

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ЗАТУХАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В РЕАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2020 г. А. Ю. Долгобородов^{1, 2, 3*}

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: aldol@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020;

после доработки 15.01.2020;

принята в печать 20.02.2020

Приведены результаты экспериментального исследования затухания ударных волн в смесях магния и алюминия с твердыми оксидами металлов при контактном подрыве зарядов ВВ. Обнаружено более быстрое затухание в реакционноспособных смесях по сравнению с однородными материалами близкой сжимаемости и инертными смесями, что связано с протеканием быстрых реакций компонентов за фронтом ударной волны с увеличением плотности и, соответственно, скоростей волн разгрузки.

Ключевые слова: ударная волна, затухание, термитные смеси.

DOI: 10.31857/S0207401X20080026

ВВЕДЕНИЕ

Детонация конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) приводит к образованию в окружающей среде ударных волн (УВ), вызывающих необратимые разрушения. Для защиты от воздействия УВ и продуктов взрыва используются защитные конструкции из различных материалов. Для определения эффективности использования тех или иных материалов необходима информация об их поведении при ударном нагружении, касающаяся закономерностей затухания УВ в различных по сжимаемости и структуре однородных, пористых или композиционных материалах. Наиболее подробно исследованы различные способы ослабления УВ на существенном удалении от зарядов ВВ (см., например, работы [1, 2]). Что касается затухания УВ в ближней зоне при контактном подрыве, то в большинстве экспериментальных работ по исследованию затухания использовались различные постановки экспериментов, которые определялись конкретными условиями применения тех или иных устройств. Использование таких данных для получения общих закономерностей довольно затруднительно, поскольку достаточно часто в экспериментах происходит неоднородное нагружение или взаимодействие с боковыми волнами разрежения [3, 4]. Результаты исследования затухания плоских ударных волн в условиях одномерного нагружения с помощью зарядов ВВ или удара пластины приведены в ряде работ (см., например,

работы [5–7]), однако данные получены в основном для сплошных материалов (металлов, горных пород и некоторых пластиков) без учета возможных физико-химических превращений веществ за фронтом УВ.

При ударном сжатии ряда веществ и смесей в них могут протекать различные физико-химические превращения, сопровождающиеся эффектами, полезными с точки зрения ослабления амплитуды УВ. Поскольку затухание сильных УВ при временных масштабах, характерных для контактного взрыва заряда ВВ, происходит в основном за счет разгрузки в тыльных и боковых волнах разрежения, то интересны прежде всего те виды превращений, которые приводят к аномальному увеличению плотности среды за ударным фронтом. Такие виды превращений приводят к увеличению скорости волн разрежения в таких материалах и, следовательно, к росту ослабления УВ по сравнению с другими материалами. Ранее нами были проведены исследования эффективности ослабления плоских ударных волн в органических, пористых и композиционных материалах при изменении плотности и содержания наполнителей и связующих [8–11]. Было показано, что в случае протекания в веществах полиморфных превращений с уменьшением удельного объема за фронтом УВ удается получить более высокие коэффициенты затухания по сравнению с веществами без превращений. В данной работе приведены результа-

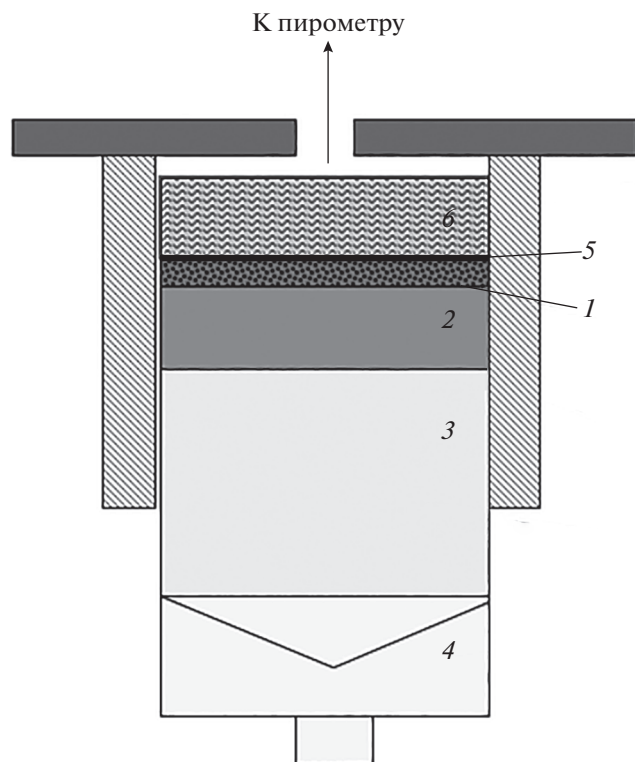


Рис. 1. Постановка экспериментов по определению затухания плоских ударных волн в различных образцах: 1 — образец, 2 — заряд октогена, 3 — заряд ТНТ, 4 — линза, 5 — алюминиевая фольга, 6 — индикатор.

