

МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ И ТЕПЛОТА ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

М. Н. Махов, М. Ф. Гоголя, А. Ю. Долгобородов, М. А. Бражников,
В. И. Архипов, В. И. Пепекин

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, makhov@polymer.chph.ras.ru

Исследовано влияние размеров частиц алюминия на метательную способность и теплоту взрывчатого разложения алюминизированных составов, содержащих октоген, нитрогуанидин, бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин. Добавление Al повышает метательную способность взрывчатого вещества. Замена Al с частицами микронного размера ультрадисперсным порошком с размером частиц 0,1 мкм не приводит к дополнительному увеличению метательной способности. Проанализировано влияние Al на теплоту взрывчатого разложения исследуемых составов.

Ключевые слова: детонация, алюминий, состав продуктов, метательная способность, теплота взрывчатого разложения.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения мощности взрывчатых материалов является использование энергетически выгодных добавок. К таким добавкам относится алюминий. Значительное тепловыделение, сопровождающее процесс взаимодействия Al с продуктами детонации, обеспечивает высокую работоспособность алюминизированных взрывчатых композиций.

В настоящее время отсутствует единый взгляд на механизм окисления Al при детонации. Для построения оптимальной модели, описывающей поведение Al в детонационной волне, необходимо знание ряда экспериментальных параметров, характеризующих процесс детонационного превращения алюминизированных составов в широком диапазоне времен и степеней расширения продуктов.

Представленные в [1] результаты измерения скорости, температуры и давления детонации алюминизированных композиций отражают влияние Al на детонационные характеристики в микросекундном интервале времен. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения отвечают более широкому диапазону времени взаимодействия Al с продуктами. Метание тел продуктами детонации

является одной из важнейших форм действия взрыва, в то время как теплота взрывчатого разложения характеризует потенциальные возможности взрывчатого вещества (ВВ) совершать работу при расширении продуктов. Исследования, проведенные с использованием различных методик, показали, что добавление Al с размером частиц несколько микрометров позволяет увеличить метательную способность ВВ [2–6]. В последние годы выполнен ряд работ по изучению взрывчатых характеристик систем, содержащих ультрадисперсный Al. Однако, вопреки ожиданиям, оказалось, что по взрывчатым характеристикам такие смеси не обладают явным преимуществом перед композициями, содержащими Al с размером частиц несколько микрометров. В частности, такой вывод следует из результатов изучения метательной способности. Так, повышение скорости стальной пластины толщиной 2 мм, метаемой в канале оболочки, зафиксировано при добавлении Al к неорганическому окислителю — аммоний динитрамиду [7]. При этом использование Al марки «Alex» (средний размер частиц 0,15 мкм) привело к меньшему эффекту, чем введение порошка Al с размером частиц 3 мкм. Отсутствие преимуществ по метательной способности у смесей ультрадисперсного Al с нитрометаном и ТНТ перед композициями, содержащими Al с размером частиц 5 мкм, показали измерения скорости расширения медной оболочки [8]. Аналогичный результат получен при

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 03-03-32413а), а также Программы Отделения химии и наук о материалах РАН «Разработка научных основ создания высокоэнергетических материалов нового поколения».

исследовании алюминизированных составов на основе смеси гексоген/перхлорат аммония [9].

Известно, что добавление Al существенно повышает теплоту взрывчатого разложения (Q) ВВ [5, 10]. Наибольшие ее значения соответствуют относительно высокой концентрации Al (35 ÷ 45 %) [10]. Незначительное увеличение Q для составов с ультрадисперсным Al получено при использовании ГНТ в качестве взрывчатой основы [10, 11].

В литературе имеется определенная информация о метательной способности и теплоте взрывчатого разложения, однако опубликованных данных недостаточно для получения полной картины влияния Al на указанные параметры. Цель работы заключалась в проведении комплексного экспериментального изучения метательной способности и теплоты взрывчатого разложения при изменении в широких пределах размера частиц Al, кислородного баланса ВВ и соотношения горючих элементов в молекуле ВВ. Исследовались композиции, содержащие те же компоненты, что и в [1], причем особое внимание уделялось составам с ультрадисперсным Al. Характеристики компонентов смесей и методика приготовления образцов описаны в [1]. С целью обобщения экспериментального материала в настоящей работе приводятся данные, полученные авторами ранее [6, 10, 12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения метательной способности используется ряд экспериментальных методов, имитирующих условия применения ВВ на практике. В работе рассматривается два вида метания: торцевое и радиальное. Известным отечественным методом исследования является метание стальной пластины в канале толстостенной оболочки [14]. Для определения метательной способности использован один из вариантов этой методики. Мерой метательной способности служит скорость полета стальной пластины толщиной 4 мм, метаемой с торца цилиндрического заряда диаметром и длиной 40 мм в канале стальной оболочки. В экспериментах с помощью осциллографа со спиральной разверткой фиксировались моменты касания летящей пластиной игл-контактов, расположенных параллельно оси оболочки. По результатам измерений определялась зависимость скорости пластины от базы полета. В качестве стандартной базы для сравнения ВВ по

метательной способности принято расстояние 40 мм от первоначального положения пластины.

Второй метод, заключающийся в исследовании разлета медной оболочки, известен как Т-20 [14] и является аналогом методики «цилиндр-тест» [2, 15]. Его краткое описание приведено в [1].

