

8. Ю.А. Бондаренко. Свойства решений при счете нормальной детонации навязыванием энерговыделения с заданной скоростью фронта // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 1. С. 3–18.
9. Ю.А. Бондаренко Особенности счета детонации на эйлеровых сетках с навязанной скоростью фронта // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2010. Вып. 3. С. 38–45.
10. С.М. Tarver, J.W. Forbes, F. Garcia et al. Manganin Gauge and Reactive Flow Modeling Study of the Shock Initiation of PBX 9501 // Shock Compressed of Condensed Matter, 2001. URL: www.osti.gov/scitech/biblio/15005431-manganin-gauge-reactive-flow-modeling-study-initiation-pbx.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АЛЮМИНИЯ НА МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

М.Н. Махов

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, Россия

Метательная способность (МС) занимает особое место среди характеристик взрывчатых веществ (ВВ), так как результаты измерений МС позволяют не только определять важный параметр эффективности ВВ, но и изучать процесс расширения продуктов детонации (ПД). Одним из наиболее распространенных методов исследования МС в нашей стране является методика М-40 (аналог М-60 и М-20) [1]. В методе М-40 изучается движение стальной пластины, диаметром 40 мм и толщиной 4 мм, метаемой с торца цилиндрического заряда, высотой и диаметром 40 мм, в канале толстостенной стальной оболочки. Мерой МС служит скорость пластины на расстоянии 40 мм от торца заряда. Данные, рассматриваемые в предлагаемой работе, соответствуют методу М-40.

Результаты исследования МС, приведенные в [2–4], свидетельствуют о том, что в настоящее время дисперсный Al является наиболее перспективным материалом для использования в качестве горючей добавки в составах метательного действия. В последние годы особое внимание исследователей в ИХФ РАН уделялось взрывчатым композициям, содержащим наноразмерный Al (nAl). В частности, определялась МС наноструктурных композитов на основе октогена [5]. Вопреки ожиданиям, оказалось, что нанокompозиты, то есть системы с равномерным распределением частиц nAl в матрице октогена, по МС не обладают преимуществом перед составами, содержащими Al с размером частиц порядка нескольких микрон. Однако вопрос о том, как повлияет на МС переход от механической смеси к нанокompозиту в случае иной взрывчатой основы, например, отличающейся от октогена по кислородному балансу (КБ), подробно не обсуждался. Предлагаемая работа посвящена исследованию зависимости МС алюминийсодержащих взрывчатых смесей от КБ ВВ, концентрации и размера частиц Al (включая nAl). На основе экспериментальных и расчетных данных проанализированы перспективы повышения МС за счет создания алюминизированных нанокompозитов. С целью обобщения материала в работе обсуждаются как новые, так и опубликованные ранее результаты.

Композиции содержали ВВ: 1 – тринитротолуол (ТНТ, –74%), 2 – ТНТ/гексоген = 50/50 (ТГ, –48%, гексоген – циклотриметилентринитрамин), 3 – циклотетраметилентетранитрамин (октоген, –21,6%), 4 – пентаэритриттетранитрат (ТЭН, –10,1%), 5 – тринитроэтиловый эфир тринитромасяной кислоты (ТНЭТБ, –4,1%), 6 – октоген/БТНЭН = 50/50 (ОКБ, –2,6%), 7 – динитрогуанидин (ДНГ, +5,4%), 8 – бис(тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН, +16,5%). ВВ расположены в порядке возрастания КБ, значения которого вместе с обозначениями ВВ приведены в скобках. Композиции содержали четыре вида Al, различающиеся размером частиц и активностью (содержанием несвязанного металла). Порошки Al(150), Al(15), Al(7) и Al(0,1) (в скобках указан размер частиц в микронах)

имели активность 99, 98, 98 и 87 % соответственно. Al(0,1) был получен конденсационным методом Гена-Миллера в ИНЭП ХФ РАН [5]. Механические смеси готовились длительным перемешиванием компонентов под слоем инертной жидкости в емкости на рольгангах. Размер частиц ВВ после приготовления композиций составлял 10–40 мкм. Заряды состояли из таблеток, полученных методом холодного прессования и имеющих плотность 94–98% от теоретически максимальной плотности. Относительная МС выражалась в процентах (единицах), а в качестве эталона рассматривался заряд октогена той же пористости, что и исследуемый образец. Расчеты проводились по разработанному ранее методу [6].