ты исследования затухания плоских УВ в образцах термитных смесей на основе порошков магния с оксидами титана, кремния и железа (TiO_2 , SiO_2 , Fe_2O_3), а также порошка алюминия с Fe_2O_3 , реагирующих с образованием продуктов, имеющих меньший удельный объем, чем исходное вещество.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах исследовалось затухание плоских УВ с треугольным профилем давления с увеличением толщины образцов. Ударные волны создавались при контактном подрыве зарядов ВВ.

Смеси изготавливались путем механического перемешивания порошков Mg марок МПФ-1 (фрезерованные частицы неправильной формы со средним размером около 310 мкм) и МПФ-3 (130 мкм), порошка Al марки АСД-1 (50 мкм) и порошков химически чистых оксидов TiO_2 , SiO_2 и Fe_2O_3 . Средний размер частиц окислителей составлял 10–20 мкм. Образцы диаметром 40 мм и толщиной от 1 до 10 мм изготавливались методом холодного прессования.

Эксперименты проводились по схеме, аналогичной использованной ранее [10] (рис. 1).

Ударная волна в образце создавалась при детонации заряда мощного ВВ (МВВ) гексогена (плотность — 1.71 г/см³) или октогена (1.80 г/см³) диаметром 40 мм и высотой 10 мм. Для инициирования МВВ использовался заряд тринитротолуола (ТНТ) с пониженной плотностью в 1.35 г/см³ высотой 50 мм, который в свою очередь инициировался генератором плоского фронта (линза из смеси ТНТ/гексоген). Длительность сохранения повышенных параметров в ударно-сжатом образце задается высотой заряда МВВ. Спад параметров за фронтом детонационной волны в заряде МВВ вне зоны бокового разлета определяется центрированной волной разрежения от контактной границы между зарядами МВВ и ТНТ до тех пор, пока не достигаются состояния, связанные с параметрами детонации заряда ТНТ. Временной профиль массовой скорости за фронтом волны близок к треугольному, причем характерные длины области центрированной волны разрежения на конце заряда МВВ составляют около 1 мм. Такая постановка опытов позволяла создавать в исследуемых средах плоские ударные волны, эффективно затухающие на толщинах в несколько мм, и исключить влияние боковых волн разгрузки на начальной стадии затухания длительностью до 2–3 мкс, что позволяет сравнивать полученные данные по затуханию с простыми одномерными расчетами.

Величина давления, передаваемого через образцы, измерялась индикаторным методом [12] с использованием бромформа CHBr_3 или четыреххлористого углерода CCl_4 . Между образцами и индикатором помещалась алюминиевая фольга толщиной 20 мкм. Использование жидкого индикатора позволяет исключить влияние неоднородности нагружения на контактной границе с пористым образцом, которое возникает в случае использования датчиков давления из-за их разрушения на границе с пористым образцом. Свечение фронта УВ в индикаторной жидкости регистрировалось электронно-оптическим пирометром через диафрагму диаметром 5 мм, находящимся в центральной части образца, и пересчитывалось на яркостную температуру T . Величина давления P на фронте ударной волны в индикаторе определялась по известным зависимостям [12]: $T = 237 + 112 P$ для CHBr_3 и $T = 343 + 121 P$ для CCl_4 , где T — в К, P — в ГПа. Временное разрешение записи излучения составляло 20 нс, точность определения давления — 0.2–0.3 ГПа. В ряде опытов также измерялась яркостная температура продуктов ударно-индуцированной химической реакции. В этом случае вместо индикатора на контактную границу образца без фольги помещалось окно из фторида лития LiF, который сохраняет прозрачность при ударном сжатии в рассматриваемом диапазоне давлений.

