

## ВЗРЫВЧАТЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА

М. Ф. Гоголя<sup>1</sup>, М. Н. Махов<sup>1</sup>, М. А. Бражников<sup>1</sup>, А. Ю. Долгобородов<sup>1</sup>,  
В. И. Архипов<sup>1</sup>, А. Н. Жигач<sup>2</sup>, И. О. Лейпунский<sup>2</sup>, М. Л. Кусков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, gogul@polymer.chph.ras.ru

<sup>2</sup>Институт энергетических проблем химической физики РАН, 119334 Москва

Экспериментально исследованы взрывчатые характеристики составов октогена с добавкой 15 % Al (по массе). Измерены скорость детонации, профили давления и температуры, скорость торцевого метания пластин и теплота взрыва плотных прессованных образцов. Сравнивались результаты как для составов на основе механических смесей исходных частиц октогена микронного размера с порошками алюминия различного размера, так и наноконпозиты. Введение наноалюминия снижает скорость детонации в большей степени, чем алюминий микронного размера. Механические смеси имеют близкие скорости детонации, в то время как у композитов, содержащих разные партии наноалюминия, они отличаются почти на 200 м/с. Для всех составов, за исключением наиболее однородного наноконпозита, наблюдаются двухпиковые профили давления. Давления во вторых пиках для зарядов из композита и механической смеси с наноалюминием одного типа практически совпадают, но достигаются за различное время. Вместе с тем с уменьшением размера частиц алюминия давление в пике возрастает. Профили температуры качественно согласуются с профилями давления. Скорость торцевого метания пластины линейно зависит от активности используемого порошка алюминия. Наноконпозиты и механические смеси, содержащие одинаковые порошки алюминия, имеют близкие теплоты взрыва. Наноалюминий практически полностью окисляется в условиях испытаний в калориметрической бомбе, и основным фактором, определяющим теплоту взрыва композиций с наноалюминием, также является содержание активного металла в порошке алюминия.

Ключевые слова: октоген, наноалюминий, композит, скорость детонации, давление, температура, метательная способность, теплота взрыва.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы особый интерес у исследователей вызывает проблема получения высокоэнергетических наноструктурных материалов. Использование наноконпозитов на сегодняшний день рассматривается как один из наиболее перспективных путей повышения эффективности как топливных, так и взрывчатых систем. Особая роль при этом отводится порошкам наноалюминия, которые применяются в качестве энергетической добавки. Важной проблемой технологии производства смесевых ВВ, содержащих наноалюминий, является создание однородного материала с равномерно

распределенными частицами алюминия. Одно из решений проблемы заключается в получении наноконпозита (далее по тексту — композит), т. е. гранул типа «наноалюминий в матрице ВВ».

В настоящей работе приведены результаты комплексного изучения взрывчатых характеристик композитов на основе октогена (НМХ), содержащих 15 % Al (по массе)\*. Целью исследования являлось определение потенциальных возможностей составов, содержащих наноалюминий.

Экспериментально определялись следующие параметры: скорость детонации, профили давления и температуры продуктов детонации (ПД), метательная способность (торцевое метание) и теплота взрыва. Каждый из них характеризует определенное время развития

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-03-32553а), программы Отделения химии и наук о материалах РАН «Разработка научных основ получения нового поколения высокоэнергетических материалов» и программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка методов получения химических веществ и создание новых материалов».

\* Содержание 10 ÷ 15 % порошка Al микронного размера соответствует максимальной метательной способности взрывчатого состава [1, 2].

взрыва. Так, на скорость детонации влияют процессы, протекающие менее чем за 0.1 мкс. Регистрируемые профили давления и температуры измерялись в интервале  $1 \div 2$  мкс, скорости метания — в интервале  $4 \div 15$  мкс, а теплота взрыва, определяемая в калориметрической бомбе, соответствует времени  $\approx 50$  мкс. Исследование носило сравнительный характер. При этом изучались плотные образцы композитов (НМХ/Al) и механических смесей (НМХ + Al, размер частиц НМХ  $10 \div 20$  мкм) с различными порошками Al. Из-за различной прессыруемости исходных компонентов плотности зарядов несколько отличались. Поэтому для удобства сравнения полученные экспериментальные значения (кроме профилей температуры) приводились к одной плотности алюминизированного заряда —  $1.76 \text{ г/см}^3$  (плотность НМХ в заряде  $1.66 \text{ г/см}^3$ ).

### ПОЛУЧЕНИЕ НАНОАЛЮМИНИЯ И НАНОКОМПОЗИТОВ

Как и при исследовании механических смесей на основе мощных ВВ [3–5], в качестве добавки использовался порошок наноалюминия, полученный методом Гена — Миллера [6]. Для предотвращения агломерации и последующей «холодной» сварки применялись различные типы покрытий поверхности частиц. Процесс получения и характеристики порошков наноалюминия представлены в [7, 8]. В работе использовались также порошок механоактивированного наноалюминия Al(act) [9] и промышленные порошки Al. Условные обозначения и некоторые характеристики порошков Al приведены в табл. 1, где  $\langle d \rangle$  — средний размер частиц,  $m$  — активность порошка Al (содержание чистого металла в порошке).

Для получения алюминизированных композитов применялся метод распылительной сушки суспензии наноалюминия в растворе НМХ [10–12]. Суспензия готовилась с помощью ультразвукового диспергатора непосредственно перед распылением. Объем распылительного устройства был подобран так, чтобы за время распыления ( $10 \div 20$  мин в зависимости от режима) суспензия не осаждалась. При движении газа внутри установки формируются твердые частицы композита, содержащие наноалюминий, которые улавливались тканевым фильтром. Производительность установки — до  $10 \text{ г/ч}$  сухого продукта при эффектив-

Таблица 1  
Характеристики порошков Al

Обозначение порошка	Покрытие (реагент)	$\langle d \rangle$ , нм	$m$ , %
Al(1-1S)	Атмосферный воздух	94	86
Al(2-1S)		38	77
Al(1-0x)	Сухой кислород	123*	83
Al(2-0x)		65	70
Al(1-6S)	Гексаметилдисулазан	143	86
Al(2-6S)		86	82
Al(act)	Графит	40**	60
Al(3.6)	Атмосферный воздух	3 600	96
Al(7)		7 000	98
Al(15)		15 000	98
Al(150)		150 000	99

Примечания. \*Распределение частиц в порошке Al(1-0x) носит бимодальный характер с двумя максимумами — 18 и 256 нм. Средний размер, полученный с помощью сканирующего микроскопа, 123 нм.

\*\*Частицы агломерированы. Содержание графита до 20 %.

ности улавливания конечного продукта фильтром не менее 95 %. Полученные композиты представляют собой темные порошки (различных оттенков в зависимости от используемого наноалюминия) с низкой насыпной плотностью (для НМХ/Al (85/15) около  $0.1 \text{ г/см}^3$ ). Условия наработки композита зависят от типа покрытия частицы Al. На рис. 1, а, б представлены различные виды композитов НМХ/Al(1-6S), получаемые при разных режимах распыления: смесь кристаллитов несовершенной формы,  $\langle d \rangle = 1.1 \text{ мкм}$ , включающих в себя частицы наноалюминия; фрагменты полых микросфер с толщиной стенки  $0.2 \div 0.4 \text{ мкм}$  (последние приведены также на рис. 1, в в характеристическом излучении Al). Сравнение микрофотографий на рис. 1, б и рис. 1, в позволяет сделать вывод о практически равномерном распределении частиц Al.

