

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЯ С ПРОДУКТАМИ ДЕТОНАЦИИ

С. Д. Гилев, В. Ф. Анисичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gilev@hydro.nsc.ru

Для исследования взаимодействия алюминия с продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ использованы метод электропроводности и анализ сохранных продуктов взрыва. Электропроводность смесей октоген/Al, гексоген/Al неоднородна; непосредственно к фронту детонации примыкает область максимальной электропроводности, при удалении от фронта электропроводность уменьшается. При падении волны на стенку электрическое сопротивление смесевое взрывчатого вещества возрастает, что свидетельствует об исчезновении высокопроводящей зоны. Найдены электропроводность, сопротивление проводящей зоны, а также время роста сопротивления в зависимости от размера частиц добавки. Полученные результаты свидетельствуют о реакции металлической добавки с продуктами детонации в микросекундном диапазоне времен. Анализ конденсированных продуктов взрыва показал, что реакция алюминия с продуктами детонации протекает на поверхности частиц. Получены оценки количества прореагировавшего алюминия и толщины оксидного слоя.

Ключевые слова: конденсированные взрывчатые вещества, металлическая добавка, металлизированные взрывчатые вещества, алюминий, химическая реакция, окисление, электропроводность.

ВВЕДЕНИЕ

Конденсированные взрывчатые вещества (ВВ) с металлической добавкой являются важным классом взрывчатых материалов. Интерес к таким составам обусловлен возможностью увеличения метательного действия ВВ. С точки зрения фундаментальной науки смеси ВВ/металл интересны как пример неидеальной детонации. Для подобных составов взаимодействие между компонентами может продолжаться в фазе сильного расширения продуктов. Поэтому необходимо определение механизма и времени взаимодействия металлической добавки с продуктами детонации.

В настоящее время существуют разные точки зрения на данную проблему (см. [1–16] и библиографию в них). Большинство исследователей считает, что добавка реагирует в фазе сильного расширения продуктов детонации. Подтверждением этой точки зрения является положительный эффект использования смеси в экспериментах по метанию пластин. Улучшение метательных свойств смесевых составов отмечается при большом времени наблюдения, по крайней мере спустя несколько

микросекунд после прохождения детонационного фронта [3, 4]. В то же время, поскольку свидетельства о реакции носят косвенный характер, не ясна природа этого явления. Возможно, к примеру, что алюминий выступает в роли катализатора или меняет ход реакции.

Существует и противоположная точка зрения, согласно которой алюминий реагирует (по крайней мере, частично) в зоне химической реакции ВВ. Непосредственное увеличение скорости или давления детонации отмечается лишь в небольшом числе работ [5, 13, 15]. Как правило, добавка металла вызывает снижение основных детонационных параметров. Для целей анализа проводится сопоставление опытных данных с результатами расчетов параметров смеси в предположении различного механизма влияния добавки. Возможности такого подхода ограничены в силу слабого влияния реакции добавки на измеряемые параметры и неоднозначности теоретического описания состояния продуктов детонации. Неудивительно поэтому, что оценки степени окисления металла в зоне химической реакции ВВ дали существенно различающиеся значения: 0 [11], 3 ÷ 15 % [7], 40 % [9], 70 % [10].

В настоящее время основными экспериментальными методами исследования смесей ВВ/металл являются измерения скоростей ме-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-03-33175).

таемой пластины и детонации, профилей давления, массовой скорости и температуры. Зависимость этих параметров от химической реакции с участием добавки слабая, поэтому установить ее характеристики довольно трудно. Невозможность прямого наблюдения за процессом окисления металлической добавки не позволяет в настоящее время дать однозначный ответ о ее роли в смесевых составах.

Возможным подходом к решению проблемы является нахождение физических параметров, чувствительных к возникновению реакции металла. Одним из таких параметров может быть электропроводность. Электропроводность смеси ВВ/металл — характеристика интегральная, зависящая от содержания и электрических свойств отдельных компонентов (продукты детонации, металл). Изменение электропроводности состава со временем может дать информацию о динамике реакции металла.

Электрофизические характеристики смесей ВВ/металл исследовались в работах [17–19]. С помощью МГД-метода в [17] найдено электросопротивление продуктов детонации при различном содержании металла. Метод электропроводности использовался в [18], где регистрировалась средняя электропроводность состава гексоген/Al на довольно большой базе (3 мм). Для заданной геометрии эксперимента найдено характерное время падения электропроводности. Оказалось, что при увеличении содержания металла до 50 % растут электропроводность (до $8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и характерное время ее спада (до 13 мкс). Такое поведение объяснено автором [18] термоэмиссией электронов из металла. Проблема измерения высокой детонационной проводимости обсуждалась в [19]. Электрическая схема высокого временного разрешения [19] позволила обнаружить сложную структуру электропроводности при детонации смесей ВВ/металл. Возможным объяснением неоднородности проводимости в детонационной волне является физико-химическое взаимодействие металлической добавки с продуктами детонации. Обоснованность этого предположения ограничена возможностями экспериментальной техники. Для подтверждения высказанного предположения необходимы экспериментальные исследования. Параметры взаимодействия должны зависеть от таких характеристик, как размер, форма и тип частиц, содержание добавки, режим дето-

нации и т. д.