Таблица 1. Экспериментальные данные по затуханию ударных волн в смесях

Смесь	Весовой состав	ρ_0 , г/см ³	ϵ , %	P_0 , ГПа	α , 10 ⁻¹ мм ⁻¹
Mg(МПФ-3)/SiO ₂	40/60	1.01	50	28.8*	1.71 ± 0.27
Mg(МПФ-1)/SiO ₂	40/60	1.28	40	32.5* (24.0)	1.56 ± 0.38 (0.93)
Mg(МПФ-3)/TiO ₂	32/68	2.05	30	31.2*	1.43 ± 0.39
Mg(МПФ-1)/TiO ₂	32/68	2.05	30	33.5* (29.6)	1.39 ± 0.20 (0.72)
Mg(МПФ-3)/Fe ₂ O ₃	69/31	1.96	10	23.4 (20.4)	1.01 ± 0.18 (0.72)
Mg(МПФ-1)/Fe ₂ O ₃	31/69	2.32	28	23.6 (18.9)	1.47 ± 0.34 (0.92)
Al(АСД-1)/Fe ₂ O ₃	35/65	2.79	30	22.8 (17.1)	1.40 ± 0.43 (0.70)
Al(АСД-1)/ПММА	50/50	1.15	30	22.7	0.82 ± 0.16
Al(АСД-1)/KI	50/50	2.02	30	20.6	0.86 ± 0.13
				26.0*	0.85 ± 0.25
Al(АСД-1)	100	1.89	30	21.4	0.83 ± 0.10

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные кривые спада давлений в индикаторе с увеличением толщины образцов x аппроксимировались экспоненциальной зависимостью давления от толщины образцов: $P(x) = P_0 \exp(-\alpha x)$, с минимизацией отклонений по методу наименьших квадратов, где P_0 — давление при нулевой толщине образца, α — коэффициент затухания. Величина P_0 определялась в опытах с образцами минимальной толщины (менее 2 мм) при высоте заряда гексогена или октогена 50 мм. Вид зависимости $P(x)$ определяется традиционными соображениями об экспоненциальном характере затухания, и, кроме того, экспериментальные данные описываются экспоненциальной зависимостью с наибольшим коэффициентом корреляции в пределах спада давления в индикаторе до $P = 0.5P_0$. Данные обработки экспериментальных данных для различных смесей представлены в табл. 1. В этой таблице приведены: тип порошка металла, весовой состав смеси, ρ_0 — плотность образцов, ϵ — пористость, α — коэффициент затухания с толщиной образцов, α_m — коэффициент затухания на удельную массу; звездочкой обозначены данные, полученные с индикатором СНВг₃, остальные — с ССл₄. Для сравнения здесь же приведены данные для смесей инертных компонентов Al с полиметилметакрилатом (ПММА) и йодистым калием KI, а также для пористого Al.

Следует отметить качественное различие характеров нарастания профилей давления в индикаторе для смесей инертных и реакционноспособных компонентов. На рис. 2 в качестве иллюстрации приведены примеры записей профилей давления в СНВг₃, переданных через образец реакционноспособной смеси Mg(МПФ-1)/TiO₂ толщиной 1.7 мм от заряда гексогена толщиной 10 мм и образец инертной сме-

си Al(АСД-1)/KI толщиной 1.5 мм от заряда гексогена толщиной 50 мм. В случае нагружения образцов при детонации удлиненного заряда для инертных смесей наблюдалось резкое нарастание давления (менее 20 нс) с последующим монотонным спадом (рис. 2, кривая 2), а в случае реагирующих смесей Mg получены профили с затянутым по времени (порядка 0.21 мкс) нарастанием давления (рис. 2, кривая 1). Для смеси Al/Fe₂O₃ нарастание давления менее выражено (50–100 нс).

Поскольку профили давления в опытах с длинными и короткими зарядами различались по характеру нарастания и спада, что могло быть связано с особенностями протекания реакции при быстром спаде давления в случае коротких зарядов, также для ряда смесей была проведена обработка дан-

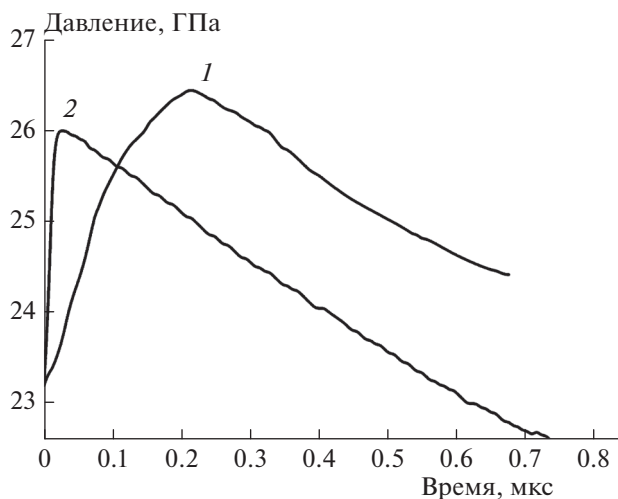


Рис. 2. Профили давления в индикаторе (СНВг₃), расположенном после образцов термитной смеси Mg/TiO₂ (1) и смеси инертных компонентов Al/KI (2).

