) сопровождается уменьшением ее интенсивности и увеличением времени действия импульса нагружения.

Для получения экспериментальной оценки длительности нагружения удобно использовать сферическую УВ, так как для нее характерно быстрое затухание интенсивности и малое удлинение волны нагружения. Так, во втором акустическом приближении [9] (понимая под первым то, которое соответствует обычному волновому уравнению) интенсивность плоской волны затухает с расстоянием по закону  $p \sim 1/x$ , а сферической —  $p \sim 1/x \ln(x/A)$ , длина импульса в плоской волне  $\delta \sim x$ , а сферической  $\delta \sim \ln(x/A)$ .

Учитывая, что длительность импульса нагружения после ослабителя заведомо больше начальной, датчик рассчитывался на регистрацию воздействия длительностью в несколько микросекунд. В рассматриваемой конструкции датчика использовался образец ЦТС длиной 15 мм. Эквивалентная схема включения пьезоэлемента приведена на рис. 2, где  $c_{\text{эл}}$  — собственная электрическая емкость пьезоэлектрика;  $R$  — сопротивление утечки (для идеального диэлектрика  $R = \infty$ ) и  $R_n = 50$  Ом — сопротивление нагрузки. Такое включение пьезоэлектрика соответствует его работе в режиме источника тока, что позволяет получать высокое временное разрешение ( $\approx 10^{-10}$  с), определяемое временем распространения электрического поля в материале.

Экспериментальная оценка длительности нагружения проведена на образцах с массовой плотностью взрывчатого состава ВС2 30—80 мг/мм<sup>2</sup>. Длина используемого ослабителя  $H = 70$  мм. Полученные осциллограммы напряжения показывают, что плоская УВ действительно вырождается в сферическую. На это указывает наличие области разрежения, следующей за областью сжатия. Длительность импульса сжатия растет с увеличением толщины покрытия из ВС. В указанном диапазоне поверхностной плотности ВС2 длительность импульса не превышала 0,5 мкс. Учитывая неизбежное удлинение импульса при прохождении ослабителя, можно утверждать, что лазерным инициированием взрывчатого состава ВС2 удастся получать нагрузки субмикросекундной длительности в диапазоне плотностей импульса 0,08—1 кПа·с.

Из рис. 1 следует, что импульс заданной плотности можно реализовать с помощью одного из приведенных взрывчатых составов. При этом длительности импульсов будут различными, так как для этого необходимы покрытия разной толщины для получения одной и той же плотности импульса. Другими словами, используя различные составы, можно в какой-то мере изменять длительность воздействия.

Таким образом, предлагаемый метод нагружения, основанный на лазерном подрыве взрывчатых составов, позволяет получать субмикросекундные импульсы интенсивностью 0,1—1,0 кПа·с. Учитывая особенности лазерного инициирования, этот метод можно использовать при испытании прочности материалов и элементов конструкций сложной формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минеев В.Е. Исследования устойчивости замкнутых цилиндрических оболочек при динамическом действии всестороннего сжатия // Исследования по теории пластин и оболочек. — Казань, 1970. — Вып. VI—VII. — С. 596—623.
2. Седов Л.Т. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1972.
3. Коул Р. Подводные взрывы. — М.: ИЛ, 1950.
4. Денвен Р., Вильсон П. Электрический взрыв проводников. — М.: Мир, 1965. — С. 172—184.
5. Уитмер, Балмер, Лич, Пиан. Большие динамические деформации балок, колец, пластинок и оболочек // Ракетная техника и космонавтика. — 1963. — 1, № 8. — С. 111—123.
6. Кармишин А.В., Скурлатов Э.Д., Старцев В.Г. и др. Нестационарная аэроупругость тонкостенных конструкций. — М.: Машиностроение, 1982.
7. Станюкович К.П. Неустановившееся движение сплошной среды. — М.: Наука, 1971.
8. Чумак А.Ф., Власов А.Д., Муравина Л.И. О некоторых параметрах детонации зарядов из взрывных неорганических материалов // ФГВ. — 1977. — 13, 4. — С. 650—652.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. — М.: Наука, 1974.

320600, г. Днепропетровск,  
Горный институт

Поступила в редакцию 7/VII 1992,  
после доработки — 21/IX 1993

УДК 662.215.12

Г.Т. Володин

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

На основе данных экспериментов решена в квадратурах неавтономная задача о развитии взрыва конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Приведены распределения основных параметров, характеризующих возмущенную область в некоторые фиксированные моменты времени на начальном участке взрыва.

Исследование выполнено с помощью известного метода Т.М. Саламахина [1,2], предполагающего степенной профиль плотности в возмущенной области. Расчеты выполнены для тротила и всех возможных видов симметрии одномерных движений — плоской, цилиндрической и сферической.

Как известно [2,3], химическое превращение ВВ в зависимости от его свойств, размеров и энергии инициатора может начаться горением или взрывом. В практических расчетах сложный процесс взрыва с переменной скоростью обычно заменяют детонацией, для которой скорость ударной волны (УВ) постоянна, пренебрегая начальным участком, где взрыв переходит в детонацию [2]. Однако эксперименты показывают, что начальный участок имеет существенную протяженность (например, для тротила она в некоторых случаях достигает 72 мм [4]) и, следовательно, в расчетах по определению взрывных нагрузок им пренебрегать нельзя. Кроме того, представляет самостоятельный интерес исследование процесса перехода взрыва в детонацию.

#### Постановка задачи

Пусть в начальный момент времени  $t = 0$  в центре симметрии (в точке, на оси, плоскости) заряда однородного конденсированного ВВ образуется возмущенная область с радиусом (характерным размером)  $a_0$ . Интенсивность (амплитуда [4]) этого возмущения такова, что возникает УВ, которая распространяется с переменной скоростью  $D$  по основному заряду ВВ, переходя на некотором конечном расстоянии  $r_*$  в режим нормальной детонации.

Требуется найти характерные размеры начального участка взрыва, закон движения фронта УВ, параметры на нем, закон выделения энергии на фронте