Результаты исследований метательной способности с применением этих двух методик позволяют рассматривать процесс трансформации энергии окисления Al в кинетическую энергию продуктов детонации и метаемого тела в пределах характерных времен: 20 мкс при метании пластины, 10 мкс при расширении оболочки.

Для измерения теплоты взрывчатого разложения использовалась калориметрическая установка с объемом полости бомбы 5 л [16]. Масса заряда 30 ÷ 35 г, диаметр 20 мм, толщина оболочки из нержавеющей стали 7 мм. Бомба с зарядом помещалась в сосуд с калориметрической жидкостью и теплоизолирующей оболочкой. В экспериментах осуществлялась непрерывная запись температуры калориметра. Тепловой эффект рассчитывался с использованием предварительно измеренного теплового эквивалента установки. Время взаимодействия Al с продуктами в условиях взрыва в калориметрической бомбе превышает 50 мкс.

Торцевое метание

Результаты измерений скорости полета стальной пластины представлены в табл. 1 и на рис. 1–3. В таблице приведены следующие параметры: ρ — плотность заряда, ρ_1 — плотность ВВ в заряде, ΔL — расстояние от первоначального положения внешней поверхности пластины, W_1 — скорость пластины. Зависимости на рис. 1–3 и далее на рис. 4–6 соответствуют фиксированным плотностям ВВ в заряде: октоген (ОК) — 1,81; нитрогуанидин (НГ) — 1,635 и бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН) — 1,90 г/см³. Плотность ВВ рассчитывалась по соотношению $\rho_1 = (1 - \beta_{Al}) / (1/\rho - \beta_{Al}/2,7)$, где β_{Al} — массовая доля Al в составе. Приведение параметров к условию фиксированной плотности ВВ в заряде осуществлялось в небольшом диапазоне плотностей с использованием наклонов зависимостей этих параметров от плотности ВВ. При определении зависимо-

Таблица 1
Скорость полета пластины на выбранных базах для состава ВВ/Al (85/15)

| ВВ | Al | ρ , г/см ³ | ρ_1 , г/см ³ | ΔL , мм | | | | | | W_1 , км/с |
|-------|---------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|--------------|
| | | | | 8 | 16 | 24 | 32 | 40 | 40** | |
| | | | | W_1 , км/с | | | | | | |
| ОК | — | 1,72 | 1,72 | 1,75 | 1,88 | 1,97 | 2,02 | 2,04 | 2,13 | |
| | — | 1,81 | 1,81 | 1,83 | 1,96 | 2,05 | 2,10 | 2,13 | | |
| | Al(0,1) | 1,84 | 1,74 | 1,82 | 1,94 | 2,03 | 2,08 | 2,12 | 2,18 | |
| | Al(п) | 1,85 | 1,75 | 1,84 | 1,96 | 2,05 | 2,11 | 2,15 | 2,20 | |
| | Al(7) | 1,86 | 1,76 | 1,85 | 1,97 | 2,06 | 2,12 | 2,16 | | |
| | Al(15) | 1,86 | 1,76 | 1,83 | 1,95 | 2,03 | 2,09 | 2,13 | 2,17 | |
| | Al(150) | 1,87 | 1,77 | 1,80 | 1,91 | 1,99 | 2,05 | 2,10 | 2,13 | |
| | Al(7)* | 1,86 | 1,76 | 1,81 | 1,93 | 2,01 | 2,07 | 2,12 | 2,16 | |
| НГ | — | 1,58 | 1,58 | 1,57 | 1,65 | 1,70 | 1,72 | 1,73 | 1,78 | |
| | — | 1,63 | 1,63 | 1,62 | 1,70 | 1,75 | 1,77 | 1,78 | | |
| | Al(0,1) | 1,78 | 1,68 | 1,68 | 1,76 | 1,83 | 1,86 | 1,88 | 1,84 | |
| | Al(п) | 1,72 | 1,62 | 1,62 | 1,71 | 1,78 | 1,81 | 1,83 | 1,85 | |
| | Al(15) | 1,74 | 1,64 | 1,63 | 1,71 | 1,77 | 1,80 | 1,82 | 1,82 | |
| БТНЭН | — | 1,86 | 1,86 | 1,74 | 1,86 | 1,95 | 2,01 | 2,03 | 2,07 | |
| | — | 1,92 | 1,92 | 1,80 | 1,91 | 2,00 | 2,06 | 2,08 | | |
| | Al(0,1) | 1,91 | 1,81 | 1,71 | 1,87 | 1,99 | 2,06 | 2,08 | 2,15 | |
| | Al(7) | 1,97 | 1,88 | 1,74 | 1,93 | 2,07 | 2,15 | 2,17 | 2,19 | |
| | Al(15) | 1,99 | 1,90 | 1,79 | 1,95 | 2,06 | 2,13 | 2,16 | 2,16 | |
| | Al(150) | 1,99 | 1,90 | 1,69 | 1,84 | 1,95 | 2,01 | 2,05 | 2,05 | |

Примечание. *Размер частиц ОК 200 ÷ 300 мкм; ** скорости пластины экстра-полированы на плотности ОК, НГ и БТНЭН в заряде, равные соответственно 1,81, 1,635 и 1,90 г/см³.

стей использовались данные, полученные для разных плотностей ВВ (табл. 1–3).