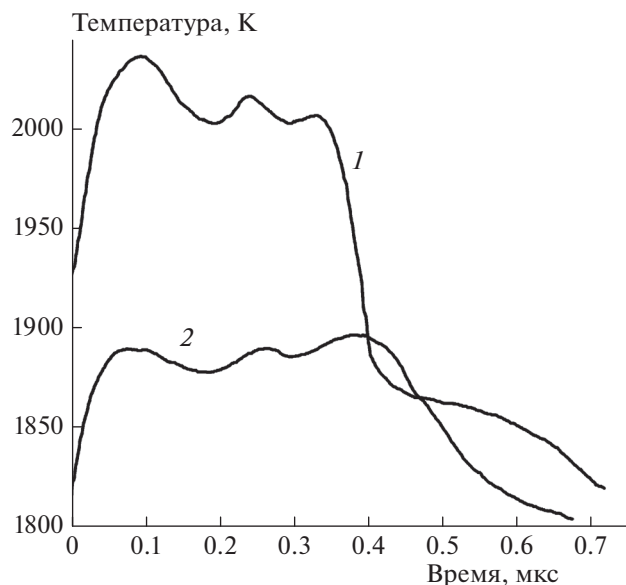


Рис. 3. Профили яркостной температуры ($\lambda = 627$ нм) на контактной границе с LiF для смесей Mg(MPF-3)/TiO₂ (1) и Mg(MPF-3)/Fe₂O₃ (2).

ных без учета значений P_0 , полученных в опытах с длинными зарядами. Эти значения приведены в табл. 1 в скобках.

Был проведен анализ возможных причин увеличения коэффициентов затухания в реагирующих смесях и инертных образцах. Если справедливо предположение, что в случае плоской УВ затухание в основном происходит за счет догоняющих волн разрежения [8], тогда для темпа затухания определяющим является соотношение $C/(C + u - D)$, где C — скорость звука за фронтом волны, u — массовая скорость, D — скорость ударной волны. Рассчитанные в предположении аддитивности удельных объемов компонентов ударные адиабаты не реагирующих смесей магния с окислами титана (при их массовом соотношении 32/68) и железа (31/69) при давлениях 20–40 ГПа на диаграммах давление — массовая скорость за фронтом близки к ударной адиабате алюминия. Однако затухание ударных волн в смесях происходит значительно быстрее, чем в чистом алюминии. Наиболее вероятной причиной более быстрого затухания ударных волн в смесях магния и алюминия с окислами является протекание химических реакций за фронтами волн с существенным уменьшением удельного объема, следствиями чего были бы значительное уменьшение скорости распространения волны D и увеличение массовой скорости u за фронтом при равных давлениях. Реакции компонентов смесей протекают с образованием более плотных продуктов по сравнению с исходными смесями: $2\text{Mg} + \text{TiO}_2 \rightarrow 2\text{MgO} + \text{Ti}$; $2\text{Mg} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{MgO} + \text{Si}$; $3\text{Mg} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{MgO} + 2\text{Fe}$; $2\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 +$

$+ 2\text{Fe}$. При стехиометрическом соотношении компонентов плотности исходных смесей в нормальных условиях составляют 2.75, 2.13, 3.20, 4.25 г/см³, а для продуктов реакции — 3.97, 3.25, 4.95, 5.42 г/см³ соответственно. Тепловой разогрев в результате реакции, различная сжимаемость компонентов, полиморфные переходы в титане и кремнии при больших давлениях несколько изменяют эти различия количественно, но дополнительное уменьшение удельного объема за фронтом волны сохраняется.