Целью настоящей работы является исследование взаимодействия металлической добавки с продуктами детонации. В качестве основного метода диагностики используется метод электропроводности. В дополнение к этой методике используется анализ сохраненных продуктов взрыва.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование метода электропроводности основывается на следующих соображениях. Смесь ВВ/металл первоначально является непроводником (ВВ — материал непроводящий, на поверхности металла, например, алюминия, имеется оксидная пленка). Электропроводность продуктов взрыва большинства ВВ лежит в диапазоне $0.1 \div 30 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [20–26]. Деформация металлических частиц в ударной волне приводит к разрушению оксидных пленок и появлению высокой макроскопической проводимости среды [27]. Поэтому при детонации смеси ВВ/металл в продуктах детонации возникает хорошая проводимость. Если в дальнейшем металл вступает в химическое взаимодействие с продуктами детонации и окисляется, то макроскопическая проводимость смеси должна уменьшаться.

Использовались три основные схемы измерений. Они отличаются расположением шунта, токоподводов и исследуемого вещества.

В *первой схеме* (рис. 1, а) плоская иницирующая ударная волна выходит из верхней диэлектрической пластины и через тонкую металлическую фольгу входит в исследуемое вещество. Далее располагается диэлектрик. Фольга служит электрическим шунтом и изготавливается из константана (электросопротивление константана меняется слабо при сжатии). Давление иницирующей ударной волны выбирается больше давления Чепмена — Жуге исследуемого ВВ, поэтому детонация ВВ начинается без существенной задержки. К шунту присоединены электроды, к которым подключен осциллограф. Измерительная ячейка включена в цепь, содержащую конденсатор и индуктивность. Измерения проводятся в максимуме тока, во время измерений ток практически постоянен. В момент входа волны в исследуемое ВВ появляется проводящий слой, ток перераспределяется между шунтом и ВВ. Этот процесс носит характер электромагнитной диффузии тока из шунта в нарастающую проводя-

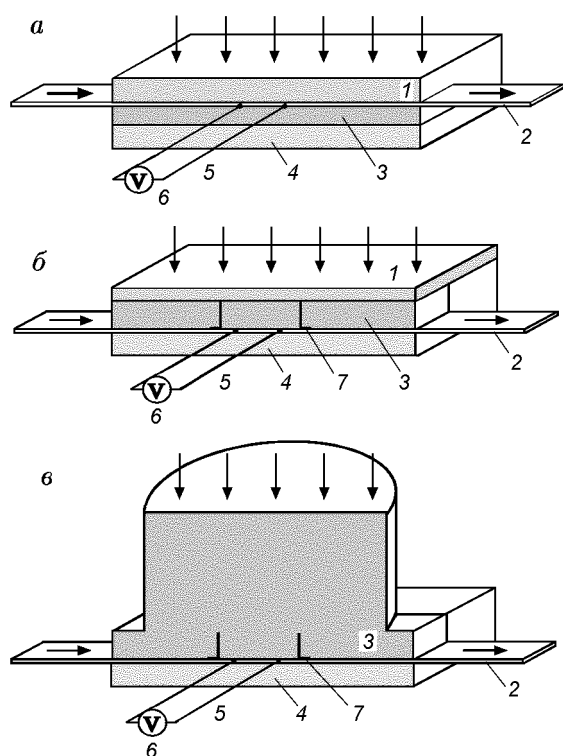


Рис. 1. Измерительные ячейки трех типов для исследования электропроводности смесевых составов ВВ/Al:

1 — диэлектрическая пластина, 2 — тонкая металлическая фольга (электрический шунт), 3 — исследуемая смесь, 4 — диэлектрик, 5 — электроды, 6 — осциллограф, 7 — токоподводы

щую область продуктов детонации. Схема подробно обсуждалась в [19].

Запись напряжения, полученная в такой измерительной схеме, показана на рис. 2, а. Момент А соответствует выходу ударной волны из верхней металлической пластины (на рис. 1, а не показана) в диэлектрик. На временном интервале АВ регистрируется сигнал, связанный с движением металлической пластины в магнитном поле шунта. В момент В ударная волна входит в исследуемое вещество, в нем возникает проводимость и регистрируемое напряжение падает. В момент С выхода волны на диэлектрическую стенку напряжение начинает расти. Последующее падение напряжения на больших временах связано с разрушением ячейки. На рис. 2, а показан результат обработки данных в переменных ($V_0/V - 1, t$), где V_0 — начальное напряжение. Если электропроводность вещества однородна, то такая обработка дает прямую линию, наклон которой

