

УДК 662.215

О МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ В ТОНКОМ ПЕРИФЕРИЙНОМ СЛОЕ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, М. Н. Терещенко, А. Д. Боднарюк

Научно-исследовательский машиностроительный институт им. В. В. Бахирева, 125212 Москва
vitadavidov@yandex.ru

Методом рентгеноимпульсной съемки изучена метательная способность коаксиальных комбинированных разрывных зарядов, содержащих дисперсный алюминий в тонком периферийном слое в сравнении с зарядами, содержащими равномерно распределенную добавку алюминия, и зарядами без добавок. Подтверждено существенное влияние процесса догорания продуктов детонации на метательное действие разрывных зарядов, содержащих дисперсный алюминий. Показано, что алюминий в составе разрывных зарядов сгорает в результате реакции как с продуктами детонации, так и с окружающим воздухом, в том числе в разреженной среде.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, продукты детонации, комбинированный разрывной заряд, дисперсный алюминий, метательная способность.

DOI 10.15372/FGV20190415

ВВЕДЕНИЕ

Появившиеся в последние годы результаты экспериментов по исследованию метательного, а также бризантного и фугасного действия алюминизированных взрывчатых веществ (ВВ) в различных газодинамических условиях свидетельствуют о том, что энергия сгорания алюминия наиболее эффективно реализуется в работу взрыва при догорании продуктов детонации (ПД) алюминизированных ВВ в атмосферном воздухе [1–10]. Это догорание, очевидно, происходит на контактной границе ПД — воздух.

В то же время в приповерхностном слое зарядов алюминизированных ВВ (с равномерно распределенной в объеме заряда добавкой дисперсного алюминия) с воздухом контактирует меньшая часть добавки, а большая ее часть, находящаяся в удаленных от поверхности слоях заряда, используется неэффективно. В этой связи представляют интерес коаксиальные комбинированные разрывные заряды (КРЗ), содержащие повышенное количество алюминия в периферийной части заряда. Однако КРЗ с относительно толстым периферийным слоем (толщиной $0.15 \div 0.25$ радиуса

КРЗ) приводят к снижению скорости метания по сравнению с однородным зарядом [11].

Целью настоящей работы является изучение метательной способности КРЗ, содержащих дисперсный алюминий в тонком периферийном слое, в сравнении с зарядами, содержащими равномерно распределенную добавку алюминия, и зарядами без добавки в различных газодинамических условиях испытаний.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методом рентгеноимпульсной съемки регистрировали процесс метания оболочек (трубок внутреннего диаметра 20.6 мм, длиной 80 мм и с толщиной стенки 2 мм, массой 78 г) и пластин, изготовленных из стали 45 в состоянии поставки. Схема экспериментальных сборок представлена на рис. 1. Трубки заполняли прессованными зарядами диаметром 20 мм. В качестве базового ВВ использовали флегматизированный октоген (окфол-3,5), масса заряда составляла 44 г, плотность 1.76 г/см^3 . Кроме того, испытывали заряды из смеси окфола-3,5 с 10 % алюминия марки АСД-1 (масса 46 г, плотность 1.82 г/см^3). Для исключения воздушного зазора заряды закрепляли на парафиноцерезиновом сплаве.

Были проведены также испытания оболочек с покрытием, нанесенным на внутрен-

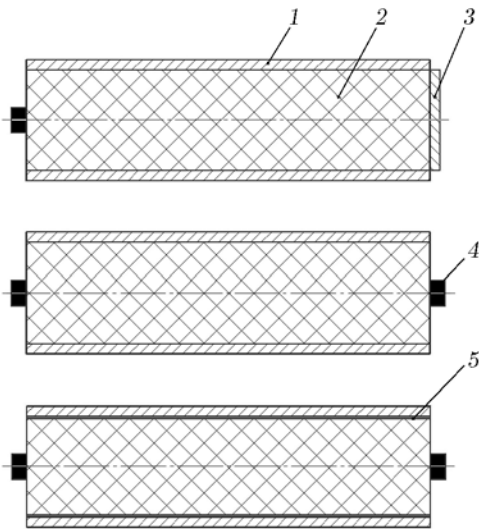


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:
1 — оболочка, 2 — разрывной заряд, 3 — пластина, 4 — точки инициирования, 5 — покрытие