Введение Al повышает конечную скорость пластины (за исключением Al(150), здесь и везде далее в скобках указан размер частиц, мкм). Прирост скорости на участке между начальной и конечной базами у большинства исследуемых составов выше, чем у индивидуальных ВВ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе расширения продуктов происходит трансформация энергии окисления Al в работу метания. Скорость пластины зависит от размера частиц Al. Для составов на основе ОК увеличение полноты окисления Al за счет повышения удельной поверхности металла приводит к возрастанию скорости в ряду размеров частиц 150, 15, 7 мкм. Зависимости $W_1(\Delta L)$

для смесей с Al(7) и Al(п) практически совпадают, а зависимость для композиции с Al(0,1) проходит несколько ниже (Al(п) — алюминиевая пудра). Различие приведенных скоростей пластины для составов с Al(п), Al(0,1), Al(7) на конечной базе не выходит за пределы ошибки измерений. Скорость на конечной базе для этих составов равна $(2,19 \pm 0,02)$ км/с, а увеличение скорости по сравнению с чистым ОК составляет $\approx 3\%$.

Отсутствие преимуществ по метательной способности у состава с Al(п) перед композицией с Al(7) связано с высокой концентрацией оксидной пленки в Al(п). Равенство скоростей пластины для смесей с Al(0,1) и Al(7) также обусловлено высоким содержанием оксидной пленки в Al(0,1). Кроме того, повы-

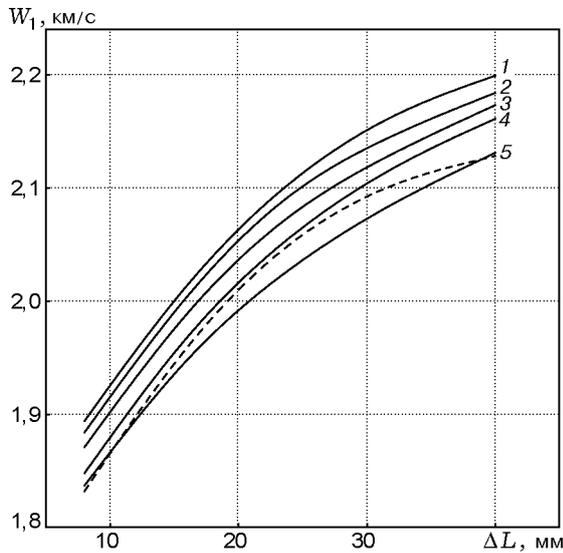


Рис. 1. Зависимость скорости пластины от базы полета для состава ОК/Al (85/15):

1 — Al(π), Al(7); 2 — Al(0,1); 3 — Al(15); 4 — Al(7) при размере частиц ОК 200 ÷ 300 мкм; 5 — Al(150); штриховая линия — ОК

шению полноты окисления Al при снижении размера частиц препятствует неоднородность структуры образцов. Как показали оптико-микроскопические исследования [17], применение механического способа смешения ВВ с размером зерен порядка десятков микрометров и субмикронных частиц Al не позволяет получать образцы с равномерным распределением частиц Al. Это связано с образованием конгломератов из частиц Al между более крупными зернами ВВ. Основные исследования выполнены с составами, содержащими октоген с диаметром зерна 10 ÷ 20 мкм (далее обозначаем ОК(м)), что существенно превышает размер частиц Al(0,1). Влияние структуры образца на полноту окисления Al прослеживается на примере композиции, содержащей Al(7) и октоген с размером частиц 200 ÷ 300 мкм (обозначаем ОК(кр)). Конечная скорость пластины для такой смеси соответствует композиции с ОК(м) и более крупным алюминием, чем Al(7).

При исследовании НГ и его смесей применялся промежуточный заряд в виде таблетки гексогена высотой 10 мм, при этом высота основного заряда составляла 35 мм. Добавление Al к НГ повышает скорость полета пластины, преимущественно на конечной базе (см. рис. 2). При этом приведенные скорости пластины для составов с Al(π) и Al(0,1) на ко-

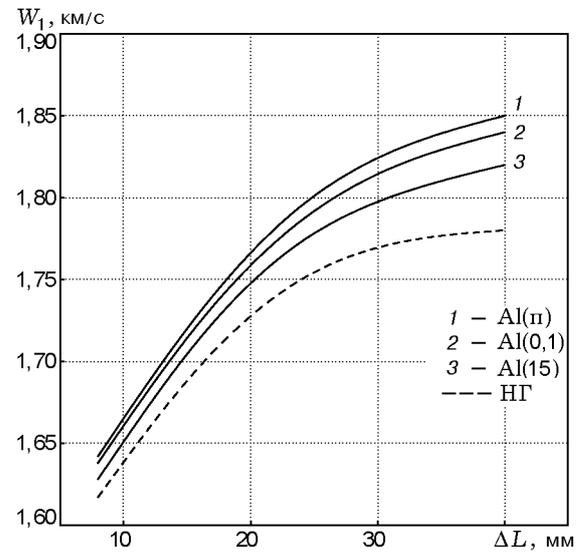


Рис. 2. Зависимость скорости пластины от базы полета для состава НГ/Al (85/15)