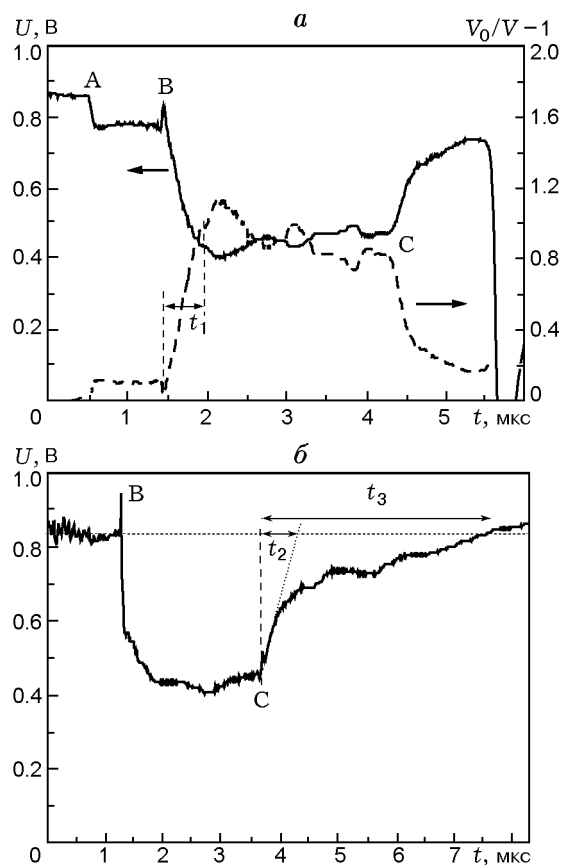


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы, полученные с использованием разных измерительных ячеек (смесь октоген/Al 60/40):

а — ячейка первого типа, опыт № 847, штриховая линия — результаты обработки записи в переменных ($V_0/V - 1, t$), б — ячейка второго типа, опыт № 875; моменты времени: А — входение ударной волны в верхнюю диэлектрическую пластину, В — приход ударной волны на электроды, С — приход детонационной волны на диэлектрическую стенку

определяет электропроводность [19]. Из результатов обработки видно, что в течение времени t_1 электропроводность примерно постоянна.

Во второй схеме (рис. 1, б) шунт располагается в нижней части взрывчатого вещества. Иницирующая ударная волна входит в смесевое ВВ из верхней пластины. Детонация распространяется вдоль токоподводов (медная фольга толщиной 50 мкм, длина $12 \div 20$ мм, ширина 20 мм), подключенных к константовой фольге. Регистрируется напряжение на электродах, соединенных с фольгой. Схема регистрирует электрические параметры при выходе детонационной волны на диэлектрическую стенку.

Пример экспериментальной записи напря-

жения дан на рис. 2,б. В момент В выхода волны в исследуемое вещество напряжение резко падает. Это падение напряжения более резкое, чем на рис. 2,а. Такое поведение связано с особенностями измерительной схемы и обусловлено, в частности, несколько меньшей длиной токоподводов по сравнению с толщиной образца, а также влиянием индуктивности цепи, включающей токоподводы и проводящий слой вещества. Далее по мере движения волны напряжение меняется слабо. В момент С выхода волны на стенку напряжение начинает расти, вначале быстро, затем медленнее, как видно из рис. 2,а,б. Записи можно описать двумя временами t_2 , t_3 , характеризующими темп роста напряжения после выхода волны на стенку. Определение времен поясняет рис. 2,б. Регистрируемое напряжение постепенно приближается к начальному уровню. Если оно не достигает начального уровня, то экспериментальная зависимость аппроксимируется в область больших времен прямой линией.

Третья схема (рис. 1,в) отличается от второй отсутствием верхней диэлектрической пластины. Вместо нее сверху располагается заряд исследуемой смеси в виде цилиндра (диаметр 64 мм, длина ≈ 200 мм), в котором возбуждается плоская детонационная волна. К шунту, располагающемуся на диэлектрической стенке, присоединены вертикальные токоподводы (медная фольга). Детонация распространяется сверху вниз. Осциллограммы напряжения для опытов в такой постановке подобны записям для второй схемы (рис. 2,б).

Использованные схемы отличаются своими возможностями, дополняя друг друга. Первая схема имеет наилучшее временное разрешение (≈ 30 нс). Ее недостатком является влияние на регистрируемое напряжение процесса перехода ударной волны в детонационную. Для уменьшения этого влияния используется режим пересжатой детонации. Во второй схеме толщина исследуемого образца значительна и процесс перехода ударной волны в детонационную не сказывается на регистрируемом сигнале, но волна также является пересжатой. В третьей схеме детонация нормальная, однако возможно влияние стенки на газодинамику разлета. В целом, данные, получаемые с использованием разных схем, оказались близки. Выявленные расхождения связаны со спецификой и ограничениями схем.

