

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ДИНАМИКИ РОСТА НАНОСТРУКТУР
В ДЕТОНАЦИОННЫХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ С ПОМОЩЬЮ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.
ПРОЕКТ № 120**

Координаторы: акад. Титов В. М., д-р физ.-мат. наук Аульченко В. М.,
канд. хим. наук Толочко Б. П.

Исполнители: ИГиЛ, ИХТТМ, ИЯФ СО РАН

Экспериментальная база данного проекта — станция «Взрыв» на одном из каналов синхротронного излучения ускорителя ВЭПП-3 ИЯФ — была создана, в основном, в 2000—2002 гг. при работе по предшествующему интеграционному проекту «Исследование поведения вещества в детонационных процессах с помощью синхротронного излучения с наносекундным разрешением».

Проведена модернизация детектора излучения DIMEX, которая резко снизила радиационную нагрузку на детектор путем установки быстродействующего затвора, пропускающего излучение только во время рабочего процесса. Одновременно тестированы данные по искажениям при больших градиентах сигнала и уточнена возможность привязки радиационных сигналов к положению фронта детонации.

В ходе выполнения проекта впервые выполнены прямые измерения распределения плотности вещества в зоне химической реакции (ЗХР) детонационной волны с достаточно большой точностью — несколько процентов по амплитуде и при пространственном разрешении не хуже 0,1 мм (рис. 1). Эти данные сейчас наиболее точные из известных в мировой литературе. Прямыми измерениями показано, что распределение плотности в ЗХР при диаметре заряда больше критического практически не зависит от диаметра заряда.

Особое внимание уделено разлету продуктов детонации (ПД) в непосредственной близости к фронту детонации, так как именно здесь возможна максимальная ошибка в определении величины плотности. Полученные значения плотности в ЗХР для тротила (прес-

сованного и литого), прессованных гексогена и ТЭНа, сплава тротил—гексоген (ТГ) 50/50 могут являться реальным справочным материалом для специалистов в области физики взрыва.

Сочетание методики малоуглового рассеяния синхротронного излучения на частицах твердой фазы в ПД (далее — МУРР, малоугловое рассеяние рентгеновского излучения) с уникальной возможностью (благодаря использованию детектора DIMEX) получать спектры интенсивности рассеяния по углам с частотой 4 МГц при экспозиции 1 нс позволяет дать ответ на принципиальные вопросы динамики роста наночастиц углерода (алмаза и графита) в ПД при детонации взрывчатого вещества (ВВ) с отрицательным кислородным балансом. Уточним, что во всех этих экспериментах ус-

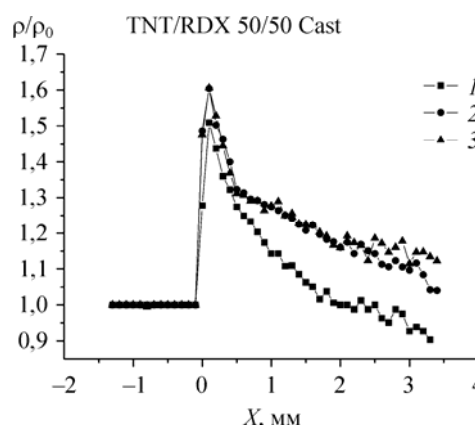


Рис. 1. Изменение относительной плотности на фронте вдоль оси заряда при детонации литого ТГ 50/50 диаметром, мм: 7 (1), 10 (2), 12,5 (3).

Fig. 1. The relative density vs distance along the charge axis upon the detonation of the cast TNT/RDX 50/50, mm: 7 (1), 10 (2), 12.5 (3).

коритель работает в «одноранчевом» режиме, при котором на орбите имеется компактный сгусток электронов (банч), делающий оборот по кольцу за 250 нс (примерно, точная частота — 4,07 МГц).

Вопрос о времени конденсации углерода за фронтом детонационной волны, помимо чисто научного значения, является важным и с практической точки зрения. В настоящее время существует тенденция к использованию более безопасных (для внешнего воздействия) ВВ. А они, как правило, дают при детонации много свободного углерода. Конденсация углерода за пределами ЗХР, естественно, будет влиять на термодинамические параметры ПД, в частности, понижать скорость детонации ввиду «затянутого» энерговыделения.

Ответ на этот вопрос был получен с помощью своеобразных «маркеров». В заряд прессованного тротила $\varnothing 15$ мм при изготовлении вводилось 8 % (по весу) ультрадисперсного алмаза (УДА). Перед приходом детонационной волны детектор DIMEX фиксирует сигнал МУРР от этих частиц. После прихода детонационной волны амплитуда интегрального сигнала МУРР монотонно растет, начинаясь от уровня сигнала от заранее введенного УДА. Рост связан как с дополнительным выделением конденсированного углерода, так и с уменьшением плотности при разлете ПД. При взрыве

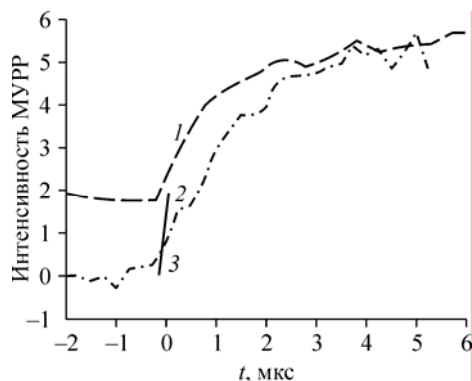


Рис. 2. Интегральный сигнал МУРР в смеси тротил + 8 % УДА (1), то же для заряда ТГ 50/50 (2), рост сигнала МУРР при конденсации в зоне химической реакции (3).