На основе полученных данных невозможно оценить глубину протекания реакции за времена ударного сжатия, однако дополнительным подтверждением наличия заметных химических превращений за ударными фронтами в рассматриваемых смесях являются результаты измерения температуры. В экспериментах на контактной границе образцов вместо индикатора помещали оптические окна из LiF. Ударная адиабата LiF в координатах P – u не сильно отличается от расчетных ударных адиабат смесей, поэтому можно считать, что регистрируемые температуры близки к температурам за ударным фронтом в смесях. Ударные волны в этих опытах создавались при ударе пластины из дюралюминия, предварительно разогнанной продуктами взрыва. Интенсивности волн были примерно такими же, как в опытах с удлиненными зарядами гексогена. Яркостные температуры контактных границ для смесей Mg/Fe₂O₃ и Mg/TiO₂ при пористости образцов около 10% были соответственно около 1900 и более 2000 К при давлениях в проходящей волне 27 и 26 ГПа. Эти значения заметно выше тех, которые можно получить в расчетах для не реагирующих смесей. Примеры записей профилей яркостной температуры на длине волны $\lambda = 627$ нм показаны на рис. 3.

Кроме химической реакции с образованием более плотных продуктов, на высокие значения коэффициентов затухания в термитных смесях влияет также высокая пористость образцов. Не исключено, что быстрое затухание волн в пористых образцах связано с более быстрым протеканием реакции при схлопывании пор и перемешивании компонентов при сжатии пористых смесей. С этой точки зрения следует ожидать более медленного затухания волн в малопористых образцах смесей, и их использование для ослабления ударных волн в конкретных условиях должно сопровождаться соответствующей экспериментальной проверкой.

Протекание химического превращения при ударном сжатии в общем случае определяется не только параметрами УВ на фронте, но и кинетикой протекания этого превращения и, соответственно, зависит от изменения давления во времени, которое задается высотой заряда перед образцом или толщиной ударяющей пластины. При близких значениях времени спада параметров и времени

превращения можно ожидать, что реализуемая в процессе скорость превращения и достигаемая степень превращения будут меньше при меньших временах спада давления за фронтом волны. По этой причине результаты опытов при одном и том же соотношении размеров образца и заряда, но при различных реальных размерах могут качественно различаться, хотя для нереагирующих сред они были бы подобны. Не исключено, что это является одной из причин различия значений коэффициентов затухания, полученных при обработке данных только с короткими зарядами и с учетом данных для длинных зарядов. Количественный учет этих особенностей требует специальных исследований кинетики протекания реакции при ударном сжатии термитных смесей с учетом реальной структуры образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат экспериментального исследования затухания ударных волн, образованных при контактном взрыве зарядов гексогена и октогена, в термитных смесях порошков магния с оксидами титана, кремния и железа, а также порошка алюминия с оксидом железа показали увеличение коэффициентов затухания УВ в этих смесях по сравнению со смесями нереагирующих компонентов. Также зарегистрированы повышенные яркостные температуры (на уровне 2000 К) ударно-сжатых смесей на контактной границе с прозрачным окном из LiF, что является доказательством протекания ударно-индуцированных реакций в смесях. Увеличение темпа затухания можно объяснить уменьшением удельного объема продуктов реак-

ции по сравнению с исходной смесью, что приводит к увеличению скоростей волн разрежения за ударным фронтом в более плотном веществе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Баротермическое действие взрывов. СПб.: Астерион, 2006.
2. Igra O., Falcovitz J., Houas L., Jourdan G. // Prog. Aerospace Sci. 2013. V. 58. P. 1.
3. Klee C., Kroh M., Ludwig D. // Shock Waves in Condensed Matter—1981 / AIP Conf. Proc. № 78 / Eds. Nellis W.J., Seaman L., Graham R.A. N.Y.: Amer. Inst. Physics, 1982. P. 486; <https://doi.org/10.1063/1.33311>
4. Chi L.Y., Zhang Z.-X., Aalberg A., Yang J., Li C.C. // Intern. J. Impact Eng. 2019. V. 125. P. 27.
5. Кондратьев В.Н., Немчинов И.В., Христофоров Б.Д. // ЖПМТФ. 1968. № 4. С. 61.
6. Nakazawa S., Watanabe S., Iijima Y., Kato M. // Icarus. 2002. V. 156. № 2. P. 539.
7. Murphy M.J., Lieber M.A., Biss M.M. // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1979. P. 160020.
8. Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю., Афанасенков А.Н. // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19. № 5. С. 135.
9. Воскобойников И.М., Долгобородов А.Ю. // Детонация и ударные волны. Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1986. С. 9.
10. Долгобородов А.Ю. // Хим. физика. 1998. Т. 17. № 5. С. 102.
11. Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A. // Intern. J. Impact Eng. 1999. V. 23. № 1. P. 283.
12. Гоголя М.Ф., Долгобородов А.Ю. // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 12. С. 118.