Рассматривая цепь, состоящую из вклю-

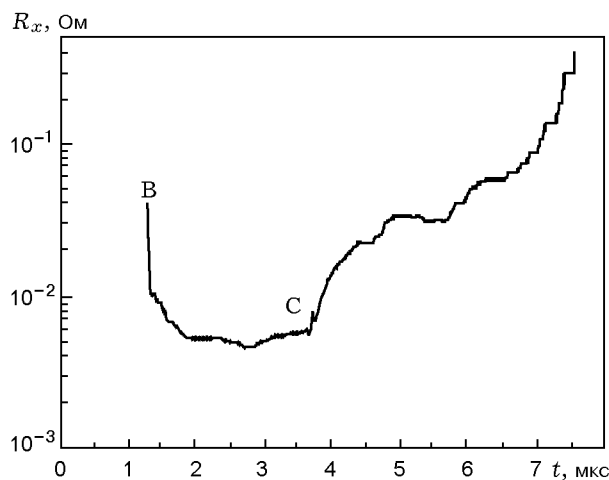


Рис. 3. Сопротивление смеси в опыте № 875

ченных параллельно сопротивлению шунта R_s и неизвестного сопротивления R_x , можно найти неизвестное сопротивление смеси $R_x = R_s / (V_0/V - 1)$. На рис. 3 показано сопротивление R_x , определенное в опыте № 875 (см. рис. 2,б). Сопротивление соответствует длине образца 1 см. Временные зависимости сопротивления для разных схем измерений качественно подобны. В момент прихода волны на электроды (момент В) сопротивление быстро падает. Такой характер зависимости свидетельствует о возникновении хорошо проводящей зоны. Регистрируемое сопротивление изменяется относительно слабо вплоть до выхода волны на диэлектрическую стенку (момент С). Далее сопротивление резко растет. Такое изменение сопротивления означает, что возникшая электропроводность неоднородна по толщине и сосредоточена главным образом в области, примыкающей к фронту волны. Движение детонационной волны приводит к переносу высокопроводящей зоны. При выходе детонации на стенку высокопроводящая область исчезает.

Сравним поведение электропроводности для смеси ВВ/металл и металлического порошка, сжимаемого ударной волной. В экспериментах с металлическим порошком [27] регистрируемое напряжение монотонно уменьшалось при движении ударной волны по порошку. После падения волны на стенку напряжение менялось слабо. Обработка записей привела к выводу о том, что электропроводность порошка за фронтом ударной волны однородна. Таким образом, пространственные распределе-

Таблица 1

Схема	Номер опыта	a , мкм	σ_1 , $10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	R_x , мОм	t_1 , мкс	t_2 , мкс	t_3 , мкс
1	752	$\approx 60^*$	1.6	2	0.42	—	≈ 2.1
	847	$\approx 60^*$	1.4	3.2	0.39	0.58	1.9
	848	$32 \div 40$	2.6	—	0.46	—	—
	849	$100 \div 150$	1.1	4	0.26	—	0.86
	852	$20 \div 32$	3.3	1.5	0.30	≈ 1.25	—
	874	$32 \div 40$	2.4	1.9	0.41	0.74	3.8
	920	$20 \div 32$	2.5	1.7	0.33	0.8	5.5
2	875	$32 \div 40$	—	2.85	—	0.7	4.1
	879	$100 \div 160$	—	4.7	—	0.61	0.87
	880	$50 \div 75$	—	3.9	—	0.94	1.6
	887	$20 \div 32$	—	3.2	—	0.6	2.9
	888	$40 \div 50$	—	2.8	—	—	3.0
	893	$100 \div 160$	—	4.8	—	0.55	1.85
	894	$75 \div 100$	—	5.2	—	0.7	1.3
	921	$100 \div 160$	—	4.5	—	0.46	0.88
3	912	$40 \div 50$	—	4.8	—	1.7	—
	919	$40 \div 50$	—	3.5	—	1.6	—
	923	$40 \div 50$	—	4.6	—	—	3.1

Примечание. *Средний размер частиц полидисперсного порошка ПА-4, использованного в опыте.

ния электропроводности для смеси ВВ/металл и металлического порошка существенно различаются, что можно объяснить взаимодействием компонентов смесового состава.

В табл. 1 представлены результаты проведенных экспериментов. Здесь дана информация об использованной схеме измерений, размере a частиц добавки (получена просеиванием полидисперсного порошка алюминия марки ПА-4), электропроводности на начальной фазе детонации σ_1 и соответствующем времени t_1 , сопротивлении вещества на участке слабого изменения напряжения R_x , временах t_2 и t_3 . Для первой и второй схем использовалась смесь октоген/Al 60/40 (плотность $\approx 1.4 \text{ г/см}^3$), для третьей — гексоген/Al 60/40 (плотность $\approx 1.3 \text{ г/см}^3$). Нагружение образца в первой и второй схемах обычно осуществлялось от литого заряда тротил/гексоген 50/50 диаметром 75 мм. Между зарядом и диэлектрической пластиной располагалась медная пластина толщи-

ной ≈ 6 мм. Шунтом служила константановая фольга (100 мкм) шириной 20 мм. Высота образца исследуемого ВВ в измерительной ячейке составляла 20 мм. Расстояние между измерительными электродами было ≈ 6 мм.