Эксперименты проводились с зарядами, полученными холодным односторонним пресованием. Распределение алюминиевого наполнителя в заряде исследовалось методами локального рентгеноспектрального анализа и сканирующей электронной микроскопии. На рис. 2, а, б представлены изображения поверх-

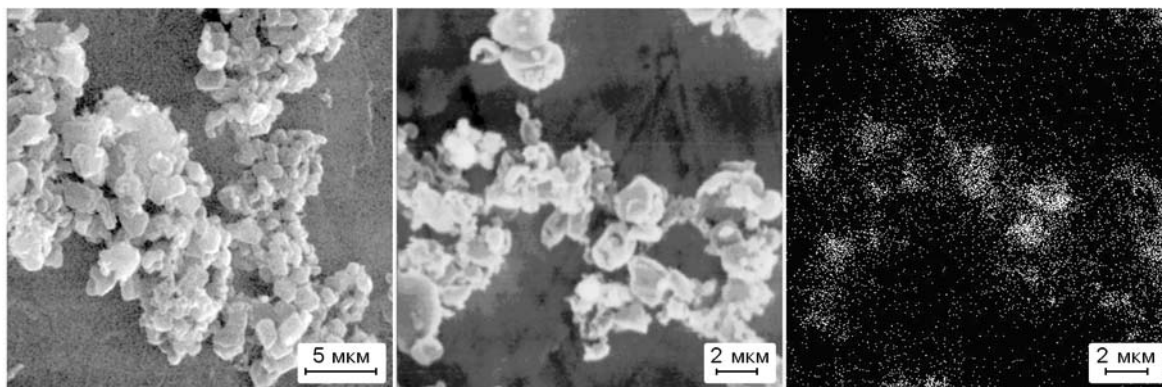


Рис. 1. Структуры композита HMX/Al(1-6S):

*a* — смесь кристаллитов несовершенной формы, *b* — фрагменты полых микросфер, *в* — изображение частиц (фото *b*) в характеристическом излучении алюминия

ностей, а также распределения частиц Al по линии сканирования (светлая линия на фотографиях). На рис. 2, *a* приведены данные для заряда из смеси HMX + Al(1-6S), на рис. 2, *b* — для заряда из композита HMX/Al(1-6S). В первом случае наблюдаются области размером до 50 мкм (около двух размеров частиц HMX), в которых Al отсутствует, во втором случае частицы Al распределены практически равномерно. Распределение Al в заряде, полученном из композита, зависит от размера наноалюминия и типа покрытия. На рис. 2, *в, г* представлены микрофотографии композитов HMX/Al(2-6S) и HMX/Al(1-0x). Распределение Al в этих зарядах более однородное, чем в образцах механических смесей. Некоторые свойства исследуемых композитов приведены в [13, 14].

Важной характеристикой ВВ является чувствительность. В [11, 15–17] для алюминизированных композитов и механических смесей на основе HMX приведены сравнительные данные по чувствительности к механическому воздействию. При этом методом разрушающихся оболочек [18] определялось критическое давление инициирования взрыва ( $p_{cr}$ ). Анализ результатов показал следующее.

- Замена микронного Al наноалюминием, а также увеличение его массового содержания (до 25 %) в композитах и механических смесях приводят к повышению чувствительности (уменьшению  $p_{cr}$ ).
- Для композитов с частицами наноалюминия, имеющих одинаковое покрытие, значение  $p_{cr}$  практически не зависит от размера частиц (40 или 140 нм).

- Чувствительность композитов и механических смесей существенно увеличивается с уменьшением «возраста» наноалюминия. Так, значение  $p_{cr}$  для композиций со свежеприготовленным порошком совпадает со значениями, характерными для инициирующих ВВ.

В настоящей работе получены энергетические материалы, в которых частицы наноалюминия распределены более равномерно, чем при традиционном смешении, при этом однородность состава сохраняется и в прессованных зарядах.

## СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ

Измерение скорости детонации проводилось в опытах с зарядами диаметром 20 мм с помощью электроконтактных датчиков. База измерения превышала 2 диаметра образца, инициирование осуществлялось зарядом флегматизированного гексогена (RDX) через таблетку исследуемого вещества высотой 1.5 диаметра. Погрешность измерения не превышала 50 м/с. Полученные данные представлены в табл. 2:  $\rho_0$  — плотность заряда;  $\eta$  — относительная плотность;  $D$  — экспериментальная скорость детонации;  $\rho_{HMX} = 0.85\rho_0\rho_{Al}/(\rho_{Al} - 0.15\rho_0)$  — плотность HMX в алюминизированном заряде, где  $\rho_{Al}$  — плотность Al;  $D_{HMX}$  — скорость детонации HMX при плотности  $\rho_{HMX}$ .

Во всех случаях введение наноалюминия снижает скорость детонации относительно  $D_{HMX}$ , причем в большей степени, чем добавление микронного Al. Максимальная разность  $D_{HMX} - D$  наблюдается для ком-

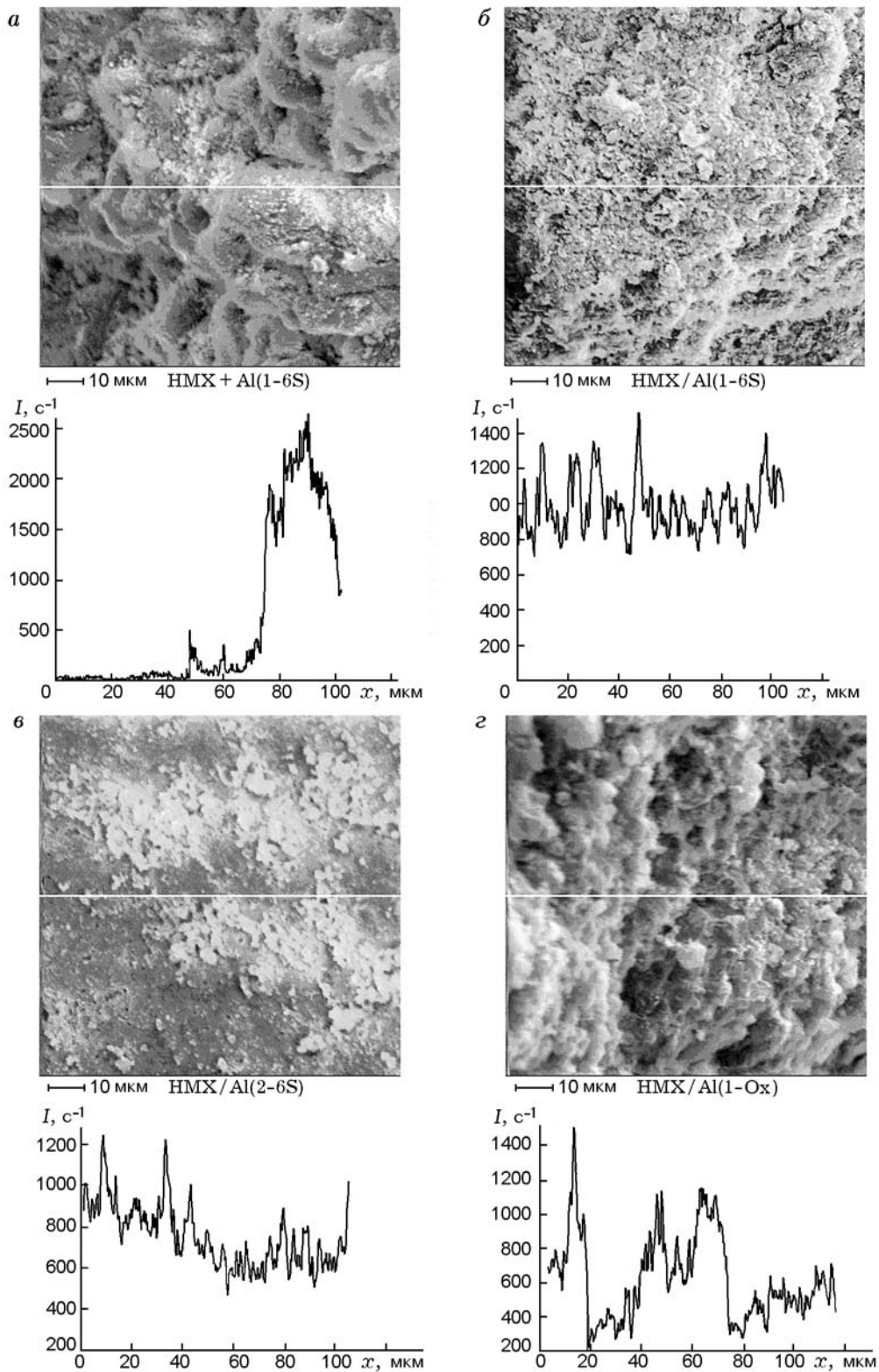


Рис. 2. Микрофотографии поверхности прессованных зарядов и распределения Al вдоль полосы сканирования (светлая линия на фотографиях):

*a, б* — механическая смесь и композит, содержащие Al(1-6S); *в, г* — композиты, содержащие Al(2-6S) и Al(1-0x) соответственно

Таблица 2

## Скорость детонации

Состав	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\eta$ , %	$D$ , км/с	$\rho_{\text{НМХ}}$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{\text{НМХ}}$ , км/с	$D_{\text{НМХ}} - D$ , км/с	$D^*$ , км/с	$\Delta D^*$ , км/с
НМХ + Al(1-6S)	1.76	88.2	7.81	1.66	8.27	0.46	7.81	+0.15
НМХ/Al(1-6S)	1.77	89.0	8.02	1.67	8.32	0.30	7.96	
НМХ + Al(1-Ох)	1.75	87.8	7.85	1.65	8.24	0.39	7.88	+0.21
НМХ/Al(1-Ох)	1.81	90.6	8.25	1.71	8.44	0.19	8.09	
НМХ + Al(2-6S)	1.69	84.6	7.63	1.58	8.02	0.39	7.88	-0.16
НМХ/Al(2-6S)	1.77	88.7	7.76	1.67	8.31	0.55	7.72	
НМХ + Al(2-Ох)	1.73	86.9	7.69	1.63	8.18	0.49	7.79	+0.08
НМХ/Al(2-Ох)	1.71	85.8	7.70	1.61	8.10	0.40	7.87	
НМХ + Al(7)	1.87	93.7	8.55	1.77	8.66	0.11	8.18	—
НМХ	1.72	90.2	8.48	1.66	8.27	—	—	—
	1.81	95.1	8.79					

позита НМХ/Al(2-6S), минимальная — для НМХ/Al(1-Ох).