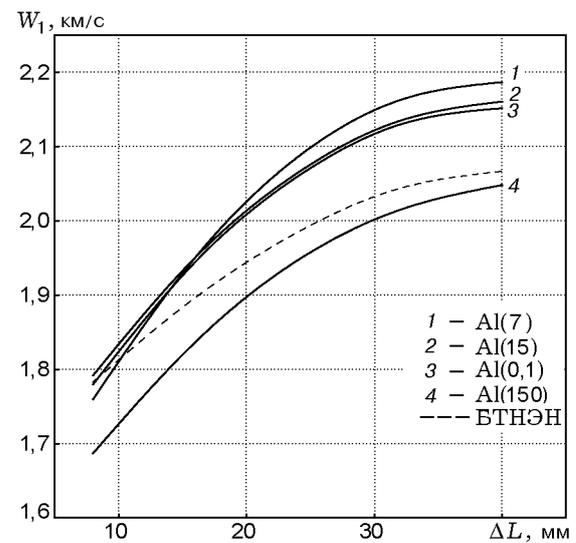


Рис. 3. Зависимость скорости пластины от базы полета для состава БТНЭН/Al (85/15)

нечной базе совпадают в пределах экспериментальной ошибки. Среднее значение скорости (1,84 ± 0,02) км/с.

Несмотря на более низкий кислородный баланс НГ по сравнению с ОК, добавление Al к этим ВВ приводит к одинаковому приросту скорости метания. (Следует также учесть, что использование дополнительного заряда гексогена снижает различие скоростей пластины для составов с НГ.) Полученный результат можно объяснить тем, что реакция Al с продук-

Таблица 2
Скорость оболочки при различных приращениях радиуса для ВВ/Al (85/15)

| ВВ | Al | ρ , г/см ³ | ρ_1 , г/см ³ | ΔR , мм | | | | | | | W_2 , км/с | | |
|--------|---------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|--------------|--------------|--|
| | | | | 4 | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 15** | | | |
| | | | | | | | | | | | | W_2 , км/с | |
| ОК | — | 1,73 | 1,73 | 1,53 | 1,59 | 1,66 | 1,71 | 1,74 | 1,77 | 1,83 | | | |
| | — | 1,81 | 1,81 | 1,59 | 1,65 | 1,72 | 1,77 | 1,80 | 1,83 | | | | |
| | Al(0,1) | 1,84 | 1,74 | 1,50 | 1,56 | 1,64 | 1,73 | 1,77 | 1,81 | 1,86 | | | |
| | Al(п) | 1,85 | 1,75 | 1,52 | 1,58 | 1,66 | 1,76 | 1,80 | 1,83 | 1,87 | | | |
| | Al(7) | 1,87 | 1,77 | 1,54 | 1,60 | 1,68 | 1,77 | 1,82 | 1,85 | | | | |
| | Al(15) | 1,88 | 1,78 | 1,52 | 1,58 | 1,67 | 1,76 | 1,80 | 1,83 | 1,85 | | | |
| | Al(150) | 1,89 | 1,79 | 1,50 | 1,56 | 1,64 | 1,72 | 1,76 | 1,80 | 1,81 | | | |
| Al(7)* | 1,88 | 1,78 | 1,50 | 1,56 | 1,64 | 1,73 | 1,77 | 1,81 | 1,83 | | | | |
| БТНЭН | — | 1,85 | 1,85 | 1,48 | 1,53 | 1,61 | 1,68 | 1,71 | 1,74 | 1,78 | | | |
| | — | 1,90 | 1,90 | 1,52 | 1,57 | 1,65 | 1,72 | 1,75 | 1,78 | | | | |
| | Al(0,1) | 1,94 | 1,85 | 1,49 | 1,57 | 1,67 | 1,76 | 1,80 | 1,83 | 1,88 | | | |
| | Al(7) | 1,98 | 1,89 | 1,52 | 1,61 | 1,73 | 1,82 | 1,86 | 1,89 | 1,90 | | | |
| | Al(15) | 1,99 | 1,90 | 1,52 | 1,60 | 1,70 | 1,80 | 1,84 | 1,88 | 1,88 | | | |
| | Al(150) | 1,99 | 1,90 | 1,42 | 1,49 | 1,59 | 1,68 | 1,72 | 1,76 | 1,76 | | | |

Примечание. *Размер частиц ОК 200 ÷ 300 мкм; **скорости оболочки экстраполированы на плотности ОК и БТНЭН в заряде, равные соответственно 1,81 и 1,90 г/см³.

тами детонации НГ практически не уменьшает числа молей газа, так как основным кислородсодержащим продуктом детонации НГ является H₂O. В связи с тем, что содержание оксидов углерода в продуктах детонации ОК значительно превышает их концентрацию в продуктах НГ, образование конденсированного углерода при взаимодействии Al с продуктами детонации ОК приводит к более существенному снижению числа молей газа. С тех же позиций рассматривались ранее результаты измерения параметров детонации, которые показали, что добавление Al (15 %) к НГ не уменьшает скорость и давление детонации [1].

Наибольшее повышение скорости пластины наблюдается при добавлении Al к БТНЭН. Так, при введении 15 % Al(7) скорость увеличивается на ≈ 6 %. Этот факт свидетельствует о более активном окислении Al при взаимодействии с продуктами детонации БТНЭН, содержащими свободный кислород, и о более значительном выделении энергии в результате этого процесса. Однако в связи с тем, что метатель-

ная способность БТНЭН ниже, чем у ОК, состав БТНЭН/Al(7) по этому параметру лишь незначительно превосходит ОК.