ную поверхность оболочки и содержащим порошок алюминия марки АСД-1. В качестве связующего вещества для покрытий использовали поливинилбутиральный лак ПВБ-12. Перед снаряжением оболочки выдерживали до полного высыхания покрытий. Массу покрытия ($1.5 \div 1.6$ г) подбирали таким образом, чтобы заполнить зазор между оболочкой и зарядом. Массовая доля металла в покрытии составляла 90 %. Таким образом, относительная толщина периферийного слоя КРЗ была в пять раз меньше, чем в работе [11].

Детонацию инициировали как с одной стороны, так и с двух сторон — разводку выполняли детонационным шнуром. В случае одностороннего инициирования на свободном торце заряда размещали стальную пластину диаметром 20 мм, толщиной 2 мм, массой 5 г. Испытания проводили во взрывной камере как в воздухе атмосферного давления, так и в вакууме при остаточном давлении воздуха 0.05 атм.

Рентгенографирование проводилось тремя аппаратами импульсного действия через заданные интервалы времени. Для каждой серии выполняли $2 \div 4$ параллельных эксперимента, получая от 6 до 12 рентгеновских снимков. Перемещение оболочек регистрировали в среднем сечении ($(1/2)L$), а также в сечениях на расстоянии 20 мм ($(1/4)L$) и 60 мм ($(3/4)L$) от точки инициирования. База измерения перемещения находилась в пределах $10 \div 60$ мм. Время срабатывания рентгеновских аппаратов изме-

рялось с точностью 10 нс, длительность экспозиции составляла не более 70 нс.

Основной вклад в погрешность измерения скорости вносит ошибка определения координаты, связанная с нечеткостью границы положения оболочки — «размытостью» снимка. При регистрации процесса метания на рентгеновскую пленку наибольшая ширина нечеткой границы составляла 1 мм. Таким образом, аппаратная погрешность определения скорости не превышала 2 %.

Для интерпретации рентгеновских изображений получали зависимости перемещения оболочек от времени ($x-t$ -диаграммы), которые имели вид прямых линий, что свидетельствовало о равномерном движении и завершении процесса ускорения оболочек. Для определения скорости метания оболочек полученные $x-t$ -диаграммы обрабатывали линейной аппроксимацией по методу наименьших квадратов [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные рентгенограммы процесса расширения стальных оболочек представлены на рис. 2 и 3. На рентгенограммах присутствует статическое изображение оболочки, используемое для определения масштаба. На рис. 3 в среднем сечении оболочки видна узкая зона осколков, образованная в результате соударения встречных детонационных волн при дву-

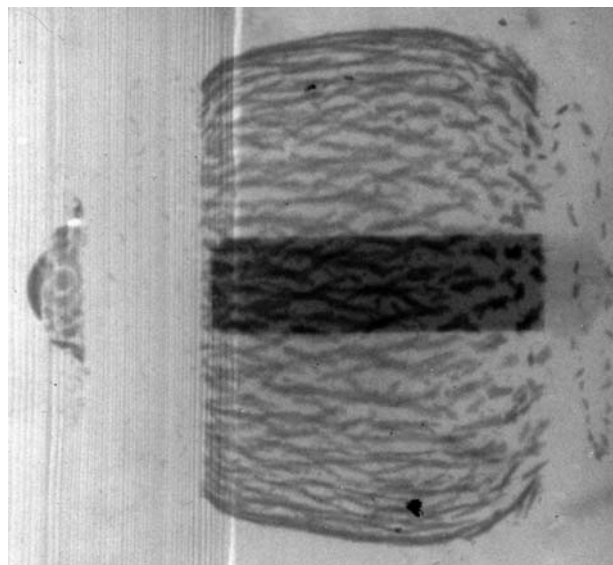


Рис. 2. Рентгенограмма процесса расширения оболочки при одностороннем инициировании в момент времени 35.0 мкс