Приведенные (к одной плотности НМХ в заряде) значения скорости детонации определялись как  $D^* = D - 3.34(\rho_{\text{НМХ}} - 1.66)$ . При этом для смесового ВВ зависимость  $D(\rho)$  предполагалась линейной, а ее наклон таким же, как и для НМХ. Величины  $D^*$  и  $\Delta D^*$  (разность приведенных скоростей в заряде композита и соответствующей механической смеси) также представлены в табл. 2. Для смесей получены одинаковые значения  $D^*$ , в то время как для композитов  $D^*$  различались почти на 200 м/с. Для трех композитов скорости детонации оказались выше, чем в соответствующих смесях. Однако по сравнению со смесью НМХ + Al(7) заряды из композитов не имеют преимуществ по скорости.

Скорость детонации алюминизированных составов ниже, чем у НМХ. Падение скорости может быть вызвано как ростом энергопотерь из-за ударного сжатия, вовлечения в поток и прогрева частиц Al, так и уменьшением количества молей газообразных продуктов в результате взаимодействия Al с ПД. Таким образом, измерение только скорости детонации не позволяет выяснить, реагирует ли Al с ПД в детонационной зоне.

## ПРОФИЛИ ДАВЛЕНИЯ

Профили давления определялись с помощью индикаторной методики [19]. В качестве

индикатора использовался бромформ. Исследуемые заряды диаметром 40 мм и высотой  $\approx 45$  мм инициировались генератором плоского фронта (через промежуточный заряд RDX высотой 10 мм и плотностью 1.67 г/см<sup>3</sup>). Такие же заряды использовались и при измерении профилей температуры. Точность определения давления составляла 3 %. Профили давления в ПД приведены на рис. 3. Они носят двухпиковый характер для всех исследуемых композиций за исключением НМХ/Al(2-6S), т. е. состава, который наиболее однороден по структуре. Ранее аналогичные профили были получены для некоторых смесей на основе НМХ с микронным и субмикронным Al [4, 20].

Экспериментальные данные представлены также в табл. 3, где  $D$  — скорость детонации, соответствующая плотности  $\rho_0$ ;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_{\text{min}}$  — давления продуктов детонации в первом и втором пиках, а также минимальное значение давления между пиками;  $\tau_{12}$  — время между пиками;  $\langle p \rangle$  — давление, осредненное по времени записи.

При приведении экспериментальных значений давления к одной плотности заряда предполагалось, что состав продуктов не меняется и профиль давления сохраняет свои особенности. В этом случае приведенные значения  $p^*$  определяют выражением  $p^* = (D^*/D)^2 p (1.76/\rho_0)$ . Полученные таким образом давления также представлены в табл. 3. Падение давления между пиками меньше для сме-

Таблица 3

## Давление в продуктах детонации

Параметр	Al(1-6S)				Al(2-6S)			
	смесь		композит		смесь		композит	
	опыт	приведенные значения	опыт	приведенные значения	опыт	приведенные значения	опыт	приведенные значения
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	1.80	1.76	1.82	1.76	1.75	1.76	1.71	1.76
$D$ , км/с	7.95	7.81	8.16	7.96	7.83	7.88	7.55	7.72
$p_1$ , ГПа	29.2	27.6	27.5	25.4	29.0	29.6	24.6*	26.5*
$p_2$ , ГПа	28.6	26.9	29.1	26.9	29.8	30.4	29.0*	31.3*
$p_{\min}$ , ГПа	22.0	20.7	24.0	22.1	22.0	22.4	—	—
$\tau_{12}$ , мкс	0.29	—	0.50	—	0.16	—	0.08*	—
$\langle p \rangle$ , ГПа	25.3	23.9	26.4	24.4	25.4	25.9	25.7	27.6

Примечание. \* Монотонный рост давления.

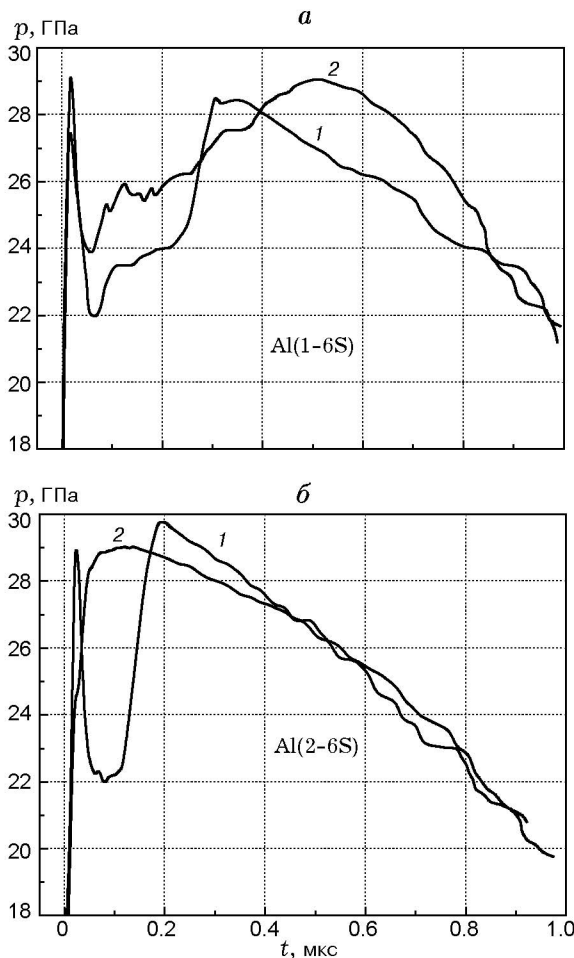


Рис. 3. Профили давления продуктов детонации:

1 — механические смеси, 2 — композиты

сей с более мелким Al (как по времени, так и по глубине). Для данного типа Al значения  $p_2^*$  практически одинаковы у композита и смеси, но достигаются за различное время. Вместе с тем они выше для составов с более мелким алюминием — Al(2-6S). Наличие двухпиковой структуры негативно отражается на среднем давлении, полученном в пределах первой микросекунды. Двухпиковый профиль обнаружен только для зарядов длиной  $\approx 45$  мм. Вопрос о стационарности распространения детонационной волны с таким профилем и его трансформации и длиной заряда экспериментально не исследовался.

### ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Профили температуры получены при регистрации излучения, испускаемого с контактной границы ПД — LiF (рис. 4). Исследуемые композиции и некоторые их характеристики представлены в табл. 4, где  $T_1$ ,  $T_2$  и  $\tau_{12}$  — первое и второе максимальные значения температуры и время между ними;  $T(1)$  — значение температуры, измеренное через 1 мкс после начала записи;  $\langle T \rangle$  — средняя температура в первые две микросекунды.