Несмотря на активное окисление Al продуктами детонации БТНЭН, метательная способность данной смеси также зависит от размера частиц металла. Наибольшая скорость пластины на конечной базе соответствует составу с Al(7) (2,19 ± 0,02 км/с), а наименьшая — композиции с Al(150) (см. рис. 3). Зависимость $W_1(\Delta L)$ для состава с Al(0,1) близка к кривой, соответствующей составу с Al(15). Средняя приведенная скорость на конечной базе для составов с Al(0,1), Al(15) составляет (2,15 ± 0,02) км/с. Другими словами, в отличие от композиций с ОК и НГ, состав БТНЭН/Al(0,1) по скорости пластины на основном участке полета не имеет преимуществ даже перед составом с Al(15). Полученный результат объясняется тем, что при высокой степени окисления Al продуктами детонации БТНЭН тепловой эффект определяется в основном содержанием активного металла в порошке Al. Доля оксидной

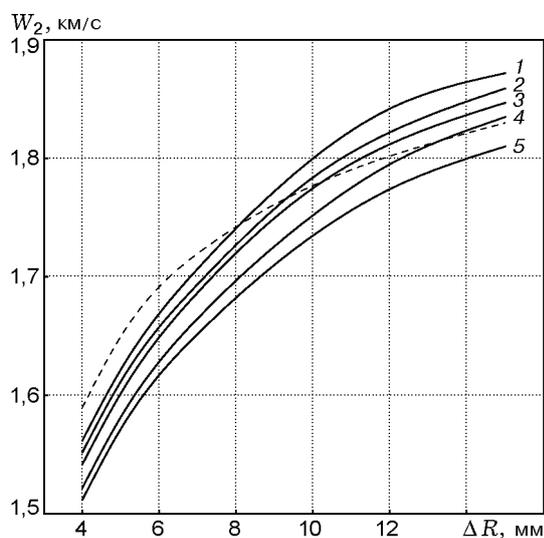


Рис. 4. Зависимость скорости оболочки от приращения радиуса для состава ОК/Al (85/15):

1 — Al(п) и Al(7); 2 — Al(0,1); 3 — Al(15); 4 — Al(7) при размере частиц ОК 200 ÷ 300 мкм; 5 — Al(150); штриховая линия — ОК

пленки в Al(0,1) выше, чем в Al(7) и Al(15), что в данном случае и предопределяет соотношение скоростей пластины для рассматриваемых композиций.

Прирост скорости пластины на участке между начальной и конечной базами для большинства исследуемых смесей выше, чем для индивидуальных ВВ. Однако в случае БТНЭН (см. рис. 3) наблюдается выравнивание темпов набора скорости для чистого ВВ и смесей на конечном участке полета пластины (за исключением состава с Al(150)). Причина, вероятно, заключается в том, что частицы Al активно окисляются продуктами детонации БТНЭН уже на ранней стадии расширения, и к конечной базе полета пластины реализуется значительная часть теплоты этой реакции.

Разлет медной оболочки

Исследование НГ и его смесей с Al методом расширяющейся оболочки не проводилось, так как в этом случае диаметр заряда (20 мм) сопоставим с критическим диаметром детонации НГ [18].

Значения радиальной скорости внешней поверхности медной цилиндрической оболочки (W_2) для выбранных приращений радиуса (ΔR) представлены в табл. 2. Разгонные кривые приведены на рис. 4, 5.

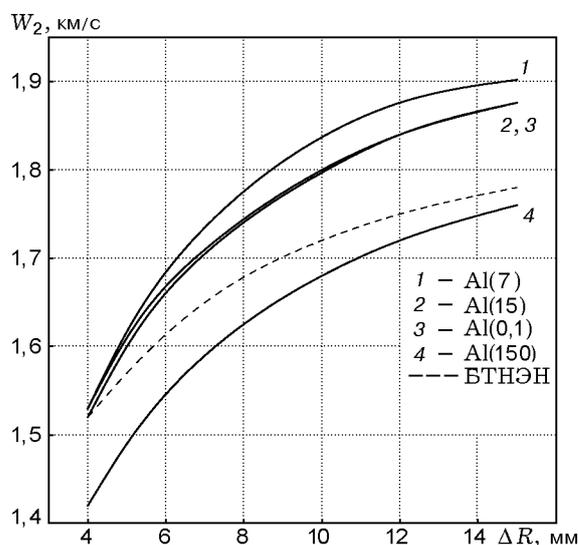


Рис. 5. Зависимость скорости оболочки от приращения радиуса для состава БТНЭН/Al (85/15)

Данные по скоростям разлета оболочки для составов на основе ОК и БТНЭН качественно совпадают с результатами по метанию стальной пластины. Так, для ряда композиций наблюдается как более высокий темп набора скорости оболочкой, так и увеличение конечной скорости по сравнению с индивидуальным ВВ. Полученные результаты свидетельствуют о трансформации энергии окисления Al в кинетическую энергию продуктов детонации и оболочки при разлете. Кривая для состава с Al(150) проходит ниже, чем для смесей с другими порошками Al (см. рис. 4, 5). Приведенные значения скоростей на конечной базе для составов ОК с Al(п), Al(0,1), Al(7) в пределах ошибки эксперимента равны $(1,87 \pm 0,02)$ км/с, а для БТНЭН с Al(15), Al(0,1), Al(7) — $(1,89 \pm 0,02)$ км/с.