Погрешности определения величин из полученных записей напряжения составляют: электропроводности σ_1 — 20 %, времени — 10 %, сопротивления R_x — 15 %. Вместе с тем разброс представленных в таблице данных весьма значителен. По-видимому, это связано с сильной гетерогенностью исследуемой среды. Размер локальных неоднородностей достигает нескольких десятых миллиметра (определяется размером частиц штатного ВВ). Это больше, чем толщина токоведущих частей и электродов. Поэтому локальные неоднородности могут приводить к разбросу регистрируемых параметров. Более того, измерительные проводники могут испытывать неконтролируемую деформацию и, по-видимому, даже разрушаться.

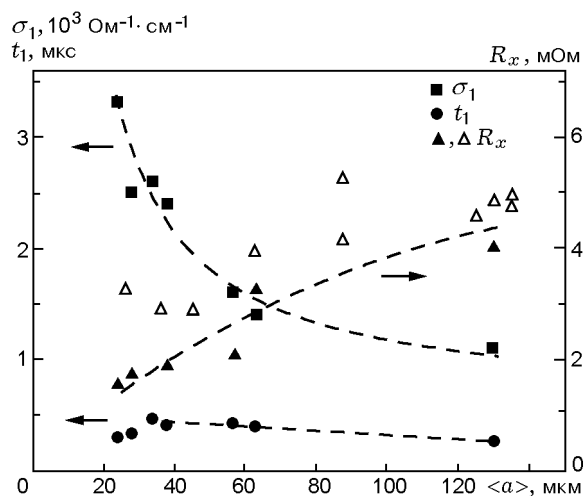


Рис. 4. Зависимости электропроводности на начальной фазе детонации, времени t_1 и сопротивления проводящего слоя от среднего размера частиц добавки (смесь октоген/Al 60/40):

темные значки соответствуют первой схеме измерений, светлые — второй схеме

По этой причине при анализе данных следует говорить лишь о средних значениях регистрируемых параметров.

На рис. 4 показаны зависимости электропроводности σ_1 , времени t_1 и сопротивления R_x от среднего размера частиц $\langle a \rangle$. Как видно из рисунка, точки, соответствующие первой схеме измерений, располагаются в среднем выше, чем соответствующие второй схеме. Это связано с тем, что данные, получаемые при использовании второй схемы, чувствительны к сопротивлению контакта шунт — токоподвод. Уменьшение сопротивления в опытах по второй схеме на 1 мОм приводит к неплохому соответствию с результатами измерений по первой схеме.

Как видно из рис. 4, при увеличении размера частиц электропроводность σ_1 падает, а сопротивление R_x растет. Для не взаимодействующих двухкомпонентных сред макроскопическая электропроводность не зависит от размера частиц и определяется лишь относительным объемом фаз [28]. Существование такой зависимости свидетельствует о взаимодействии между компонентами.

На рис. 5 показана зависимость времени роста напряжения t_3 от среднего размера частиц $\langle a \rangle$. Несмотря на значительный разброс отчетливо просматривается тенденция уменьшения времени роста напряжения с увеличе-

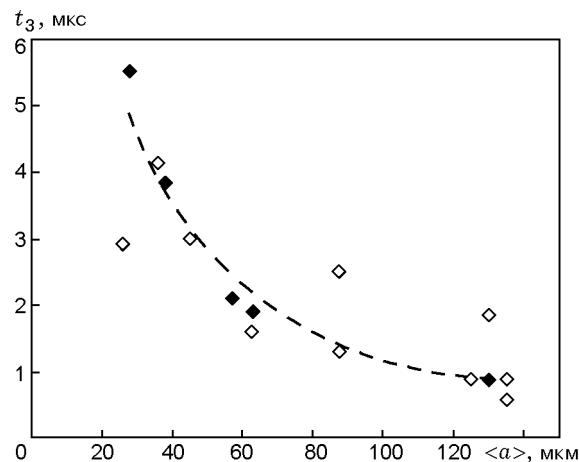


Рис. 5. Зависимости времени роста напряжения t_3 от среднего размера частиц (смесь октоген/Al 60/40):

темные значки соответствуют первой схеме измерений, светлые — второй схеме

нием размера частиц. Это означает, что при использовании в качестве добавки более крупных частиц потеря макроскопической проводимости происходит быстрее.