Прямое сравнение профилей давления и температуры не совсем корректно. Яркостная температура измеряется в отраженной волне сжатия, при этом исследуемые заряды различаются начальной плотностью. Однако профили качественно согласуются. Нарастание тем-

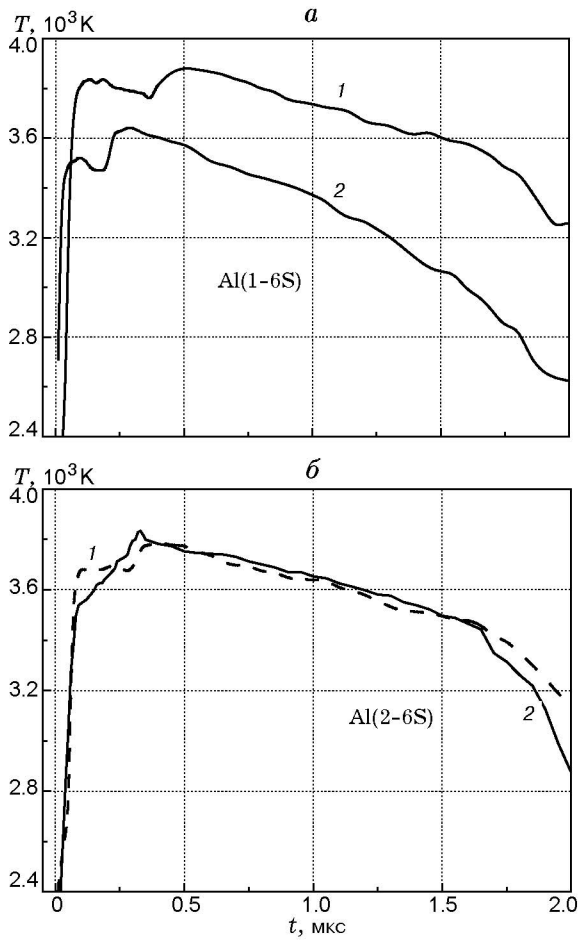


Рис. 4. Профили яркостной температуры на контактной границе продуктов детонации с LiF:

1 — механические смеси, 2 — композиты

Таблица 4  
Температура продуктов детонации

Параметр	Al(1-6S)		Al(2-6S)	
	смесь	композит	смесь	композит
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	1.80	1.77	1.75	1.73
$D$ , км/с	7.95	8.02	7.84	7.63
$T_1$ , К	3 840	3 520	3 665	3 540*
$T_2$ , К	3 885	3 645	3 795	3 835
$\tau_{12}$ , мкс	0.37	0.21	0.31	0.24*
$T(1)$ , К	3 740	3 370	3 655	3 640
$\langle T \rangle$ , К	3 600	3 270	3 555	3 545

Примечание. \*Монотонный рост температуры.

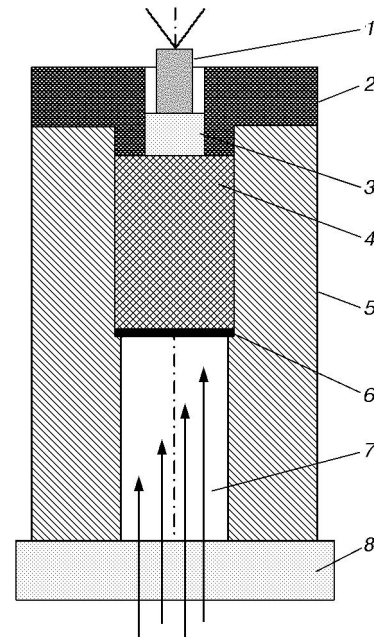


Рис. 5. Схема экспериментальной сборки для регистрации скорости полета медной пластины:

1 — капсуль-детонатор, 2 — крышка из пенопласта, 3 — слой RDX, 4 — заряд исследуемого вещества, 5 — стальная оболочка, 6 — медная пластина, 7 — игольчатые датчики, 8 — крышка из плексигласа

пературы также имеет «ступенчатый» характер (см. рис. 4). Наиболее гладкий температурный профиль получен для наиболее однородного композита HMX/Al(2-6S).

### МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Метательная способность составов определялась по схеме, приведенной на рис. 5. Сборка состояла из массивной стальной оболочки, с одной стороны закрытой пенопластовой крышкой с отверстием под капсуль, а с другой — плексигласовой крышкой, в которую жестко вмонтированы четыре игольчатых датчика. Заряд исследуемого вещества диаметром 20 мм и длиной  $\approx 30$  мм помещался в оболочку со стороны пенопластовой крышки. Иницирование заряда осуществлялось капсулем-детонатором через слой RDX массой 0.6 г. На торце заряда располагалась медная пластина толщиной около 1.5 мм. Расстояние между медной пластиной и первым датчиком составляло  $\approx 5$  мм. Второй, третий и четвертый датчики помещались соответственно на расстояниях  $\approx 10$ ,  $\approx 20$  и  $\approx 30$  мм от первого. Интервалы времени между замыканиями датчиков фиксировались с помо-

стью двух АЦП с временным разрешением 10 и 5 нс. Средняя скорость полета медной пластины определялась на трех базах. Ошибка измерения не превышала 1.5 %.

Характеристики исследуемых зарядов — тип композиции, плотность ( $\rho_0$ ) и высота заряда ( $H$ ) — приведены в табл. 5. Там же представлены толщины медных пластин ( $H_{Cu}$ ), расстояния между медной пластиной и первым датчиком ( $L_0$ ), базы, на которых проводились измерения ( $L_1, L_2, L_3$ ), измеренные времена ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ ) и средние скорости полета пластины на соответствующих базах измерения ( $W_1, W_2, W_3$ ).

Полученные значения  $W$  были отнесены к середине соответствующей базы полета, при этом за точку отсчета принято начальное положение медной пластины. Построенные таким образом зависимости скорости пластины от расстояния приведены на рис. 6, а.

Результаты получены в опытах, исходные параметры которых (высота и плотность зарядов, толщина медной пластины) различались незначительно. Для сравнения результаты экспериментальные скорости были приведены к толщине медной пластины 1.49 мм, высоте заряда 30 мм и плотности алюминизированных зарядов 1.76 г/см<sup>3</sup> (плотность НМХ в заряде 1.66 г/см<sup>3</sup>). Скорректированные значения  $W^*$  представлены на рис. 6, б, значения для последней базы измерения ( $W_3^*$ ) даны в табл. 5. Добавление Al приводит к увеличению скорости метания по сравнению с зарядом НМХ плотностью 1.66 г/см<sup>3</sup> (2.40 км/с) во всех случаях, кроме композита с Al(act). Максимальные значения скорости полета получены для механической смеси НМХ + Al(3.6), минимальные — для композита НМХ/Al(act). В [5] было показано, что в случае смесей ВВ с порошками Al в процессе расширения ПД энергия окисления Al трансформируется в работу метания. Влияние добавки Al на метательную способность зависит от природы взрывчатой основы, соотношения компонентов смеси, размера частиц, содержания оксидной пленки в порошке Al [5]. Результаты настоящей работы согласуются с ранее сделанными выводами. На основании полученных данных можно проанализировать влияние структуры заряда на метательную способность. При одном и том же типе порошка Al структура заряда практически не влияет на зависимости  $W^*(L)$  (рис. 6, б). Различие значений, полученных для

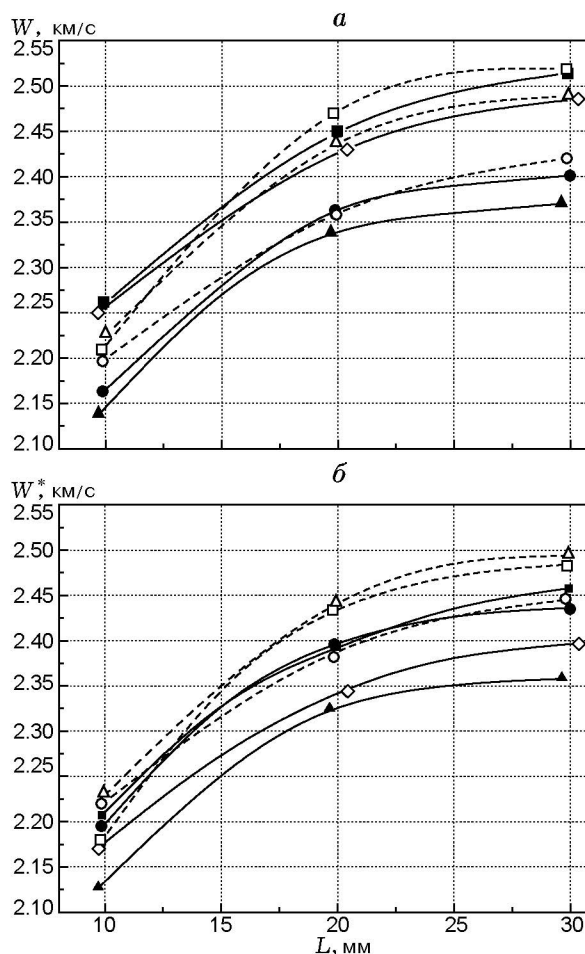


Рис. 6. Зависимости средних скоростей полета пластины от базы измерения:

а — экспериментальные значения, б — приведенные;  $\diamond$  — НМХ,  $\triangle$  — НМХ + Al(3.6),  $\square$  — НМХ + Al(1-6S),  $\circ$  — НМХ + Al(2-6S),  $\blacksquare$  — НМХ/Al(1-6S),  $\bullet$  — НМХ/Al(2-6S),  $\blacktriangle$  — НМХ/Al(act)

механической смеси и композита, лежит в пределах ошибки измерения. Для более крупного порошка Al(1-6S) лучшая компоновка композита приводит к незначительному превышению по скорости на начальной стадии разгона. Однако на конечной базе наблюдается противоположная картина. Зависимости скорости пластины от расстояния при метании зарядами с Al(2-6S) практически совпадают. В рамках методики М-40 для механических смесей НМХ + Al(7) было получено, что замена мелко-го НМХ (10 ÷ 20 мкм) крупным (200 ÷ 300 мкм) также незначительно снижает скорость метания [5]. На начальном участке разгона снижение скорости составляло  $\approx 2.5\%$ , на конечном —  $\approx 1.75\%$ .