Теплота взрывчатого разложения

Наибольший эффект от добавления Al получен при определении теплоты взрывчатого разложения Q . В табл. 3 представлены результаты для составов, содержащих 15 % металла. Значения Q соответствуют условию: H_2O — газ. Расчет состава продуктов детонации проводился с использованием полуэмпирических методов, предложенных в работах [10, 19, 20].

Значительное время взаимодействия Al с продуктами, соответствующее условиям испы-

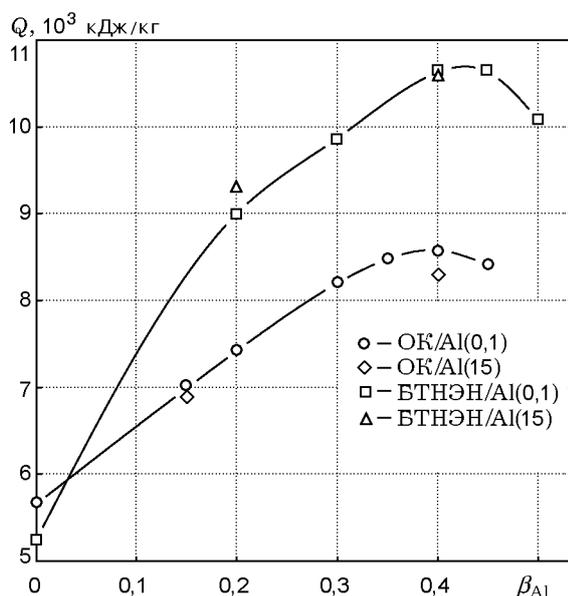


Рис. 6. Зависимость теплоты взрывчатого разложения композиций от содержания Al

таний в калориметрической бомбе, обеспечивает высокую степень окисления металла и выделение больших количеств дополнительной энергии. Однако даже в таких условиях полного окисления Al не происходит. Результаты исследования теплоты взрывчатого разложения качественно соответствуют данным по скоростям пластины и оболочки и могут быть рассмотрены с аналогичных позиций.

При небольшом содержании оксидной пленки в порошке Al максимальное значение Q соответствует наименьшему размеру частиц металла. Так, добавка 15 % Al(7) к ОК приводит к увеличению Q на ≈ 25 %. Отсутствие преимуществ по теплоте взрывчатого разложения у смесей ОК(м) с Al(0,1) и Al(п) по сравнению с композицией, содержащей Al(7), обусловлено тем, что повышение удельной поверхности металла не компенсирует потери, связанные с высоким содержанием оксидной пленки. Состав, содержащий Al(7) и ОК(кр), имеет значение Q , характерное для композиции с ОК(м) и более крупным алюминием, чем Al(7).

НГ и его смеси испытывались в зарядах диаметром 30 мм, массой ≈ 60 г, с толщиной оболочки из нержавеющей стали 10 мм. При этом использовался промежуточный заряд в виде таблетки гексогена. Из результатов измерений следует, что Al в составе с НГ в большей степени повышает теплоту взрывчатого

разложения, чем в смеси с ОК, что заметно при сравнении относительных величин. Так, добавление 15 % Al(0,1) и Al(п) к НГ дает увеличение более чем на 40 %.

Наибольшее повышение теплоты взрывчатого разложения Q при добавлении Al получено для составов, содержащих БТНЭН. Несмотря на то, что теплота взрывчатого разложения БТНЭН меньше, чем у ОК, смеси БТНЭН/Al превосходят по этому параметру композиции ОК/Al в среднем на 20 %. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени окисления Al при взаимодействии с продуктами детонации БТНЭН и отражают высокий тепловой эффект реакции Al с кислородом. Как и в случае с ОК, наибольшее значение Q наблюдается для состава с Al(7). Композиция с Al(0,1) из-за высокого содержания оксидной пленки в порошке Al по теплоте взрывчатого разложения соответствует составу с Al(15).

Приведенные выше результаты получены для смесей, содержащих 15 % Al. Из данных работы [10] следует, что максимальной теплотой взрывчатого разложения должны обладать составы с более высокой концентрацией Al. В связи с этим дальнейшие исследования состояли в изучении влияния начальной концентрации Al на теплоту взрывчатого разложения композиций, содержащих ОК и БТНЭН. При этом использовались порошки Al(15) и Al(0,1). Результаты представлены в табл. 4. Рис. 6 иллюстрирует зависимость теплоты взрывчатого разложения от содержания Al в смеси.

Как следует из табл. 4, преимущество составов с Al(0,1) над композициями, содержащими Al(15), наблюдается только для смесей с ОК. Так, состав ОК/Al(0,1) (60/40) превышает по теплоте взрывчатого разложения аналогичную композицию с Al(15), однако ненамного — ≈ 3 % при одинаковой плотности зарядов (рис. 6). При содержании металла $\beta_{Al} = 15$ % значения Q смесей ОК с Al(0,1) и с Al(15) практически равны. Для составов на основе БТНЭН при $\beta_{Al} = 20$ % смесь с Al(0,1) уступает композиции с Al(15). Составы, содержащие БТНЭН и 40 % Al обоих типов, имеют близкие значения теплоты взрывчатого разложения.

