

О МЕХАНИЗМЕ ОКИСЛЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ АЛЮМОСОДЕРЖАЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

И. А. Семенов, О. Ф. Мардасов

ФГУП «Красноармейский научно-исследовательский институт механизации», 141292 Красноармейск Московской области, kniim@krasn.mosreg.ru

Рассмотрены результаты скоростной киносъемки наземного взрыва зарядов алюмосодержащих взрывчатых составов и тротила. Отмечены особенности свечения продуктов взрыва при детонации алюмосодержащих составов. Установлено, что при взрыве составов данного класса время горения частиц алюминия размером $20 \div 50$ мкм составляет несколько миллисекунд. Сделан вывод о том, что в данных условиях процесс окисления частиц алюминия описывается диффузионной моделью горения.

Ключевые слова: детонация, алюмосодержащий взрывчатый состав, порошкообразный алюминий, диффузионная модель горения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение находят взрывчатые составы, содержащие добавки мелкодисперсного алюминия в виде порошка или пудры. Известно, что введение алюминия во взрывчатый состав повышает мощность ударной волны (УВ), генерируемой при взрыве, из-за высокой теплоты реакции окисления Al. Например, удельная теплота реакции окисления алюминия (на единицу массы горючего) кислородом воздуха до Al_2O_3 составляет 31 МДж/кг, тогда как удельная теплота взрыва наиболее мощных современных индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ) не превосходит 6.7 МДж/кг (CL-20).

Существует две точки зрения на вопрос о времени окисления частиц алюминия при детонации алюмосодержащих взрывчатых веществ [1–4]. Авторы работ [5–7 и др.] считают, что алюминий микронного размера сгорает за период времени не превышающий $1 \div 10$ мкс, т. е. полностью или частично окисляется в зоне реакций детонационной волны. Другая точка зрения состоит в том, что время горения частиц Al значительно больше [8–10]. По мнению авторов работы [9], при детонации высокоплотных зарядов алюмосодержащих взрывчатых веществ разложение состава является двухстадийным процессом. На первой стадии во фронте детонационной волны происходит разложение собственно взрывчатой части смеси. Частицы алюминия размерами больше $1 \div 10$ мкм на этой стадии не окисляются, поскольку

ку не успевают даже прогреться [9]. Окисление алюминия начинается за фронтом детонационной волны, в газообразных продуктах детонации (ПД).

За фронтом детонационной волны ПД представляют собой газозвесь, состоящую из газовой фазы и частиц металла. Дисперсные частицы вовлекаются в движение за счет силы межфазного трения. В результате межфазного теплообмена частицы разогреваются в высокотемпературном потоке (индукционный период) до температуры вспышки (воспламенения). Температура вспышки для рассматриваемых условий высокоскоростного нагрева частиц алюминия по оценкам авторов работ [9, 11] находится в интервале $700 \div 1000$ °С.

После воспламенения частица быстро разогревается и выходит на стационарный режим горения. Температура зоны реакции, измеренная с помощью оптического пирометра [9], составляет $3300 \div 3800$ К, что близко к температуре кипения оксида алюминия. В окислении алюминия могут участвовать любые кислородосодержащие компоненты смеси: H_2O , CO_2 , CO , O_2 и др., т. е. продукты детонации и кислород воздуха.

Существует несколько подходов к описанию процесса окисления частиц алюминия при взрывных превращениях. В качестве примеров можно привести гипотезу срыва оксидной оболочки алюминия в детонационной волне с последующей реакцией окисления на поверхности частицы [9], макрокинетический под-

ход к описанию окисления дисперсного алюминия как континуума, развитый авторами работ [2, 3, 12], и пр.