Таблица 5  
Характеристики зарядов, экспериментальных сборок и значения скорости метания

Характеристика	НМХ	Al(3.6)	Al(1-6S)		Al(2-6S)		Al(act)
		смесь	смесь	композит	смесь	композит	композит
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	1.74	1.76	1.80	1.80	1.73	1.72	1.78
$H$ , мм	30.18	29.59	29.84	29.97	28.15	29.59	29.49
$H_{Cu}$ , мм	1.49	1.49	1.50	1.47	1.46	1.48	1.49
$L_0$ , мм	4.66	5.11	4.85	4.83	4.79	4.92	4.71
$L_1$ , мм	10.03	9.75	9.90	10.10	10.08	9.95	10.00
( $\tau_1$ , мкс)	(4.455)	(4.380)	(4.485)	(4.470)	(4.580)	(4.600)	(4.675)
$L_2$ , мм	11.35	10.08	10.13	10.08	9.98	9.97	9.90
( $\tau_2$ , мкс)	(4.670)	(4.135)	(4.100)	(4.115)	(4.230)	(4.220)	(4.230)
$L_3$ , мм	8.68	9.98	9.93	9.83	10.03	10.04	10.05
( $\tau_3$ , мкс)	(3.490)	(4.010)	(3.940)	(3.910)	(4.145)	(4.180)	(4.240)
$W_1$ , км/с	2.25	2.23	2.21	2.26	2.20	2.16	2.14
$W_2$ , км/с	2.43	2.44	2.47	2.45	2.36	2.36	2.34
$W_3$ , км/с	2.49	2.49	2.52	2.51	2.42	2.40	2.37
$W_3^*$ , км/с	2.40	2.49	2.48	2.46	2.44	2.44	2.36

Наблюдаемый прирост скорости метания на конечной базе измерения (максимально  $\approx 4\%$  относительно НМХ) связан с реализацией энергии окисления Al. Уменьшение размера частиц сопровождается увеличением доли оксида алюминия в составе. Этим объясняется тот факт, что значения скорости полета пластины на конечной базе (см. рис. 6, б) для смеси НМХ + Al(3.6) и смеси НМХ + Al(1-6S) совпадают. При увеличении полноты окисления Al все более существенную роль играет активность порошка Al. Зависимость  $W_3^*$  от активности порошка Al может быть аппроксимирована линейной функцией (рис. 7). Однако необходимо отметить, что при изменении активности порошков от 60 до 96 % диапазон изменения скоростей метания составляет всего  $\approx 150$  м/с или 5.5 %.

### ТЕПЛОТА ВЗРЫВА

Теплота взрыва является параметром, характеризующим энергосодержание ВВ. Ее исследование позволяет оценить потенциальные возможности взрывчатой системы совершать работу. В [5] представлены результаты экспериментального исследования теплоты взрыва

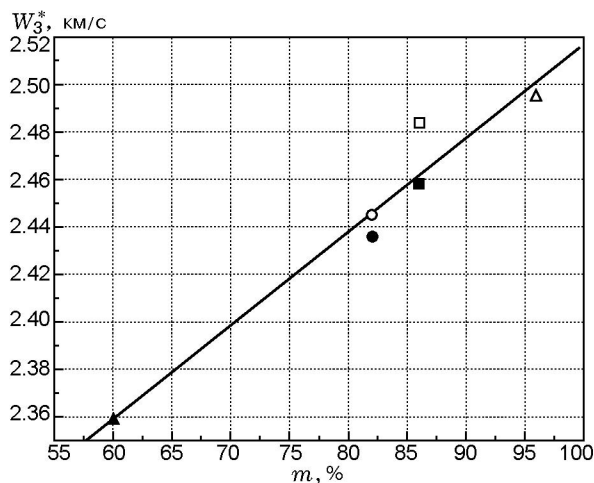


Рис. 7. Зависимость параметра  $W_3^*$  от активности исследуемых порошков Al:

механические смеси:  $\triangle$  — НМХ + Al(3.6),  $\square$  — НМХ + Al(1-6S),  $\circ$  — НМХ + Al(2-6S); компози́ты:  $\blacksquare$  — НМХ/Al(1-6S),  $\bullet$  — НМХ/Al(2-6S),  $\blacktriangle$  — НМХ/Al(act)

смесей, содержащих ВВ с различным кислородным балансом и порошки Al с различным размером частиц (включая наноалюминий). Из этих данных следует, что преимущество по теплоте взрыва композиций с наноалюминием

Таблица 6

## Теплота взрыва

Состав	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$Q$ , кДж/кг	$Q^*$ , кДж/кг	$N$ , моль/кг	$\gamma_1$ , %	$\gamma_2$ , %
НМХ	1.81	5 610	5 500	38.1	–	–
НМХ + Al(150)	1.86	6 600	6 560	31.7	71	70
НМХ + Al(15)	1.89	6 980	6 930	31.5	85	83
НМХ + Al(3.6)	1.85	7 080	7 040	31.4	91	87
НМХ + Al(1-1S)	1.83	6 930	6 900	31.5	96	83
НМХ + Al(1-6S)	1.84	7 020	6 990	31.5	99	85
НМХ/Al(1-6S)	1.75	6 960	6 970	31.5	99	85
НМХ + Al(2-6S)	1.76	6 840	6 840	31.5	98	80
НМХ/Al(2-6S)	1.72	6 770	6 780	31.6	95	78
НМХ + Al(1-Ox)	1.81	6 820	6 800	31.6	95	79
НМХ/Al(1-Ox)	1.80	6 830	6 810	31.6	95	79
НМХ + Al(2-Ox)	1.76	6 490	6 490	31.7	96	67
НМХ/Al(2-Ox)	1.71	6 430	6 450	31.7	94	66
НМХ/Al(act)	1.81	6 180	6 160	32.0	92	55

по сравнению с микронным Al может быть достигнуто при отрицательном кислородном балансе ВВ и высоком содержании добавки. Так, установлено, что смесь НМХ + 40 % Al(1-1S) превосходит по теплоте аналогичную композицию с Al(15). Однако при содержании добавки 15 % смесь с наноалюминием уже не имеет преимуществ по теплоте взрыва, что полностью подтверждают и результаты расчетов, выполненных для ряда модельных композиций [21]. В [5] отмечается, что неоднородность структуры зарядов из механических смесей, наряду с высоким содержанием оксидной пленки, может служить причиной отсутствия преимуществ у составов с наноалюминием. В частности, для таких смесей характерно образование конгломератов частиц наноалюминия в пространстве между более крупными зернами ВВ. Калориметрические исследования позволяют оценить возможности повышения теплоты взрыва за счет создания композитов, т. е. составов с однородным распределением частиц наноалюминия в матрице ВВ.

Теплота взрыва измерялась с использованием калориметрической установки с бомбой объемом 5 л [22]. Ошибка определения составляла 1 %. Значения теплоты взрыва композиций представлены в табл. 6, где  $\rho_0$  — плот-

ность заряда,  $Q$  — теплота взрыва при условии, что  $H_2O$  — газ;  $Q^*$  и  $N$  — соответственно теплота взрыва и количество молей газообразных ПД при плотности заряда 1.76 г/см<sup>3</sup>;  $\gamma_1$  — полнота окисления, равная отношению массы прореагировавшего Al к массе активного металла в порошке;  $\gamma_2$  — полнота окисления, равная отношению массы прореагировавшего Al ко всей массе добавки. Точность определения  $\gamma$  составляет  $\approx 3$  %. При расчетах состава ПД и приведении значений к одной плотности использовался метод работы [23].