Проанализируем полученные результаты. Очевидно, что уменьшение размера частиц Al в связи с повышением удельной поверхности металла должно приводить к увеличению теплоты взрывчатого разложения. Однако этому препятствует неоднородность структуры об-

Таблица 3

Теплота взрывчатого разложения составов ВВ/Al (85/15)

| Al | ОК | | НГ | | БТНЭН | |
|---------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| | ρ , г/см ³ | Q , кДж/кг | ρ , г/см ³ | Q , кДж/кг | ρ , г/см ³ | Q , кДж/кг |
| — | 1,81 | 5 610 | 1,63 | 3 480 | 1,89 | 5 230 |
| Al(0,1) | 1,83 | 6 960 | 1,78 | 4 960 | 1,90 | 8 350 |
| Al(п) | 1,84 | 6 960 | 1,71 | 4 960 | — | — |
| Al(7) | 1,87 | 7 000 | — | — | 1,94 | 8 600 |
| Al(15) | 1,89 | 6 920 | 1,74 | 4 820 | 1,95 | 8 500 |
| Al(150) | 1,89 | 6 690 | — | — | 1,94 | 8 280 |
| Al(7)* | 1,88 | 6 780 | — | — | — | — |

Примечание. *Размер частиц ОК 200 ÷ 300 мкм.

Таблица 4

Теплота взрывчатого разложения композиций при различной концентрации Al

| ВВ | β_{Al} | Al | ρ , г/см ³ | ρ/ρ_{max} | Q , кДж/кг |
|-------|--------------|---------|----------------------------|-------------------|--------------|
| ОК | — | — | 1,81 | 0,95 | 5 610 |
| | | | 1,55 | 0,81 | 5 420 |
| | 0,15 | Al(0,1) | 1,83 | 0,92 | 6 960 |
| | | Al(15) | 1,89 | 0,95 | 6 920 |
| | 0,20 | Al(0,1) | 1,82 | 0,90 | 7 360 |
| | 0,30 | | 1,84 | 0,88 | 8 160 |
| | 0,35 | | 1,86 | 0,88 | 8 410 |
| | 0,40 | Al(0,1) | 1,87 | 0,87 | 8 490 |
| | | Al(15) | 2,00 | 0,93 | 8 260 |
| | 0,45 | Al(0,1) | 1,89 | 0,86 | 8 330 |
| БТНЭН | — | — | 1,90 | 0,97 | 5 230 |
| | | | 1,51 | 0,77 | 5 180 |
| | 0,20 | Al(0,1) | 1,90 | 0,92 | 9 000 |
| | | Al(15) | 1,99 | 0,96 | 9 270 |
| | 0,30 | Al(0,1) | 1,92 | 0,90 | 9 830 |
| | 0,40 | Al(0,1) | 1,93 | 0,88 | 10 590 |
| | | Al(15) | 2,09 | 0,95 | 10 540 |
| | 0,45 | Al(0,1) | 1,95 | 0,87 | 10 590 |
| | 0,50 | | 1,95 | 0,86 | 10 080 |

разцов смесей с ультрадисперсным Al. Повышение доли оксидной пленки при уменьшении размера частиц Al также снижает теплоту взрывчатого разложения. Последний фактор является определяющим в том случае, если полнота окисления чистого металла добавки близка к единице (высокий кислородный баланс ВВ, низкая концентрация Al в смеси). При этом замена порошка Al более мелким может привести к снижению теплоты взрыва. Такая ситуация наблюдается для смеси БТНЭН/Al (80/20), когда композиция с Al(0,1) обладает более низкой теплотой взрывчатого разложения, чем состав с Al(15). В случае, когда полнота окисления металла существенно ниже единицы, возрастает роль удельной поверхности. При этом использование ультрадисперсного Al повышает теплоту взрыва. Такой ситуации отвечают результаты, полученные для композиции ОК/Al (60/40).

Для составов с ОК и БТНЭН максимальные значения теплоты взрывчатого разложения соответствуют близким концентрациям Al, несмотря на существенное различие кислородных балансов этих ВВ (см. рис. 6). Такой результат становится понятным, если учесть, что при повышении кислородного баланса ВВ параллельно с увеличением полноты окисления Al возрастает и расход кислорода ВВ.

В целом, добавление Al к ВВ приводит к значительному увеличению теплоты взрывчатого разложения. Прирост выше в случае ВВ с положительным кислородным балансом. Так, добавление $40 \div 45 \%$ Al к БТНЭН дает повышение на $\approx 100 \%$, а добавление к ОК — на $\approx 50 \%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние Al на метательную способность и теплоту взрывчатого разложения ВВ зависит от природы ВВ, соотношения компонентов смеси, размера частиц, содержания оксидной пленки в порошке Al. Результаты исследований по методикам разлета оболочки «цилиндр-тест» и торцевого метания пластины показали, что добавление Al к ВВ может привести к повышению метательной способности. Из сравнения данных для составов на основе ОК и НГ следует, что при отрицательном кислородном балансе ВВ наибольшего увеличения метательной способности можно ожидать в случае соединений с высоким содержанием водорода. Положительный кислородный баланс БТНЭН

обеспечивает более заметное повышение метательной способности при добавлении Al к этому ВВ, чем при добавлении к ОК и НГ. Однако абсолютная величина метательной способности смесей Al с БТНЭН лишь незначительно превышает уровень, наблюдаемый для чистого ОК. Отсутствие преимуществ у составов с Al(0,1) перед композициями с Al(7), прежде всего, связано с высоким содержанием оксидной пленки в Al(0,1) и с неоднородностью структуры образцов с Al(0,1).

