

05
Распределение электропроводности при детонации взрывчатого вещества на основе ТАТБ

© Н.П. Сатонкина, И.А. Рубцов

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
 630090 Новосибирск, Россия
 Новосибирский государственный университет,
 630090 Новосибирск, Россия
 e-mail: snp@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 4 марта 2015 г.)

Получено распределение электропроводности при детонации взрывчатого вещества на основе ТАТБ ($C_6H_6N_6O_6$) для двух загрузочных плотностей — 1.3 и 1.8 г/см. На всех профилях выделен пик длительностью приблизительно $0.1 \mu s$, который хорошо согласуется с длительностью зоны химической реакции, известной из литературы. Наблюдается протяженная область электропроводности в волне Тейлора.

Введение

Электропроводность интересна как для практического использования, так и как чувствительный инструмент для диагностики процессов, происходящих в детонационной волне. Так, для большинства взрывчатых веществ (ВВ) узкая зона энерговыделения и интенсивной химической реакции проявляется в виде интенсивного пика на зависимости электропроводности от времени. Это позволяет без вмешательства во взрывной процесс определять продолжительность зоны реакции в детонационной волне.

Современные модели позволяют только качественно выделить ряд механизмов, определяющих электропроводность вещества в условиях взрыва. Для многих взрывчатых материалов наблюдается связь между величиной электропроводности и наличием избытка углерода в продуктах детонации. Исследование таких веществ представляется перспективным для выявления механизмов электропроводности. В настоящей работе исследовано мощное бризантное взрывчатое вещество ТАТБ, содержание углерода в котором составляет 28% по массе, его кислородный баланс — 55.8%, что меньше, чем для тротила, но значительно больше, чем для других традиционных ВВ.

Ранее в [1] проводились исследования электрических свойств ВВ на основе ТАТБ при ударном нагружении, где тонкая пластина ВВ нагружалась ударной волной разной интенсивности при минимизации изменения объема. Получены две области роста проводимости, оценено значение электропроводности на обоих участках.

Исследования электрических свойств ВВ при детонации показали, что возникновение проводимости в детонационной волне происходит не позднее 10 ns после прохождения фронта [2], что позволяет проследить эволюцию электропроводности в химическом пике. Разработанный и использованный дифференциальный метод измерения электропроводности имеет ряд достоинств: информация о процессах, происходящих в детонационной волне, получена в реальном времени;

заряд окружен массивной медной оболочкой, благодаря чему происходит слабый радиальный разлет продуктов детонации и течение близко к одномерному; разрешение метода зависит от параметра эксперимента — толщины диэлектрика, — который легко изменять в зависимости от задач: при использовании тонкого диэлектрика и высокого разрешения в ряде ВВ можно исследовать область энерговыделения, при увеличении толщины и понижении разрешения хорошо отслеживаются процессы вдали от фронта.

Постановка эксперимента

Экспериментальная постановка и обработка экспериментальных данных подробно рассмотрены в [3,4]. Здесь мы приведем краткое описание эксперимента. Взрывчатое вещество располагалось в толстостенной медной коаксиальной ячейке (рис. 1). Внешний диаметр коаксиала $b = 8 \text{ mm}$, диаметр внутреннего электрода $c = 2 \text{ mm}$. Внешний электрод был составным, его части 1, 2 плотно соединялись резьбой, внутренний медный электрод 3 был погружен в ВВ, закреплялся в пробке из оргстекла 4, которая фиксировалась медным болтом 5. В полости внешнего электрода размещалась тороидальная катушка 7, служившая датчиком электропроводности.

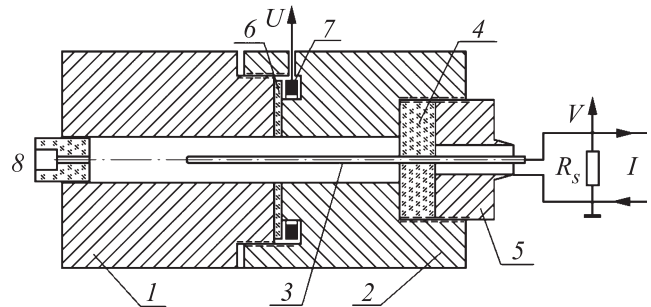


Рис. 1. Схема измерений и экспериментальная ячейка.