Из полученных данных следует, что при уменьшении размера частиц Al от 150 до 3.6 мкм теплота взрыва смесей увеличивается. Для составов с наноалюминием теплота снижается с уменьшением размера частиц. При этом значения теплоты взрыва механических смесей и композитов с Al одного типа совпадают в пределах ошибки эксперимента. В целом же исследованные составы с наноалюминием уступают по теплоте смеси с Al(3.6). На рис. 8 представлены значения  $Q^*$  в зависимости от содержания активного Al в добавке. Штриховая линия получена расчетным путем и соответствует полному окислению активного Al. Экспериментальные точки для составов с наноалюминием лежат вблизи линии, т. е. активный Al

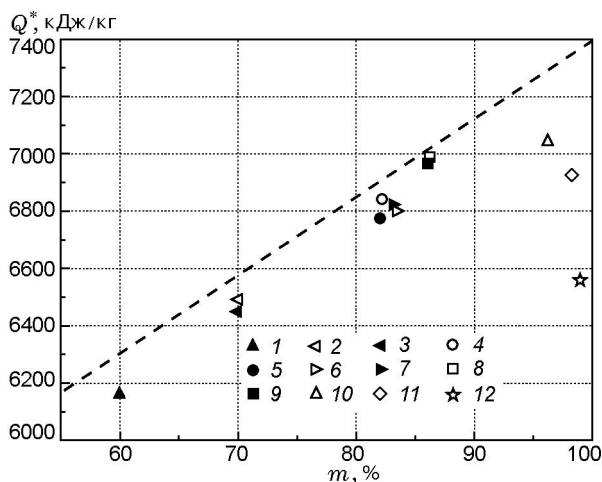


Рис. 8. Зависимость теплоты взрыва от содержания активного Al в порошке:

- 1 — NMX/Al(act), 2 — NMX + Al(2-Ox),
- 3 — NMX/Al(2-Ox), 4 — NMX + Al(2-6S),
- 5 — NMX/Al(2-6S), 6 — NMX + Al(1-Ox),
- 7 — NMX/Al(1-Ox), 8 — NMX + Al(1-6S),
- 9 — NMX/Al(1-6S), 10 — NMX + Al(3.6),
- 11 — NMX + Al(15), 12 — NMX + Al(150);

штриховая линия соответствует полному окислению активного Al

почти полностью окисляется при взрыве (значения  $\gamma_1$  в табл. 6 для наноалюминия независимо от размера частиц близки к 100 %). Уменьшение размера частиц наноалюминия приводит к падению теплоты взрыва из-за увеличения доли оксидной пленки ( $\gamma_2$  уменьшается). При высокой степени окисления наноалюминия теплота определяется прежде всего содержанием активного металла в порошке Al, а не его удельной поверхностью. По аналогичной причине уменьшение масштаба неоднородности составов с наноалюминием за счет создания композитов практически не влияет на теплоту взрыва.

В смесях NMX с Al(3.6), Al(15) и Al(150) алюминий окисляется не полностью ( $\gamma_1$  в табл. 6). В этом случае теплота взрыва определяется в основном удельной поверхностью частиц Al и снижается при увеличении размера частиц добавки.

Рис. 9 иллюстрирует зависимость  $Q^*$  от размера частиц Al. Предельное значение теплоты взрыва композиции NMX + 15 % Al, рассчитанное при условии, что вся добавка состоит из активного Al, а плотность заряда максимальна (1.994 г/см<sup>3</sup>), равно 7480 кДж/кг. Эта величина на  $\approx 6$  % превышает максимальное экспериментальное значение. Некоторого повыше-

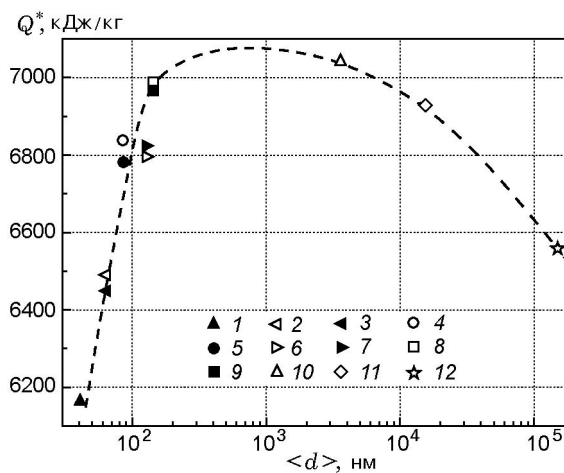


Рис. 9. Зависимость теплоты взрыва от размера частиц Al:

обозначения те же, что и на рис. 8

ния теплоты взрыва реальных составов можно достичь, если часть оксидной пленки частицы алюминия заменить активным покрытием при условии, что его участие в процессе химического превращения приведет к дополнительному выделению энергии при взрыве.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Алюминий является энергетической добавкой, уменьшение размера частиц которой до сотен нанометров и ниже, как ожидалось, будет интенсифицировать реагирование в непосредственной близости к детонационному фронту. Результаты исследования, представленные в настоящей работе, позволяют проследить поведение добавки за различные характерные времена. Проводимый анализ носит предварительный и качественный характер, поскольку условия взаимодействия Al с продуктами взрыва NMX отличаются при измерении различных параметров.

Фундаментальным вопросом исследования алюминизированных ВВ являются полнота и время окисления Al продуктами детонации. Согласно оценкам, проведенным на основании данных по теплоте взрыва, наноалюминий в условиях взрыва в калориметрической бомбе (за время  $\approx 50$  мкс) окисляется практически полностью. Полнота сгорания микронного Al (1 ÷ 10 мкм) близка к 90 %.

Средние скорости пластины при торцевом метании, измеренные на конечной базе, соответствуют времени  $\approx 15$  мкс. В работе [24] для

индивидуальных ВВ был разработан полуэмпирический метод расчета метательной способности, применимый к условиям методик разгона стальной пластины (М-40) и расширения медного цилиндра (Т-20). Предполагалось, что кинетическая энергия метаемого тела пропорциональна объемному энергосодержанию ВВ ( $W^2 \sim Q\rho_0$ ), а коэффициент отбора энергии рассматривался как функция количества молей газообразных ПД и степени их расширения.

В случае индивидуальных ВВ реакции завершаются на ранних стадиях расширения ПД, а для алюминизированных ВВ химические процессы могут протекать в течение более длительного времени. В связи с этим из-за различия времен, характерных для метания пластины и взрыва в калориметрической бомбе, соответствующие значения полноты окисления Al могут отличаться. Однако для рассматриваемых составов наблюдается линейная связь между  $W_3^*$  и  $(Q^*)^{1/2}$  (при незначительном изменении количества молей газообразных ПД) (см. рис. 10). Существование такой корреляции косвенно свидетельствует о том, что Al с размером частиц от сотни нанометров до нескольких микрометров окисляется достаточно глубоко не только в калориметрической бомбе, но и при метании пластины за время  $\approx 15$  мкс. Аналогичный вывод

можно сделать и на основании данных [1], полученных для составов HMX + Viton (85/15) и HMX + Al + Viton (72.7/13.3/14) по методу «цилиндр-тест». Состав с размером частиц Al 5 мкм «не добирает» по скорости расширения оболочки на первой базе ( $\approx 4$  мкс), однако скорости становятся равными на конечной базе ( $\approx 20$  мкс), при этом оба значения на 4 % меньше максимального расчетного [1].

Дальнейший анализ показывает, что за характерные времена разгона пластины процессы окисления наноалюминия и микронного Al различаются. Из данных, приведенных в табл. 7, следует, что все указанные алюминизированные составы разгоняют пластину приблизительно до одинаковой конечной скорости, но при этом наименьшую скорость детонации имеет состав HMX/Al(2-6S), а среднее давление ПД в пределах первой микросекунды максимальное. Последнее обусловлено отсутствием двухпиковой конфигурации профиля давления.

Для объяснения двухпиковой конфигурации, а также данных, полученных ранее по скоростям детонации и температурам ПД в механических смесях на основе HMX [4], в [25] были высказаны некоторые предположения об особенностях детонации алюминизированных ВВ, реактивности Al и о временах, за которые процесс окисления протекает в значительной степени. Проведенный в [25, 26] термодинамический анализ ударных адиабат ПД алюминизированных ВВ в плоскости  $p-v$  показал, что параметры Чепмена — Жуге, соответствующие равновесным адиабатам конечных продуктов с конденсированным  $Al_2O_3$ , ниже параметров, которые соответствуют частично равновесным адиабатам, рассчитанным в предположении, что Al инертен. Однако изохронна, проходящая через точку Чепмена — Жуге на неравновесной адиабате, идет круче. Она пересекает равновесную адиабату, идущую более плавно в области полуторного и двукратного расширения продуктов. При этом основная часть энергии от взаимодействия Al с ПД реализуется на стадии, когда давление снижается до нескольких гигапаскалей [25].