Полученные данные можно объяснить следующим образом. Регистрируемая электропроводность является макроскопическим параметром, на величину которого влияют свойства компонентов состава. Характерные электропроводности компонентов смесового состава: алюминий — $\sigma \approx 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, продукты детонации октогена — $\sigma \approx 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Возникновение на поверхности металлических частиц оксидного слоя, обладающего плохой проводимостью, приводит к резкому росту макроскопического сопротивления. Поэтому для крупных частиц (обладающих меньшей поверхностью) ухудшить макроскопическую проводимость проще и на это требуется меньше времени. Таким образом, зависимости максимальной электропроводности σ_1 , сопротивления проводящего слоя R_x (см. рис. 4) и времени роста напряжения t_3 (см. рис. 5) от среднего размера частиц $\langle a \rangle$ согласованно указывают на взаимодействие металлической добавки с продуктами детонации.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАНЕННЫХ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

В серии опытов с алюмосодержащими ВВ ставилась задача обнаружения продуктов ре-

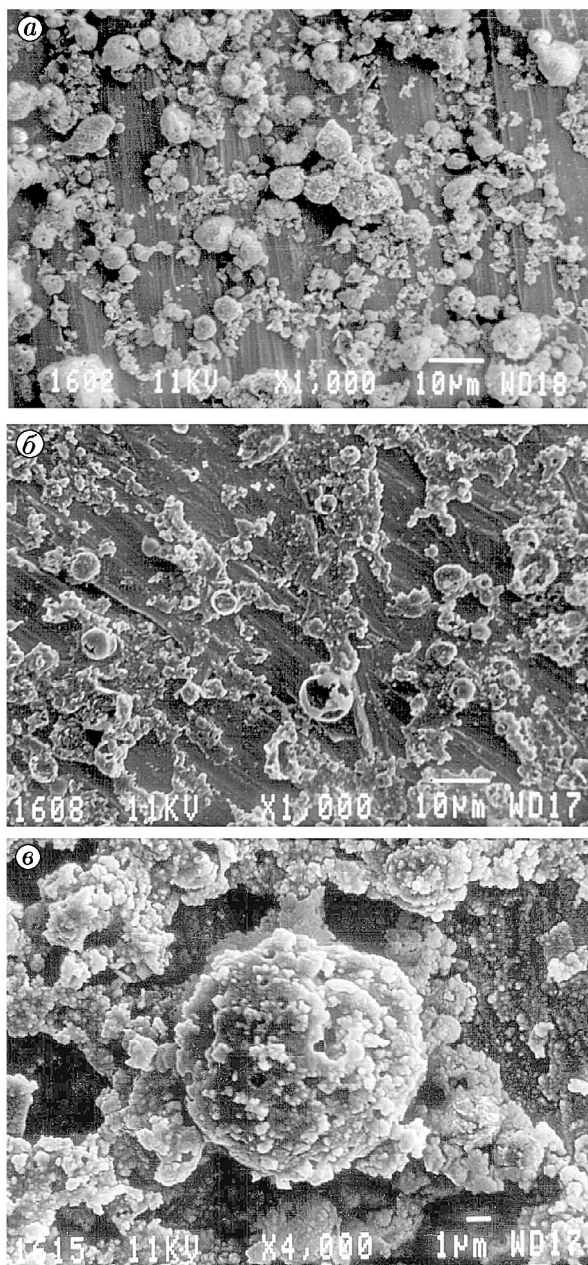


Рис. 6. Микрофотографии сохраненных продуктов взрыва смесей ВВ/Al:

a — опыт A19, октоген/Al 90/10 (плотность 1.46 г/см^3 , размер частиц добавки $\approx 10 \text{ мкм}$, масса заряда 647 г), *б* — опыт A25, октоген/тротил/Al 60/30/10 (плотность 1.74 г/см^3 , размер частиц добавки $\approx 10 \text{ мкм}$, масса заряда 103 г), *в* — опыт A23, октоген/тротил/Al 50/30/20 (плотность 1.78 г/см^3 , размер частиц добавки $\approx 10 \text{ мкм}$, масса заряда 546 г)

акции алюминия. Для этого исследовались конденсированные продукты взрыва смесей октоген/Al, октоген/тротил/Al. Частицы имели различную форму (сферы, чешуйки), их размер изменялся от субмикронного до нескольких десятков микрометров. Эксперименты проводились в следующей постановке. Смесевой заряд ВВ/Al помещался в герметичную взрывную камеру. Перед подрывом камера прокачивалась, а затем заполнялась азотом (давление $2 \div 3 \text{ атм}$). После подрыва газообразные продукты реакции удалялись, а твердые остатки (шихта) собирались со стенок камеры. Шихта подвергалась действию сильных кислот (хлорная кислота, смесь азотной и серной кислот), которые растворяют алюминий и большую часть твердого остатка. Ожидалось, что нерастворенными останутся наиболее стойкие вещества, такие как оксиды алюминия и углерод в алмазной фазе. Результат травления твердого остатка продуктов исследовался на электронном микроскопе. На рис. 6 показаны микрофотографии сохраненных продуктов для трех опытов.

В большей части опытов исходные частицы алюминия имели правильную сферическую форму. На фотографиях видны частицы почти сферической формы (рис. 6, *a*), размеры которых примерно соответствуют исходным частицам. Естественно их отождествить с результатом реакции алюминия с продуктами детонации — оксидами алюминия. На снимках видны также многочисленные следы других частиц — предположительно ультрадисперсного алмаза. Визуальный анализ показывает, что сферические частицы пустотелые (рис. 6, *б*) и имеют сложный рельеф поверхности, поры и неоднородности (рис. 6, *в*). Это означает, что стойкие к воздействию кислот химические соединения образовались лишь на поверхности частиц. Внутренняя часть частиц алюминия не участвовала в реакции и была растворена в ходе химической обработки. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что реакция окисления алюминия происходит на поверхности частиц и протекает неоднородно по поверхности.