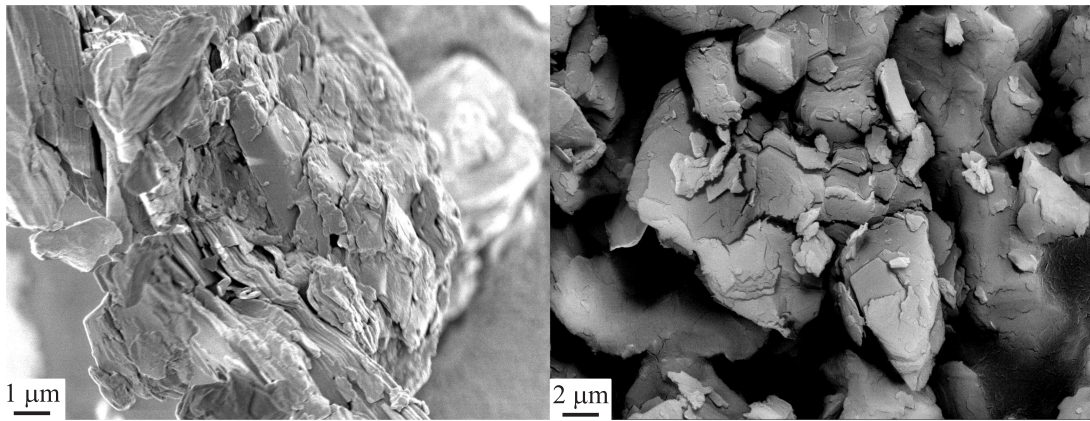


Рис. 2. Фотографии частиц ВВ с микроскопа.

Узкая щель, соединяющая полость с измерительным объемом ячейки, заполнялась диэлектриком б (толщиной 0.3–1.3 mm).

Инициирование заряда производилось гексогеном через осевой канал диаметром 2.4 mm в пробке из оргстекла 8. Питание ячейки током I осуществлялось от конденсатора через балластное сопротивление; параллельно ячейке включался шунт R_s . Измерялись питающее напряжение $V(t)$ и сигнал на датчике $U(t)$. Электропроводность в плоскости щели пропорциональна сигналу с катушки:

$$\sigma(x) = \frac{\ln(b/c)U(t)}{2\pi DMV}.$$

Здесь $x = Dt$ — расстояние, на которое фронт волны удалился от щели к моменту времени t , D — скорость детонации. Корректировка сигнала позволяет устранить искажение $U(t)$ из-за индуктивности датчика и получить профиль электропроводности за фронтом в предположении стационарности волны. Пространственное разрешение оценивается в четверть толщины изолятора б. При каждой плотности проведено 2 эксперимента.

Частицы ВВ, использованные в экспериментах, имеют слоистую структуру, что хорошо иллюстрирует рис. 2, благодаря чему ВВ легко уплотняется. Средний размер частиц около 5 μm. Плотность 1.3 g/cc близка к насыпной и получена при легком уплотнении под весом пуансона, однородность удовлетворительная. Для получения плотности 1.8 g/cc прессование производилось порциями по 5 mm на специализированном прессе.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная запись показана на рис. 3. Сигнал U в момент $37.2 \mu s$ индуцирован стартовым током при достижении детонационной волной центрального электрода, в этот момент напряжение V начинает спадать. Наблюдается хорошая однородность заряда. Основной сигнал U обратной полярности с катушки начинается около $39 \mu s$. В момент $46.8 \mu s$ происходит замыкание обоих каналов.

Профиль электропроводности, соответствующий эксперименту, изображенному на рис. 3, приведен на рис. 4 (маркер 2), где показаны распределения электропроводности при плотностях 1.3 g/cc (1) и 1.8 g/cc (2, 3). Для удобства восприятия начало сигнала сдвинуто в нуль.