На рисунке 1 представлены данные по относительной МС для композиций на основе четырех ВВ с различным КБ (нумерация приведена выше). Из рисунка 1 следует, что результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Рисунок 1а иллюстрирует влияние содержания Al(7) на МС составов. Как следует из рисунка 1а, добавление Al(7) снижает МС ТНТ. Причиной этому служит невысокая степень окисления Al(7) при взаимодействии с ПД вещества, обедненного кислородом. Расчет предполагает оценку эффективной степени окисления Al. Так для состава ТНТ/Al(7) = 90/10 эта величина оказалась близкой к 0,3.

Тем не менее, использование Al(7) может привести и к повышению МС, что наблюдается на примере ВВ с более высоким КБ, чем КБ ТНТ (рисунок 1а). При увеличении содержания Al(7) сверх оптимального значения (10–15 %) МС снижается, так как степень окисления Al уже недостаточна для компенсации потерь, вызванных наличием конденсированной фазы.

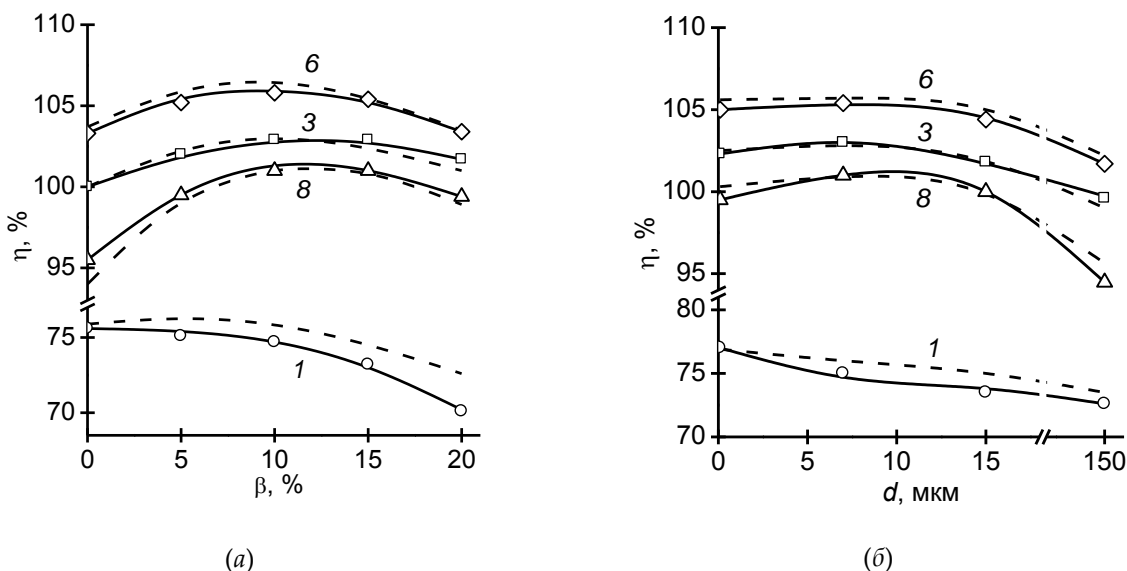


Рисунок 1. (а) – МС композиций в зависимости от содержания Al(7); (б) – МС композиций с 15% Al (10% Al для системы с ТНТ) в зависимости от размера частиц Al. Сплошные кривые с символами – эксперимент для механических смесей, штриховые кривые – расчет

Наиболее значительное повышение МС (на несколько единиц) получено в случае БТНЭН – ВВ с положительным КБ. По оценке, эффективная степень окисления Al(7) при его содержании 10% в смеси с БТНЭН с учетом экспериментального значения МС близка к 0,9. Однако в связи с невысокой МС самого БТНЭН смесь лишь незначительно превосходит октоген по МС. Наибольшей МС среди рассмотренных систем обладают составы на основе ОКБ – мощной композиции с КБ, близким к нулевому.

Рисунок 1б иллюстрирует зависимость МС от размера частиц Al. Из рисунка 1б следует, что в случае составов с БТНЭН при переходе от Al(7) к Al(0,1) МС несколько снижается. Полученный результат можно объяснить тем, что за характерные времена процесса происходит глубокое окисление Al(7) продуктами взрыва БТНЭН, и уменьшение размера частиц Al до 0,1 мкм не компенсирует потерь, обусловленных повышением начальной доли окисной пленки в порошке Al.