При помощи термогравиметрического метода сжиганием сохраненных продуктов реакции в потоке кислорода на дериватографе найдено количество ультрадисперсного алмаза. Предполагая, что остальные продукты являются оксидами алюминия, можно оценить их количество. Результаты подобных эксперимен-

Таблица 2

Номер опыта	ВВ	ρ , г/см ³	a , мкм	M , г	m_d , г	m_{ox}/M	m_{ox}/m_0	δ , мкм
A21	Октоген/тротил/Al 60/30/10	1.73	≈ 10	546	4.4	0.03	0.16	0.27
A23	Октоген/тротил/Al 50/30/20	1.78	≈ 10	546	1.26	0.036	0.1	0.16
A24	Октоген/тротил/Al 46.7/28/25.3	1.81	≈ 10	587	3.2	0.034	0.07	0.12
A27	Октоген/тротил/Al 60/30/10	1.81	< 1	109	4.06	0.080	0.42	0.07
A28*	Октоген/тротил/Al 60/30/10	1.67	—	109	0.88	0.056	0.30	—
A32*	Октоген/тротил/Al 60/35/5	1.68	—	652	—	0.04	0.42	—

Примечание. *Частицы алюминия представляли собой чешуйки (размер ≈ 20 мкм, толщина ≈ 1 мкм).

тов сведены в табл. 2. Здесь дана информация о составе смеси, ее плотности ρ , характерном размере частиц добавки a , массе заряда M , массе алмазной фазы m_d , относительной массе оксида m_{ox}/M и доле прореагировавшего алюминия m_{ox}/m_0 (m_0 — масса алюминия в заряде ВВ).

Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Количество образовавшегося оксида зависит от состава смеси, размера и формы частиц. В проведенных экспериментах окислялось до $\approx 40\%$ алюминия, находившегося в заряде. Отметим, что исходные порошки согласно техническим условиям имели пренебрежимо малое содержание оксида алюминия (обычно не более долей процента).

2. Сравнение результатов опытов A21 и A27 показывает, что уменьшение размера частиц алюминия приводит к увеличению доли прореагировавшего алюминия. Это означает, что увеличение поверхности соприкосновения алюминия с продуктами детонации приводит к более полной реакции.

3. Сравнение результатов опытов A21, A23, A24 показывает, что увеличение содержания алюминия в составе приводит к уменьшению относительного выхода оксида. В то же время выход оксида по отношению к чистой массе заряда несколько растет.

Основываясь на экспериментальных дан-

ных о массе оксида m_{ox} , можно оценить ряд важных характеристик. Используя значение теплоты образования Al_2O_3 16.4 кДж/г [29], находим, что тепловой эффект добавки в проведенных опытах составлял $5 \div 14\%$ от энергии ВВ. Толщина поверхностного слоя оксида на частице радиусом R равна $\delta \approx m_{ox}R/3m_0$. Для опытов с частицами сферической формы результат оценок показан в табл. 2. Как видно из таблицы, толщина слоя δ порядка долей микрометра.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Характер полученных записей напряжения позволяет сделать вывод о сложной структуре детонационной проводимости в составах ВВ/металл. Непосредственно к детонационному фронту примыкает область высокой проводимости. Этот вывод подтверждают данные [19]. Использование различных схем регистрации и разных составов повышает надежность данного заключения.

Полученные данные согласованно свидетельствуют о реакции металлической добавки с продуктами детонации в микросекундном диапазоне времен. Как следует из экспериментов по проводимости, взаимодействие между добавкой и продуктами детонации заметно уже через ≈ 100 нс, а за время ≈ 1 мкс образующийся плохопроводящий слой почти полностью бло-

кирует протекание тока. Образование тонкого оксидного слоя приводит к существенному падению электропроводности. В силу неопределенности состояния поверхностного слоя и его электрических свойств в настоящее время не удастся в реальном времени найти количество образующегося оксида. Вместе с тем электропроводность и характерное время ее изменения несут информацию об интенсивности взаимодействия. Данную технику можно рассматривать как относительный метод. Сравнение регистрируемой электропроводности и характерного времени изменения проводимости дает объективную основу для количественного сопоставления смесей.