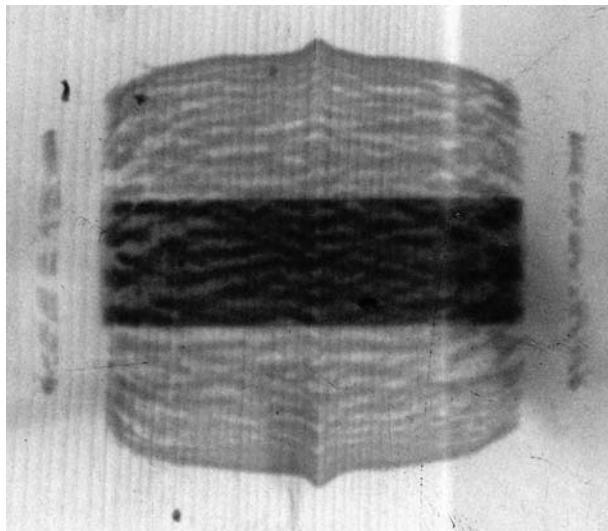


Рис. 3. Рентгенограмма процесса расширения оболочки при двустороннем инициировании в момент времени 19.7 мкс

стороннем инициировании детонации. Скорости метания оболочек, а также среднеквадратичные отклонения скорости в соответствующих сечениях приведены в табл. 1–3.

Как видно из табл. 1, при одностороннем инициировании добавка 10 % алюминия приводит к повышению скорости метания оболочки на 9 % и к снижению скорости пластины на 5 %. Этот результат качественно соответствует данным исследования [13], полученным при метании стальных оболочек зарядами на основе флегматизированного гексогена, согласно которым добавка алюминия снижает скорость метания пластины, но существенно повышает скорость метания оболочки.

Таблица 1
Скорости метания оболочки и пластины при одностороннем инициировании

Разрывной заряд	$v_{1/2}$, м/с	$v_{1/4}$, м/с	v_{pl} , м/с
Окфол-3,5	1822 ± 47	1917 ± 18	2007 ± 54
Окфол-3,5 + 10 % Al	1977 ± 30	2002 ± 34	1904 ± 29
Относительная скорость, %	108.5	104.4	94.9

Примечание. $v_{1/2}$ — скорость в среднем сечении оболочки, $v_{1/4}$ — скорость в сечении 1/4 длины оболочки, v_{pl} — скорость пластины.

При двустороннем инициировании наблюдается увеличение скорости метания оболочки на $8 \div 13$ %, связанное с более высокими параметрами нагружения оболочки при столкновении встречных детонационных волн. Прирост скорости оболочки за счет добавки алюминия в этом случае составил $8 \div 9$ %. При этом в случае двустороннего инициирования скорость метания увеличивается не только в среднем сечении оболочки, но и в периферийной части.

Как было показано в работе [8], прирост скорости метания за счет догорания ПД в воздухе возрастает с увеличением скорости движения ПД относительно воздуха, что проявляется наиболее заметно для алюминизированных ВВ. По этой причине эксперименты по определению метательного действия КРЗ проводились с двусторонним инициированием.

Как видно из данных табл. 2, при исследовании метательного действия КРЗ получен прирост скорости оболочки 5 %. Несмотря на то, что содержание алюминия в периферийном слое КРЗ в три раза меньше, чем в заряде с равномерно распределенной добавкой алюминия, прирост скорости метания оболочки лишь на 60 % ниже. В то же время абсолютные значения скоростей метаемых оболочек в среднем сечении для однородного заряда на 3 %, а в сечении 1/4 длины — на 7 % выше, чем для КРЗ.