Аналогичный характер зависимости МС от размера частиц Al имеют и смеси на основе ОКБ и октогена. Однако в случае этих ВВ композиции с Al(7) и Al(0,1) с учетом ошибки эксперимента имеют одинаковые значения МС. Для составов на основе ТНТ зависимость имеет иной вид. Наибольшая величина МС композиции ТНТ/Al = 90/10 соответствует Al(0,1). Причина этого заключается в низкой степени окисления Al(7) при его взаимодействии с ПД ТНТ в рассматриваемом процессе. Наличие резерва в виде металла, не вступившего в реакцию, усиливает влияние размера частиц на степень окисления Al. При этом замена Al(7) на Al(0,1) приводит к повышению МС. Однако наблюдаемый прирост невелик: МС композиции с Al(0,1) всего на полторы единицы выше МС чистого ТНТ.

С увеличением размера частиц Al от 7 до 150 мкм МС композиций снижается. Наиболее существенное снижение наблюдается в случае БТНЭН, то есть ВВ с положительным КБ. Из расчета следует, что для композиций с БТНЭН степень окисления Al за характерные времена процесса существенно выше нуля и заметно различается для Al(15) и Al(150). В случае смесей на основе ТНТ при размере частиц алюминия 15 и 150 мкм значения МС отличаются незначительно. Расчет для композиций с ТНТ показал невысокую степень окисления как Al(150), так и Al(15).

Рассмотренные выше результаты соответствуют композициям, полученным обычным методом механического смешения. Создание алюминизированных нанокомпозитов представляет собой отдельную научно-техническую задачу. Метод распылительной сушки суспензии nAl в растворе ВВ для получения нанокомпозитов на основе октогена разработан в ИНЭП ХФ РАН [5]. Рисунок 2 иллюстрирует влияние КБ ВВ на приращение МС при добавлении 10% Al. Штриховая кривая соответствует разности значений МС, рассчитанных для нанокомпозитов, и экспериментальных величин, полученных для индивидуальных ВВ.

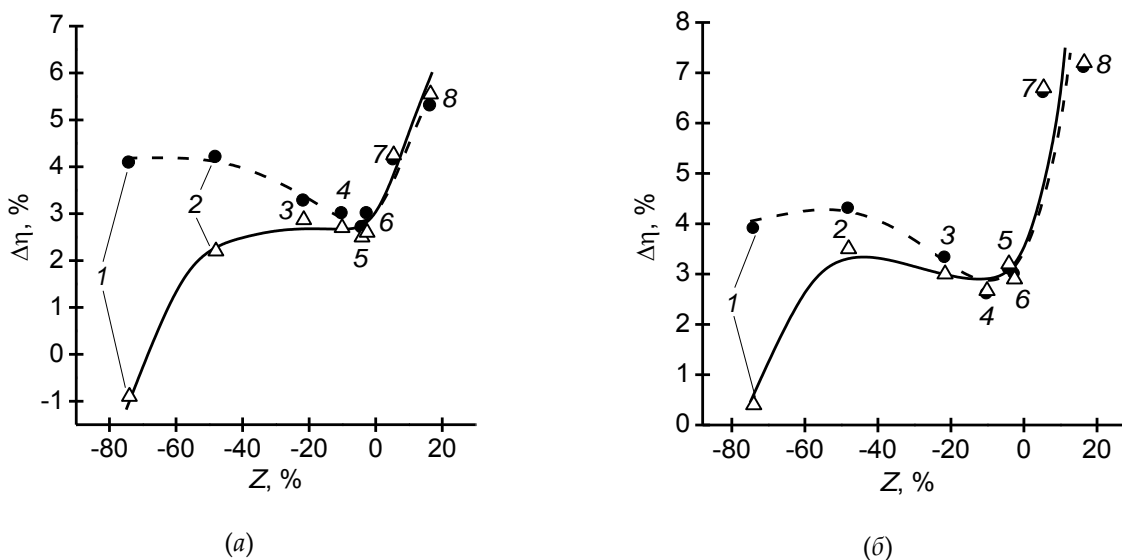


Рисунок 2. Величина приращения МС при добавлении 10% Al к ВВ в зависимости от КБ ВВ:

(а) – сплошная кривая, светлые символы – механические смеси с Al(7) (эксперимент); штриховая кривая, темные символы – нанокомпозиты; (б) – расчет

Как следует из формы сплошной кривой на рисунке 2а, для механических смесей с Al(7) величина приращения МС, в целом, повышается с увеличением КБ ВВ. Однако в некотором диапазоне изменения КБ этот рост замедляется. Аналогичная зависимость наблюдалась ранее при исследовании теплоты взрыва алюминизированных композиций [7]. Тогда полученные данные были интерпретированы с точки зрения различий тепловых эффектов взаимодействия Al с разными кислородсодержащими продуктами, концентрация которых зависит от элементного состава ВВ. Не исключено, что одной из причин появления «плато» на зависимости для приращения МС является отмеченное выше различие тепловых эффектов реакций Al с ПД.

Кривая для нанокompозитов в области низких КБ лежит выше зависимости, полученной для механических смесей с Al(7), что связано с усилением влияния структуры заряда на МС при снижении степени окисления Al. Из расчета следует, что преимущество по МС нанокompозита с ТНТ над чистым ТНТ может достигать четырех единиц. Однако даже нанокompозиты на основе ТНТ по МС заметно уступают октогену.

Форма расчетных кривых на рисунке 2б повторяет форму кривых на рисунке 2а. При повышении КБ ВВ сверх нулевого значения кривые устремляются вверх. Это происходит не только благодаря более полному окислению Al, но и за счет высокого теплового эффекта реакции Al со свободным кислородом. Нанокompозиты на основе ВВ с положительным КБ не обладают преимуществом по МС перед составами с Al(7). Причина заключается в том, что гомогенизация системы за счет создания нанокompозита становится малоэффективной в случае, когда за характерные времена процесса даже микроразмерный Al испытывает глубокое окисление.

Таким образом, результаты подтвердили возможность повышения МС ВВ за счет добавления порошкообразного Al. Из экспериментальных и расчетных данных следует, что создание алюминизированного нанокompозита целесообразно лишь в случае, когда взрывчатой основой состава служит ВВ с резко отрицательным КБ (ТНТ, триаминотринитробензол и т.п.). Известно, что именно такие ВВ представляют интерес как возможные компоненты энергетических материалов пониженного риска. Полученные данные могут быть использованы для совершенствования термодинамических программ расчета взрывчатых характеристик ВВ.

Список литературы

1. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко, 3-е изд., М.: Физматлит, 2002, том 1, 832с.
2. М. Н. Махов. Оценка метательной способности взрывчатых смесей ВВ с бором // Горение и взрыв, 2008, М.: Торус Пресс, № 1, с. 93-96.
3. М. Н. Махов. Теплота взрыва и метательная способность смесей взрывчатых веществ с титаном и гидридом титана // Горение и взрыв, 2015, том 8, № 2, с. 256-262.
4. V. Yu. Davydov, A. S. Gubin. Acceleration Ability of High Explosives and their mixtures with fuel additives // Rus. J. Phys. Chem. B, 2011, vol. 5, № 3, p. 491-498.
5. М. Ф. Гогуля, М. Н. Махов, М. А. Бражников, А. Ю. Долгобородов, В. И. Архипов, А. Н. Жигач, И. О. Лейпунский, М. Л. Кусков. Взрывчатые характеристики алюминизированных нанокompозитов на основе октогена // Физика горения и взрыва, 2008, том 44, № 2, с. 85-100.
6. M. N. Makhov, V. I. Arkhipov. Method for estimating the acceleration ability of aluminized high explosives // Rus. J. Phys. Chem. B, 2008, vol. 2, № 4, p. 602-608.
7. М. Н. Махов. Теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Хим. физика, 2000, том 19, № 9, с. 83-87.

INFLUENCE OF ALUMINUM ADDITIVES ON ACCELERATION ABILITY OF HIGH EXPLOSIVES

M.N. Makhov

Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia

The acceleration ability (AA) holds a special position among the characteristics of high explosive (HE), because the results of AA measurements allow one not only to determine the important parameter of HE efficiency but to study the process of expansion of detonation products (DP) as well. One of the most extensively used methods of AA investigation in our country is M-40 (analogue of M-60 and M-20) [1]. According to this method, a steel plate, 40 mm in diameter and 4 mm in thickness, is accelerated from the