В связи со значительным временем взаимодействия Al с продуктами детонации в условиях взрыва в калориметрической бомбе добавление Al к ВВ существенно повышает теплоту взрывчатого разложения. Наибольшими значениями обладают смеси с БТНЭН (положительный кислородный баланс). При этом составы с БТНЭН/Al(0,1) уступают композициям БТНЭН/Al(15). Замена Al(15) на Al(0,1) приводит к дополнительному увеличению теплоты взрывчатого разложения в смесях с ОК (отрицательный кислородный баланс).

В целях максимального увеличения метательной способности и теплоты взрывчатого разложения за счет введения Al в состав ВВ необходимо проведение исследований, направленных на повышение однородности структуры образцов, чего можно добиться при использовании, в частности, алюминизированного взрывчатого нанокompозита [21].

Авторы благодарят сотрудников ИНЭПХФ РАН И. О. Лейпунского и А. Н. Жигача за помощь и обсуждение результатов исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобордов А. Ю. и др. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.
2. Finger M., Horning H. C., Lee E. L., Kury J. W. Metal Acceleration by Composite Explosives // Proc. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. California. Pasadena: Office of Naval Research. ACR-184. 1970. P. 55–63.
3. Воскобойников И. М., Воскобойникова Н. Ф. Оценка метательного действия ВВ // Детонация. Материалы 2-го Всесоюз. совещания по детонации. Черногловка. 1981, С. 64–67.
4. Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Мурышев Е. Ю. Влияние газодинамических условий на степень реализации энергии вторичных

- реакций в метательное действие ВВ // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 109–115.
5. **Архипов В. И., Махов М. Н., Пепекин В. И.** О детонации смесевых взрывчатых систем типа окислитель — горючее // Хим. физика. 1993. Т. 12, № 12. С. 1640–1643.
 6. **Архипов В. И., Махов М. Н., Пепекин В. И., Щетинин В. Г.** Исследование детонации алюминизированных ВВ // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 12. С. 53–57.
 7. **Miller P. J., Bedford C. D., and Davis J. J.** Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives // Proc. Eleventh Intern. Detonation Symp., August 31 — September 4, 1998, Snowmass, Colorado, USA / J. Short (Ed.). 2000. P. 214–220.
 8. **Baudin G., Lafrancois A., Bergues D., et al.** Combustion of nanophase aluminium in the detonation products of nitromethane // Ibid. P. 989–997.
 9. **Lefrancois A., Baudin G., Le Gallic C., Boyce P., Coudoing J.-P.** Nanometric aluminum powder influence on the detonation efficiency of explosives // Twelfth Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California. Electronic version at the server: <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technicalProgram.htm>
 10. **Makhov M. N.** The heat and products of explosion of aluminized high explosives // Proc. 31st Intern. Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, ICT, 2000. P. 42 (1–11).
 11. **Brousseau P., Dorsett H. E., Cliff M. D., and Anderson C. J.** Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder // Twelfth Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California. Electronic version at the server: <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technicalProgram.htm>
 12. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., et al.** Aluminised explosive compositions based on NQ and BTNEN // Proc. 12th APS Topical Group Meeting — «Shock Compression of Condensed Matter — 2001». N. Y.: Amer. Inst. of Phys., 2002. P. 962–965.
 13. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Makhov M. N., et al.** Detonation performance of aluminized compositions based on BTNEN // Twelfth Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California. Electronic version at the server: <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technicalProgram.htm>
 14. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 2002. Т. 1.
 15. **Short J. M., Helm F. H., Finger M., Kamlet M. J.** The Chemistry of detonation. VII. Simplified method for predicting explosive performance in the cylinder test // Combust. Flame. 1981. V. 43, N 1. P. 99–109.
 16. **Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А.** Теплота взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. 1977. Т. 232, № 4. С. 852–855.
 17. **Щетинин В. Г., Теселкин В. А., Бражников М. А. и др.** Влияние структуры и химико-физических свойств поверхности частиц алюминия на чувствительность взрывчатых композиций // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Материалы Междунар. конф. «III Харитоновские тематические научные чтения». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 30–34.
 18. **Price D. and Clairmont A. R.** Explosive behavior of nitroguanidine // Proc. Twelfth Symp. (Intern.) on Combustion. Poitiers, France, July 14 to 20, 1968. The Combustion Inst., 1969. P. 761–770.
 19. **Makhov M. N., Pepekin V. I.** Calculation of chemical composition of detonation products // Polish J. Chemistry. 1981. V. 55, N 6. P. 1381–1385.
 20. **Makhov M. N.** The effect of charge density on the explosion heat of high explosives // Proc. 33rd Intern. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2002. P. 73 (1–13).
 21. **Лейпунский И. О., Жигач А. Н., Кусков М. Л. и др.** Алюминизированный взрывчатый нанокompозит — получение и свойства // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях: Тез. докл. Междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 30–34.

*Поступила в редакцию 17/VI 2003 г.,
в окончательном варианте — 16/XII 2003 г.*