При проведении испытаний в вакууме (разреженной атмосфере с остаточным давлением воздуха не более 0.05 атм) прирост скорости оболочки за счет добавки алюминия снижается более чем в четыре раза по сравнению с испытаниями в воздухе — с 8.5 до 2 % (см. табл. 3), так же как и для смесей на основе флегматизированного гексогена [5]. Прирост скорости оболочки за счет использования КРЗ с двусторонним инициированием в вакууме также снижается по сравнению с испытаниями в воздухе — с 5 до 2 %. Это является прямым подтверждением догорания горючих компонентов в воздухе как для зарядов с однородным распределением алюминия в них, так и для КРЗ, содержащих дисперсный алюминий только в периферийном слое.

Интересно сравнить абсолютные значения скоростей метаемых оболочек для трех испытанных разрывных зарядов: окфол-3,5, КРЗ и окфол-3,5 с равномерным распределением дисперсного алюминия в заряде — при метании в воздухе и в вакууме. Для трубок, заполненных окфолом-3,5 (когда нет вторичного выде-

Таблица 2

Скорость метания оболочки при двустороннем инициировании в воздухе

Разрывной заряд	Масса добавки, г	$v_{1/2}$, м/с	$v_{1/2}^{rel}$, %	$v_{1/4}$, м/с	$v_{1/4}^{rel}$, %
Окфол-3,5	—	2062 ± 29	100	1702 ± 36	100
Окфол-3,5 + 10 % Al	4.6	2239 ± 17	108.5	1831 ± 10	107.5
КРЗ	1.5	2169 ± 24	105.2	1711 ± 25	100.5

Примечание. v^{rel} — относительная скорость.

Таблица 3

Скорость метания оболочки при двустороннем инициировании в вакууме

Разрывной заряд	Масса добавки, г	$v_{1/2}$, м/с	$v_{1/2}^{rel}$, %	$v_{1/4}$, м/с	$v_{1/4}^{rel}$, %
Окфол-3,5	—	2148 ± 8	100	1731 ± 26	100
Окфол-3,5 + 10 % Al	4.6	2192 ± 27	102,0	1793 ± 50	103.6
КРЗ	1.5	2193 ± 26	102.1	1744 ± 40	100.8

ления энергии за счет догорания алюминия), скорость метания в вакууме вследствие меньшего аэродинамического торможения на 4 % выше, чем в воздухе. Для КРЗ этот эффект снижается до 1 %, что, вероятно, связано с тем, что в воздухе догорание алюминия происходит интенсивнее, чем в вакууме. А для смеси окфола-3,5 с равномерным распределением дисперсного алюминия в заряде замена воздуха на вакуум приводит к противоположному результату. В воздухе скорость оболочки на 2 % выше, чем в вакууме, что, по нашему мнению, также подтверждает наличие догорания. По-видимому, суммарный эффект от окисления алюминия в ПД и воздухе компенсировал большее аэродинамическое торможение в воздухе, чем в разреженной атмосфере.

В среднем сечении, в котором при соударении встречных детонационных волн скорости оболочек и истекающих через трещины ПД максимальны, превалирует энергетический вклад окисления на воздухе алюминия и других горючих компонентов ПД. При этом эффекты от добавок алюминия в случае однородного заряда и КРЗ близки. Для сечений оболочки, удаленных от середины, в которых скорости оболочки и ПД ниже, существенным становится энергетический вклад реакций алюминия с ПД. Однако добавка алюминия в центральной части заряда в исследованных КРЗ отсутствует, поэтому однородный заряд из смеси окфола-3,5 с алюминием имеет заметное преимущество перед КРЗ.