Детонация смесевых ВВ отличается от детонации индивидуального ВВ, для которой любая адиабата частично прореагировавших (неравновесных) продуктов расположена между ударными адиабатами ВВ и конечных продуктов. Традиционно предполагается, что

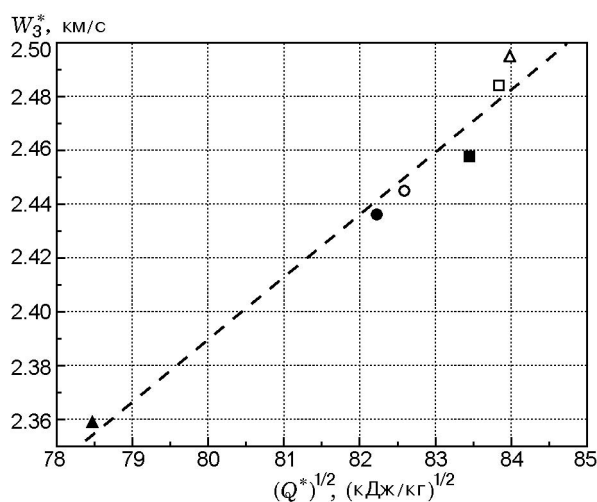


Рис. 10. Зависимость средней скорости медной пластины на конечной базе от  $(Q^*)^{1/2}$  ( $\rho_0 = 1.76$  г/см<sup>3</sup>):

механические смеси:  $\Delta$  — HMX + Al(3.6),  $\square$  — HMX + Al(1-6S),  $\circ$  — HMX + Al(2-6S); композиции:  $\blacksquare$  — HMX/Al(1-6S),  $\bullet$  — HMX/Al(2-6S),  $\blacktriangle$  — HMX/Al(act)

Таблица 7

Взрывные характеристики зарядов ( $\rho_0 = 1.76 \text{ г/см}^3$ )

Состав	$D^*$ , км/с ( $<0.1 \text{ мкс}$ )	$\langle p_{1.0}^* \rangle$ , ГПа ( $\approx 1 \text{ мкс}$ )	$W_1^*$ , км/с ( $\approx 4.5 \text{ мкс}$ )	$W_3^*$ , км/с ( $\approx 15 \text{ мкс}$ )	$\gamma_1$ , % ( $\approx 50 \text{ мкс}$ )
HMX + Al(3.6)	8.12	–	2.23	2.49	91
HMX + Al(1-6S)	7.81	23.9	2.18	2.48	99
HMX/Al(1-6S)	7.96	24.4	2.21	2.46	99
HMX + Al(2-6S)	7.88	25.9	2.22	2.45	98
HMX/Al(2-6S)	7.72	27.6	2.19	2.44	95
HMX*	8.27	27.0	2.17	2.40	–

Примечание. \*Плотность заряда  $1.66 \text{ г/см}^3$ .

неравновесные адиабаты, описывающие детонирующее ВВ, монотонно сдвигаются от адиабаты исходного ВВ к адиабате конечных продуктов в ходе детонационного разложения. Для алюминизированных ВВ это «движение» носит, согласно [25], немонотонный характер, при этом появляется принципиальная возможность детонации таких ВВ в недосжатом режиме [25, 26]. В таком режиме скорость детонации выше, а массовая скорость и давление в продуктах ниже, чем в нормальном режиме, определяемом точкой касания прямой Михельсона — Рэля равновесной адиабаты конечных продуктов.

Чтобы сравнить экспериментальные и расчетные [25] профили давления, последние были приведены к одному масштабу. (Профили давления  $p(x)$  перестроены в зависимость  $p(t)$  с использованием значения скорости детонации, рассчитанного в предположении, что Al реагирует). Конечно, эта процедура не совсем корректна, потому что движение любой точки профиля со скоростью фронта является допущением. Пересчитанные профили приведены на рис. 11. Расчет в предположении быстрого сгорания Al (за время  $\approx 1 \text{ мкс}$ ) показал наличие характерной особенности режима недосжатой детонации: «плато» на профилях давления и массовой скорости расширяется при увеличении длины заряда [25]. В зависимости от условий инициирования детонации «плато» может трансформироваться в двухпиковый профиль, длительность которого также может меняться с длиной [25]. Сравнение экспериментальных и рассчитанных профилей давления обнаруживает общие черты поведения алюминизированных составов.

Качественно процесс энерговыделения в

ходе детонации алюминизированных ВВ можно представить в виде многостадийного процесса. Первой (и самой быстрой) является стадия детонационного разложения HMX, сопровождаемая выделением энергии. На втором этапе частицы Al прогреваются и вовлекаются в реакцию, при этом первая стадия может быть эндотермичной. Более мелкие частицы в более однородных зарядах вовлекаются в реакцию раньше и прогреваются быстрее, что и приводит к заметному падению скорости детонации. При этом для более однородных и тонкодисперсных составов среднее давление в пределах одной микросекунды оказывается больше (см. табл. 7), а провал между пиками давления меньше или же он вовсе трансформируется (как для HMX/Al(2-6S)) в плавное нарастание в пределах первых  $0.2 \text{ мкс}$  (рис. 3, б). Таким образом, можно предположить, что наименьшая скорость детонации и наибольшее среднее давление для композита с Al(2-6S) связаны с более интенсивным и быстрым вовлечением наоалюминия в реакцию. Однако уже при сравнении скоростей метания пластины, измеренных на первой базе, данный композит практически потерял свои «преимущества». Одна из причин этого указана выше — низкая активность порошка. Другая связана с тем, что более раннее и быстрое энерговыделение не означает большую работу при расширении. С учетом практически полного окисления она такая же (или даже чуть меньше). К аналогичному выводу можно прийти, анализируя данные, полученные ранее для механической смеси HMX и пудры Al(ф) [4]. Для этой системы время между пиками было наибольшим среди исследованных составов — более  $0.4 \text{ мкс}$  (см. рис. 11). Ско-

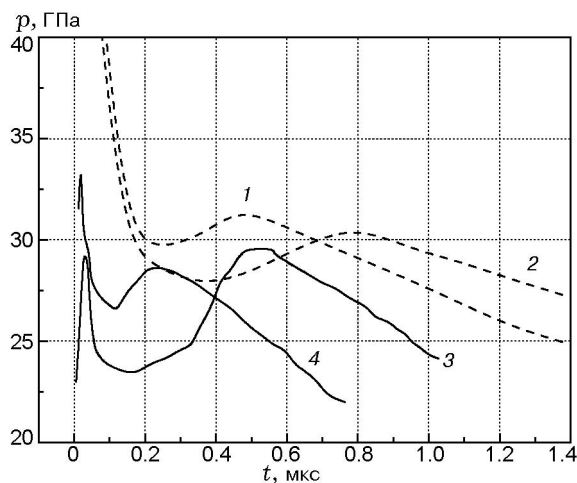


Рис. 11. Рассчитанные [25] и экспериментальные [4] профили давления продуктов детонации НМХ + Al (85/15):

расчет: 1 — длина зарядов  $\approx 26$  мм; 2 —  $\approx 53$  мм; эксперимент: 3 — НМХ + Al(f), 4 — НМХ + Al(1-1S)

рость детонации и среднее давление по сравнению со случаем использования зарядов, содержащих порошок Al(7), были меньше, а скорости метания на конечной базе, измеренные по методике М-40, практически совпадали [5] (эти скорости были максимальными среди исследованных составов). Таким образом, более значительное и длительное падение давления между пиками можно объяснить более поздним началом и более поздним завершением реагирования. Вместе с тем нет оснований напрямую связывать значения времени между пиками давлений и временем вовлечения Al в реакцию.

По сравнению с порошками микронного размера наноалюминий вовлекается в реакцию раньше (за десятые доли микросекунды) и успевает прореагировать за меньшее время (микросекунды), при этом заметное влияние может оказывать структура заряда (смесь или композит). Однако более раннее выделение энергии не оказывает положительного воздействия на метательную способность и теплоту взрыва.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены и исследованы энергетические композиционные материалы с равномерным распределением частиц наноалюминия в матрице ВВ, причем однородность распределения сохраняется в высокоплотных зарядах.