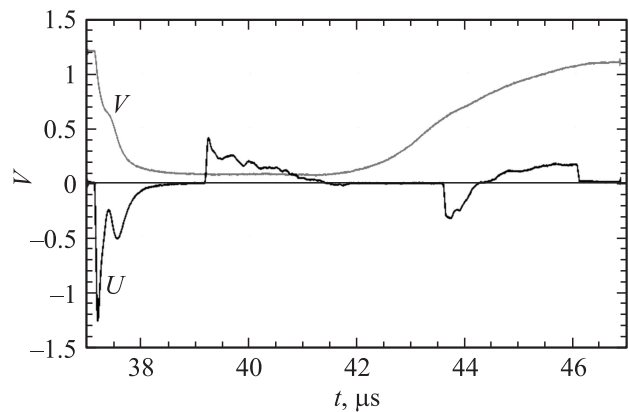


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы U и V при начальной плотности 1.8 g/cc. Сигнал V записан через делитель 1 : 10.

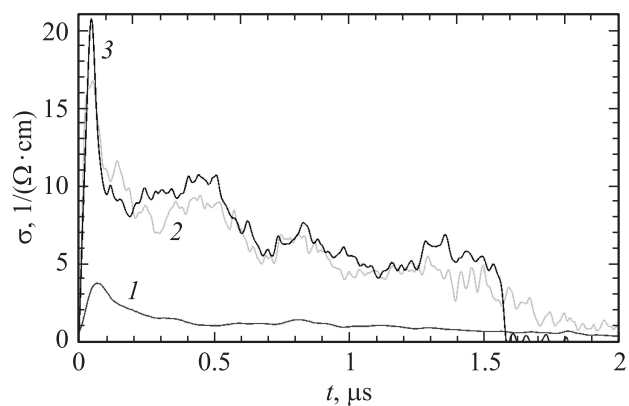


Рис. 4. Распределение электропроводности: 1 — $\rho = 1.3 \text{ g/cc}$, $D = 5.3 \text{ km/s}$, 2 — $\rho = 1.8 \text{ g/cc}$, $D = 7.26 \text{ km/s}$, 3 — $\rho = 1.8 \text{ g/cc}$, $D = 6.9 \text{ km/s}$.

На профилях выделяется сравнительно узкая область с максимальным значением — пик — длительностью около $0.1 \mu\text{s}$, что близко к литературным данным для ТАТБ по длительности химического пика [1,5,6]. Некоторое расхождение значений связано с разными диаметрами зарядов. Ранее корреляция между длительностями химического пика и пика электропроводности для других ВВ обсуждалась в работах [3,4], выяснено, что их значения близки. Величина электропроводности в волне Тейлора значительна, составляет примерно треть максимального значения, имеет продолжительность больше $2 \mu\text{s}$, для меньшей плотности сохраняя постоянное значение $1 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$. Слабый спад электропроводности в волне Тейлора вызван разгрузкой продуктов детонации и деформацией измерительной ячейки. Профили 2 и 3 повторяют друг друга, несмотря на кажущуюся стохастичность. Период колебаний в волне Тейлора составляет несколько миллиметров, не соответствует высоте порций при прессовании, не коррелирует с границами порций. „Ступеньки“, которые выделяются на профилях, по нашему мнению, могут быть как отражением трехмерности детонационной волны, которая была отмечена в работах [5,7,8] для других ВВ, так и могут говорить о многостадийности кинетики химической реакции, которая не заканчивается в области химического пика.

Как максимальное значение, так и остаточная электропроводность увеличиваются с плотностью, что соответствует тенденции для других ВВ [3]. Максимальное значение электропроводности возрастает в 4 раза при увеличении плотности на 40%. Такая же сильная зависимость электропроводности от плотности наблюдается для богатого углеродом тротила.

Надо отметить хорошую экспериментальную повторяемость для ТАТБ, в экспериментах с плотностью 1.8 g/cc на обоих профилях наблюдалось раздвоение первого пика, что может быть влиянием отражения от центрального электрода при натекании на него детонационной волны, колебание электропроводности с периодичностью $0.22\text{--}0.38 \mu\text{s}$, наличие дополнительной зоны проводимости.