Полученные результаты в целом соответствуют физической модели окисления алюминия в детонационных волнах при взрывном метании пластин и оболочек [4]. Согласно этой модели при детонации алюминизированных ВВ окисление алюминия вначале происходит при его реакции с продуктами детонации ВВ, а затем при реакции с кислородом воздуха, при этом определяющим параметром является скорость движения горючих компонентов ПД в воздухе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальные данные, полученные при метании стальных оболочек в воздухе и вакууме, подтверждают существенное влияние процесса догорания ПД в воздухе на метательное действие разрывных зарядов, содержащих дисперсный алюминий.

2. Добавки алюминия в составе разрывных зарядов сгорают в результате реакции как с ПД, так и с окружающим воздухом, в том числе в разреженной среде.

3. Скорость метания стальных оболочек в случае двустороннего инициирования для смеси окфола-3,5 с 10 % алюминия в 1.5 раза выше, чем для ВВ без добавки алюминия, что свидетельствует о повышении скорости горения алюминия с увеличением скорости движения ПД в воздухе при двустороннем инициировании.

4. Обеспечивая повышенную концентрацию алюминия в тонком периферийном слое

КРЗ, можно повысить эффективность реализации энергии сгорания алюминия в метательное действие взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В. Ю. Разлет продуктов детонации флегматизированного гексогена и его смесей с дисперсным алюминием // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 8. — С. 57–60.
2. Давыдов В. Ю., Грязнов Е. Ф., Губин А. С. Особенности метательного действия алюминизированных ВВ // Тр. междунар. конф. «Ударные волны в конденсированных средах», Санкт-Петербург, 2008. — С. 170–177.
3. Давыдов В. Ю., Грязнов Е. Ф., Губин А. С. и др. Метание стальных пластин и трубок при детонации флегматизированного гексогена и его смеси с алюминием в разреженной атмосфере // XI Харитоновские тематические научные чтения: сб. докл. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 435–440.
4. Давыдов В. Ю., Губин А. С. О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками. 2. Активированные и ультрадисперсные порошки алюминия // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 7. — С. 62–67.
5. Давыдов В. Ю., Губин А. С. О метательной способности взрывчатых веществ и их смесей с горючими добавками 3. Метание стальных оболочек и пластин // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 8. — С. 44–51.
6. Давыдов В. Ю., Губин А. С., Загрядцкий Ф. С., Потапов И. В. О догорании в воздухе продуктов детонации ВВ с избытком горючих компонентов // Ударные волны в конденсированных средах: тр. междунар. конф., Киев, 2012. — С. 334–338.
7. Давыдов В. Ю., Губин А. С., Загрядцкий Ф. С., Потапов И. В. О реакции продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ с окружающим воздухом // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 100–104.
8. Давыдов В. Ю., Губин А. С., Никитин А. Д., Потапов И. В., Григорьев Г. С. «Эффект догорания» при двухстороннем инициировании зарядов в стальных оболочках // XII Забабахинские научные чтения: тр. междунар. конф. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014.
9. Давыдов В. Ю., Губин А. С., Никитин А. Д., Потапов И. В. Об измерении скоростей осколков в лабораторных и полигонных условиях // Вопросы оборон. техники. — 2014. — Сер. 14, вып. 2. — С. 23–27.
10. Давыдов В. Ю. Метательная способность взрывчатых веществ с вторичным выделением энергии в различных газодинамических условиях // XVII Харитоновские тематические научные чтения: сб. докл. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 509–515.
11. Гришкин А. М., Давыдов В. Ю., Головлев И. Д. Исследование процесса реализации энергии комбинированных зарядов ВВ в полезные формы работы взрыва // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 6. — С. 100–103.
12. Экспериментальные методы физики взрыва и удара / под ред. В. В. Селиванова. — М.: Физматлит, 2013.
13. Давыдов В. Ю., Козмерчук В. В., Мурышев Е. Ю., Головлев И. Д. Влияние добавок порошкообразного алюминия на энергию ВВ, передаваемую в осевом и радиальном направлении // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 3. — С. 96–99.

Поступила в редакцию 01.10.2018.

После доработки 06.02.2019.

Принята к публикации 20.02.2019.