Fig. 2. Total SAXS signals for the charges: TNT + 8 % nanodiamonds (1), TNT/RDX 50/50 (2), hypothetical form of the SAXS signal at condensation inside the reaction zone (3).

такого же заряда из смеси ТГ 50/50, которая дает при детонации 8 % УДА от веса заряда, интегральный сигнал МУРР начинается вблизи нулевой отметки и дает кривую суммарной интенсивности $I(t)$, практически параллельную первой, но со сдвигом ~ 1 мкс. Если принять гипотезу о завершении конденсации хотя бы только алмазной фазы (как более высокоэнергетического процесса) в ЗХР — сигнал должен был достичь начального уровня предыдущего эксперимента за время $t \leq 0,15$ мкс, что соответствует времени химической реакции для этого ВВ.

Сопоставление этих двух экспериментов показывает, что образование твердой фазы углерода (в том числе алмазной) продолжается и вне ЗХР, т. е. за плоскостью Чепмена—Жуге.

К такому же выводу приводит и другая серия экспериментов, в которой использовались заряды $\varnothing 15$ мм, состоящие из двух различных ВВ: ТЭНа, который не дает при детонации свободного углерода, и ТГ 50/50, где ввиду присутствия тротила выделяется много свободного углерода. Плоская граница раздела перпендикулярна оси составного заряда.

В экспериментах фиксировался интегральный сигнал МУРР при передаче детонации от заряда из ТЭНа к заряду из ТГ 50/50. На расстоянии $h = 8$ мм от границы раздела сигнал при детонации ТГ 50/50 полностью идентичен сигналу в заряде, целиком состоящем из этого ВВ. Но при $h = 2$ мм эта идентичность сохраняется только при $t < 1$ мкс, затем рост амплитуды сигнала прекращается (при $h = 8$ мм амплитуда растет в течение ~ 2 мкс). Таким образом, и в этих экспериментах «область влияния» не менее 1 мкс (скорость детонации ~ 8 км/с), при «мгновенной» конденсации сигналы были бы идентичны.

Описанные эксперименты согласуются и с результатами обработки последовательных кадров распределения интенсивности рассеяния (детектор DIMEX позволяет запоминать 32 кадра с интервалом между ними 250 или 500 нс). Зафиксировано изменение угла наклона (увеличение крутизны) кривой интенсивности со временем (рис. 2). Для МУРР в первом приближении угол отклонения $\theta \sim \lambda/\alpha$ (λ — длина волны, α — размер частицы). Поэтому для всех длин волн рост крутизны при $\theta \rightarrow 0$

означает увеличение размера частиц со временем. Напомним, что время химической реакции ($\sim 0,15$ мкс) меньше одного интервала между импульсами синхротронного излучения.

Ширина зоны химической реакции есть постоянная для данного ВВ (при постоянных плотности, гранулометрическом составе и т. п.). А газодинамика процесса разлета ПД и,

соответственно, изменение в них термодинамических параметров зависят и от «внешних» условий — прежде всего от размеров заряда ВВ. Поэтому следует ожидать, что и размер области, в которой будут осуществляться синтез УДА и конденсация углерода, также будет меняться пропорционально масштабу эксперимента.

Основные публикации

1. *Тен К. А., Евдоков О. В., Жогин И. Л. и др.* Измерение плотности в зоне реакции цилиндрических зарядов малого диаметра с помощью синхротронного излучения// Энергетические материалы и физика детонации/ Под ред. А. Л. Михайлова/ ВНИИЭФ. Саров, 2005. С. 675—680.
2. *Ten K. A., Evdokov O. V., Zhogin I. L. et al.* Density distribution reconstruction of the detonation products of high explosives with using synchrotron radiation data// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 2005. V. 543, Iss. 1. P. 170—174.
3. *Titov V. M., Tolochko B. P., Ten K. A., Luk'yanchikov L. A., Zubkov P. I.* The formation kinetics of detonation nanodiamonds// Synthesis, Properties and Applications of Ultrananocrystalline Diamond/ D. M. Gruen et al. (eds). Springer, Netherland, 2005. P. 169—180.
4. *Тен К. А., Евдоков О. В., Жогин И. Л. и др.* Измерение распределения плотности в детонационных процессах с помощью синхротронного излучения. Новосибирск, 2005. 31 с. (Препринт ИЯФ; № 2005-30).