Данные настоящей работы удовлетворительно согласуются с данными работы [1] как по максимальным значениям, так и по длительности области, которую уместно соотносить с химическим пиком. В указанной работе максимальное значение электропроводности составляет $3.5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Примечательно наличие дополнительной области электропроводности в момент $43.5 \mu\text{s}$ длительностью $2.3 \mu\text{s}$ на сигнале U рис. 3. Первый пик относительно узкий, выходит на нуль через $0.75 \mu\text{s}$, сигнал обратной полярности явного пика не имеет, длится $1.5 \mu\text{s}$, при пересчете на электропроводность в приближении отсутствия расширения величиной около $0.3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$. К моменту $43.5 \mu\text{s}$ внутренний радиус оболочки в области конца электрода увеличен на 20%, в области разреза на 13%, что не приводит к существенному искажению измерительной ячейки (оценка сделана с

использованием функции, получение которой изложено в работе [9]).

К этому моменту напряжение V на ячейке еще присутствует, что означает наличие магнитного потока через измерительный контур. При деформации катушки вследствие расширения оболочки заряда и уменьшении магнитного потока должен порождаться сигнал полярности такой же, как у основного сигнала в момент $39 \mu\text{s}$. Здесь же присутствует картина, качественно повторяющая полезный сигнал, который мы видим при детонации. Это не является результатом волны отражения, которая изменила бы сигнал V и наблюдалась бы сразу после окончания детонации.

Так сигнал мог бы выглядеть, если бы по продуктам через $6.3 \mu\text{s}$ после натекания на конец электрода (через $2.1 \mu\text{s}$ после окончания детонации) шла волна проводимости в объеме в ту же сторону, что и детонация. Эта волна не находит явного отражения на сигнале V , так как величина электропроводности незначительная. Характер сигнала говорит о продолжительной зоне проводимости, как если бы химическая реакция, высвобождающая носители заряда, проходила в объеме. На это указывает малое время между началом первого пика при $t = 43.5 \mu\text{s}$ и моментом смены полярности при $t = 44.5 \mu\text{s}$.

Возможная причина этого сигнала — процессы в волне разгрузки, где при снижении температуры происходит смещение химического равновесия в сторону увеличения количества свободного углерода. Подтверждением этого может служить приведенная в [10] адиабата разгрузки ТАТБ, где при падении плотности начинает расти выход конденсированного углерода.

Явление дополнительной волны электропроводности присутствовало для плотности 1.8 g/cc в обоих экспериментах, но отсутствовало для меньшей плотности. Ранее подобный сигнал наблюдался только для литого тротила, богатого углеродом, как и ТАТБ.

Выводы

Для исследованных плотностей на распределении электропроводности выделяется пик, по длительности близкий к химическому пику, известному из литературы. Максимальное значение электропроводности при плотности 1.8 составило $20 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, электропроводность в волне Тейлора значительна. Метод электропроводности продемонстрировал высокую чувствительность к процессам, происходящим при детонации ВВ на основе ТАТБ. Так, обнаружены область проводимости, следующая за основной волной через несколько микросекунд, и колебания электропроводности в волне разгрузки с периодичностью несколько миллиметров.

Авторы выражают признательность Э.Р. Прууэлу за ценные замечания и продуктивные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-03-01039.

Список литературы

- [1] Горшков М.М., Гребенкин К.Ф., Жеребцов А.Л., Заикин В.Т., Слободенюков В.М., Ткачев О.В. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 1. С. 92–98.
- [2] Бриш А.А., Тарасов М.С., Цукерман В.А. // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. № 6(12). С. 1543–1549.
- [3] Еришов А.П., Сатонкина Н.П., Иванов Г.М. // Химическая физика. 2007. Т. 26. № 12. С. 21–33.
- [4] Еришов А.П., Сатонкина Н.П., Иванов Г.М. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 24. С. 63–69.
- [5] Лобойко Б.Г., Любятинский С.Н. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 6. С. 45–64.
- [6] Федоров А.В., Михайлов А.Л., Антошок Л.К., Назаров Д.В., Финюшин С.А. // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 3. С. 62–68.
- [7] Федоров А.В. // Химическая физика. 2005. Т. 24. № 10. С. 13–21.
- [8] Федоров А.В., Меньших А.В., Ягодин Н.Б. // Химическая физика. 1999. Т. 18. № 11. С. 64–68.
- [9] Еришов А.П., Сатонкина Н.П., Дибиров О.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 5. С. 97–108.
- [10] Электронный ресурс. Режим доступа: http://ancient.hydro.nsc.ru/chem/doc/chem_z.pdf, слайд 10.