Проведен анализ взрывчатых характеристик композитов по сравнению с механическими смесями такого же состава, с одной стороны, и со смесями, содержащими микронные частицы Al, — с другой. Уменьшение размера наноалюминия одного типа в композитах приводит к падению скорости детонации. В то же время для механических смесей с одним типом наноалюминия (но разного размера) получены практически одинаковые значения скоростей. Профили давления ПД носят двухпиковый характер для всех исследуемых составов, за исключением наиболее однородного композита. Давления во втором пике, измеряемые для зарядов из композита и механической смеси с наноалюминием одного типа, практически одинаковы, но достигаются за различное время. Вместе с тем они выше у зарядов с более мелким наноалюминием. Профили температуры качественно согласуются с профилями давления. Измеренные значения скорости метания пластины показывают, что кроме эффективной удельной поверхности контакта частиц Al с продуктами взрыва НМХ существенную роль играет активность порошка (скорость метания линейно зависит от активности Al). Максимальное значение реализуется от заряда с Al(3.6), оно на  $\approx 4\%$  превосходит скорость метания зарядом на основе НМХ. Теплоты взрыва композитов и механических смесей с одинаковым порошком наноалюминия близки и не превосходят теплоту взрыва смесей, содержащих микронный порошок. Наноалюминий практически полностью окисляется в условиях взрыва в калориметрической бомбе, и основным фактором, определяющим теплоту взрыва, также является его активность. Экспериментальные данные по метанию согласуются с данными по теплоте. Для исследуемых составов зависимость средней скорости полета пластины на конечной базе от энергосодержания  $(Q^*)^{1/2}$  близка к линейной. Это указывает на то, что взаимодействие Al с ПД при метании завершается за характерное для используемой методики время.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что по сравнению с порошками микронного размера наноалюминий вовлекается в реакцию раньше (за десятые доли микросекунды) и успевает прореагировать за меньшее время (микросекунды). При этом структура заряда (смесь или композит) может оказывать заметное влияние. Однако более

раннее выделение энергии не приводит к положительному эффекту при торцевом метании пластины и не увеличивает теплоту взрыва. Таким образом, практическое использование нанокompозитов на основе НМХ (как взрывчатых материалов) при данном соотношении компонентов нецелесообразно при решении задач, связанных с характерным временем реализации взрывного действия более  $1 \div 2$  мкс. Ограничивающим фактором является не только низкая активность порошков наноалюминия, но и предпочтительность пролонгированного энерговыделения в ходе расширения ПД для решения большого числа практических задач, связанных с работой взрыва. Имеющиеся в литературе данные дают возможность предположить, что использование нанокompозитов на основе ВВ с большим критическим диаметром (например, литой ТНТ, АДНА) может привести к миниатюризации изделий за счет уменьшения критического диаметра детонации. Также возможно, что алюминизированные нанокompозиты найдут применение как компоненты топлив для регулировки процесса горения и уменьшения двухфазных потерь.

Авторы благодарны А. Н. Стрелецкому за предоставленную возможность проведения исследования с механоактивированным порошком Al.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Finger M., Hornig H. C., Lee E. L., Kury J. W. Metal acceleration by composite explosives // Proc. 5th Symp. (Intern.) on Detonation, Annapolis. ONR. ACR-184. 1970. P. 55–63.
2. 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.
3. Гоголя М. Ф., Бражников М. А., Долгобородов А. Ю., Махов М. Н., Лейпунский И. О., Жигач А. Н., Березкина Н. Г., Пшеченков П. А., Кусков М. Л. Структура алюминизированных ВВ и ее влияние на их детонационные параметры // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. междунар. конф. «III тематические Харитоновские чтения» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 20–25.
4. Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин В. Г. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.
5. Махов М. Н., Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Пепекин В. И. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 96–105.
6. А. с. 814432 СССР. Способ получения аэрозолей металлов / Ген М. Я., Миллер А. В. 23.03.81. Бюл. № 11.
7. Жигач А. Н., Лейпунский И. О., Кусков М. Л., Стоенко Н. И., Сторожев В. Б. Установка для получения и исследования физико-химических свойств наночастиц металлов // Приборы и техника эксперимента. 2000. Т. 43, № 6. С. 122–129.
8. Жигач А. Н., Лейпунский И. О., Кусков М. Л., Пшеченков П. А., Березкина Н. Г., Ларичев М. Н., Красовский В. Г. Синтез покрытий на поверхности ультрамелкодисперсных частиц алюминия // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 4. С. 72–78.
9. Стрелецкий А. Н., Колбанев И. В., Борунова А. Б., Леонов А. В., Бутягин П. Ю. Механохимическая активация алюминия. 1. Совместное измельчение алюминия с графитом // Коллоидный журн. 2004. Т. 66, № 6. С. 811–818.
10. Jigatch A. N., Leipunsky I. O., Kuskov M. L., Krasovsky P. A., Gogulya M. F. A technique to prepare aluminized nanosized explosives // Proc. of the Twenty-Ninth Intern. Pyrotechnics Seminar / F. J. Schelling (Ed.). IPSUSA, Inc., 2002. P. 583–589.
11. Лейпунский И. О., Жигач А. Н., Кусков М. Л., Пшеченков П. А., Ларичев М. Н., Гоголя М. Ф., Теселкин В. А. Алюминизированный взрывчатый нанокompозит — получение и свойства // Тр. междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения». Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 219–223.
12. Jigatch A. N., Leipunsky I. O., Kuskov M. L., Pshechenkov P. A., Larichev M. N., Teselkin V. A., Gogulya M. F. Aluminized nanostructured energetic material — preparation and study // Novel Energetic Materials and Applications: Proc. of the Ninth Intern. Workshop on Combustion and Propulsion. Lerici, Italy, 2004. P. 13/1–13/12.
13. Gogulya M. F., Makhov M. N., Dolgoborodov A. Y., Brazhnikov M. A., Leipunsky I. O., Jigatch A. N., Kuskov M. L., Larichev M. N. Aluminised nanocomposites based on HMX // Energetic Materials, Structure and Properties: 36th Intern. Annu. Conf. of ICT & 32nd Intern. Pyrotechnics Seminar, June 28–July 1, 2005. Karlsruhe, FRG. P. 65/1–65/11.

14. **Гогоуля М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Лейпунский И. О., Жигач А. Н., Кусков М. Л., Ларичев М. Н.** Нанокompозиты на основе октогена и алюминия. Получение и детонационные свойства // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 33–38.
15. **Щетинин В. Г., Теселкин В. А., Жигач А. Н. и др.** Влияние структуры и физико-химических свойств поверхности алюминиевых частиц на чувствительность взрывчатых композиций // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. междунар. конф. «III тематические Харитоновские чтения» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 34–38.
16. **Teselkin V. A.** Mechanical sensitivity of metallized explosive nanocomposites // Energetic Materials, Structure and Properties: 36th Intern. Annu. Conf. of ICT & 32nd Intern. Pyrotechnics Seminar, June 28–July 1, 2005. Karlsruhe, FRG. P. 81/1–81/11.
17. **Теселкин В. А.** Механическая чувствительность наноструктурных взрывчатых материалов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 61–67.
18. **Щетинин В. Г.** Оценка механической чувствительности твердых взрывчатых веществ по методу разрушающейся оболочки // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 5. С. 116–121.
19. **Гогоуля М. Ф., Долгобородов А. Ю.** Индикаторный метод исследования ударных и детонационных волн // Хим. физика. 1994. Т. 13, № 12. С. 118–127.
20. **Гогоуля М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А.** Тонкая структура детонационных волн в смесях октогена с алюминием // Хим. физика. 1998. Т. 17, № 1. С. 41–44.
21. **Махов М. Н.** Метод оценки теплоты взрыва алюминизированных ВВ // Экстремальные состояния вещества, детонация, ударные волны: Материалы междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 53–58.
22. **Махов М. Н.** Теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Хим. физика. 2000. Т. 19, № 9. С. 83–87.
23. **Makhov M. N.** The effect of charge density on the explosion heat of high explosives // Proc. of the 33rd Intern. Annu. Conf. of ICT. Karlsruhe, Germany. 2002. P. 73/1–73/13.
24. **Makhov M. N.** Explosion heat and metal acceleration ability of high explosives // Proc. of 32nd Intern. Conf. Annu. of ICT. Karlsruhe, FRG. 2001. P. 97/1–97/11.
25. **Имховик Н. А.** Об особенностях влияния добавок высокодисперсных металлов на структуру течения и режим распространения детонационных волн в смесевых взрывчатых веществах // Хим. физика. 2005. Т. 24, № 11. С. 3–10.
26. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. 3-е изд. М.: Физматлит, 2002. Т. 1.

*Поступила в редакцию 11/IV 2007 г.*

---