Использование альтернативного метода (исследование сохраненных продуктов детонации) качественно подтверждает трактовку данных электрических измерений. Реакция алюминия с продуктами детонации протекает на поверхности частицы в тонком поверхностном слое, где образуется химически устойчивое соединение (предположительно оксид). При этом внутренняя часть частицы не взаимодействует с продуктами детонации. Полученные оценки количества прореагировавшего алюминия и толщины оксидного слоя характеризуют степень взаимодействия. Толщина поверхностного слоя мала. Образующийся слой в основном блокирует поступление кислорода к внутренним слоям алюминиевой частицы; большая часть металлической добавки в реакции не участвует и служит инертным балластом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дремин А. Н., Похил П. Ф., Арифов М. И.** Влияние алюминия на параметры детонации тротила // Докл. АН СССР. 1960. Т. 131, № 5. С. 1140–1142.
2. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Расчет параметров детонационной волны смесей взрывчатых веществ с инертными добавками // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 2. С. 182–186.
3. **Finger M., Hornig H. C., Lee E. L., Kury J. W.** Metal acceleration by composite explosives // 5th Symp. (Intern.) on Detonation. 1970. P. 137–152.
4. **Bjarnholt G.** Effect of aluminum and lithium flouride admixtures on metal acceleration ability of com B // 6th Symp. (Intern.) on Detonation. 1976. P. 510–520.
5. **Goldstein S., Johnson J. N.** Aquarium tests on aluminized ANFO // 7th Symp. (Intern.) on Detonation, Annapolis. 1981. P. 1016–1023.
6. **Анискин А. И.** Детонация взрывчатых веществ с алюминием // Детонация и ударные волны. Черногловка, 1986. С. 26–32.
7. **Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Феодоритов И. И.** Экспериментально-теоретическое исследование окисления алюминия в детонационной волне // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 124–128.
8. **Гришкин А. М., Дубнов Л. В., Давыдов В. Ю. и др.** Влияние добавок порошкообразного алюминия на параметры детонации мощных ВВ // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 115–117.
9. **Hobbs M. L., Baer M. R.** Calibrating the BKW-EOS with a large product species data base and measured C–J properties // 10th Symp. (Intern.) on Detonation, Boston. ONR 33395-12. 1993. P. 409.
10. **Cowperthwaite M.** Nonideal detonation in a composite CHNO explosive containing aluminum // Ibid. P. 656–664.
11. **Имховик Н. А., Соловьев В. С.** Окисление дисперсного алюминия в продуктах детонации конденсированных ВВ // Proc. 21th Intern. Pyrotechnics Sem. M.: IChP RAS, 1995. P. 316–331.
12. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., Baudin G.** Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurements) // Proc. 11th Symp. (Intern.) on Detonation. 1998. P. 979–988.
13. **Miller P. J., Bedford C. D., Davis J. J.** Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives // Ibid. P. 214–220.
14. **Ермолаев Б. С., Хасаинов Б. А., Боден Ж., Прель А.-Н.** Поведение алюминия при детонации вторичных ВВ. Сюрпризы и интерпретации // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 6. С. 60–69.
15. **Brousseau P., Dorsett H. E., Cliff M. D., Anderson C. J.** Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder // 12th Symp. (Intern.) on Detonation, San Diego, California, 2002; ONR 333-05-2. P. 11–21.
16. **Гогоуля М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю. и др.** Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.
17. **McKinnon C. N.** Detonation product electrical conductance enhancement by metallic seeding // Proc. 10th Symp. on Engineering Aspects of Magneto-Hydrodynamics, 1969. M.I.T., Cambridge, Mass. P. 91–94.

18. Решетов А. А. Природа электрической проводимости продуктов детонации смесевых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 6. С. 112–115.
19. Гилев С. Д., Трубачев А. М. Детонационные свойства и электропроводность смесей взрывчатых веществ с металлическими добавками // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 2. С. 104–120.
20. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ // ЖЭТФ. 1959. Т. 37, вып. 6(12). С. 1543–1549.
21. Hayes В. On the electrical conductivity in detonation products // Proc. 4th Symp. (Intern.) on Detonation, White Oak, MD, 1965. Office of Naval Research, ACR-126. Washington, 1967. P. 595–601.
22. Tanaka К. Measurement of electrical conductivity in detonation products // Report on 5th Intern. Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems. Bourges, France, 1975.
23. Якушев В. В., Дремин А. Н. Природа электропроводности продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1975. Т. 221, № 5. С. 1143–1144.
24. Антипенко А. Г., Дремин А. Н., Якушев В. В. О зоне электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1975. Т. 225, № 5. С. 1086–1088.
25. Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Дибиров О. А. и др. Исследование взаимодействия компонентов гетерогенных взрывчатых веществ методом электропроводности // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 97–108.
26. Гилев С. Д., Трубачев А. М. Высокая электропроводность продуктов детонации тротила // Журн. техн. физики. 2001. Т. 71, вып. 9. С. 123–127.
27. Гилев С. Д. Электропроводность металлических порошков при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 128–139.
28. Clerk J. P., Giraud G., Roussenq J., et al. La percolation. Modeles, simulations analogiques et numeriques // Ann. de Physique. 1983. V. 8. P. 4–105.
29. Термические константы веществ / Под ред. В. П. Глушко и др. М., 1964–1981.

Поступила в редакцию 21/X 2004 г.