В [9, 13, 14] рассмотрена диффузионная модель горения частиц горючего в окислителе. Во многих случаях, когда среднее расстояние между каплями горючего достаточно велико, горение каждой капли можно рассматривать как горение одиночной частицы. В предположении сферичности капли и квазистационарности процесса можно использовать стационарные законы сохранения. Одним из основных результатов, полученным при разработке диффузионной модели, подробно описанной в [13, 14], является выражение для массовой скорости горения сферической частицы в среде окислителя (парофазный режим):

$$\frac{dm}{dt} = - \left[\int_{r_b}^{\infty} \frac{dr}{4\pi\rho D r^2} \right]^{-1} \times \\ \times \ln \left[1 + \frac{c_p(T_{\infty} - T_b) + Y_1\Phi_N\Delta H}{h_1} \right],$$

где m — масса частицы; t — время; r — расстояние; ρ , D — плотность и коэффициент диффузии газовой фракции; r_b — текущий радиус частицы; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении газовой фракции; h_1 — удельная теплота испарения алюминия; ΔH — удельная теплота реакции окисления алюминия; Y_1 — массовая концентрация окислителя в газовой фракции; Φ_N — стехиометрическое отношение; T_{∞} — температура газовой фракции; T_b — температура поверхности горящей частицы. Величина T_b близка к температуре кипения алюминия [13, 14], согласно работе [9] $T_b = 2323$ К.

В предположении $\rho D = \text{const}$, которое следует из кинетической теории газов при значении числа Льюиса $Le = 1$ [13], после интегрирования получаем

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{4\pi\lambda r_b}{c_p} \ln \left[1 + \frac{c_p(T_{\infty} - T_b) + Y_1\Phi_N\Delta H}{h_1} \right], \quad (1)$$

где λ — теплопроводность газовой фазы.

Используя очевидное равенство

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r_b^2 \rho_1 \left(\frac{dr_b}{dt} \right), \quad (2)$$

где ρ_1 — плотность алюминия, после подстановки выражения (2) в (1) и интегрирования, получаем выражение, аналогичное формуле Срезневского [13]:

$$d^2 = d_0^2 - At, \quad (3)$$

где

$$A = 8\lambda/(c_p\rho_1) \ln\{1 + [c_p(T_{\infty} - T_b) + Y_1\Phi_N\Delta H]/h_1\}. \quad (4)$$

Здесь A — константа (скорость горения), d_0 , d — начальный и текущий диаметры частицы.

Таким образом, использование диффузионной модели горения при условии $\rho D = \text{const}$ приводит к квадратичному закону горения частицы (3). Формула (4) показывает, что согласно диффузионной модели скорость горения A логарифмически зависит от теплоты реакции, теплоты испарения горючего и концентрации окислителя, а также слабо зависит от температуры газовой фазы. Величина A формально нечувствительна к давлению. Эта зависимость косвенно может проявиться в форме изменения параметров λ , c_p и т. д. от давления. Для процесса окисления частиц алюминия теоретические значения константы A не превосходят $1 \div 2$ мм²/с, что близко к экспериментальным данным [9, 13].

Время горения частиц алюминия диаметром 20 мкм, рассчитанное при использовании диффузионной модели с теоретически максимальным возможным значением константы A , составляет не менее $200 \div 400$ мкс. Полученный результат существенно отличается от упомянутых в работах [1–7] оценок времени окисления частицы алюминия с соответствующим размером при детонации алюмосодержащих взрывчатых составов ($t < 1 \div 10$ мкс). В этом случае скорость горения A должна иметь значения на один — два порядка выше, чем максимально возможные в диффузионной модели. То есть должно реализовываться аномальное высокоскоростное горение частиц алюминия с механизмом окисления, по-видимому, отличным от диффузионного. Поэтому вопрос о механизме окисления частиц алюминия при взрыве алюмосодержащих взрывчатых составов остается открытым.

Для уточнения оценки реального времени горения частиц алюминия были выполнены эксперименты со скоростной киносъемкой

наземного взрыва цилиндрических зарядов, содержащих 80 % флегматизированного гексогена и 20 % алюминиевого порошка. Средний размер частиц алюминия в порошке составлял $20 \div 30$ мкм. Для сравнения была также проведена скоростная киносъемка взрыва заряда тротила.

Массы зарядов (с учетом инициирующих шашек) были одинаковы и составляли 2.15 кг. Заряды были заключены в одинаковые тонкостенные алюминиевые корпуса толщиной 2.5 мм с внутренним диаметром 100 мм. В экспериментах заряды располагались вертикально на высоте 10 см от поверхности земли.

Ниже рассматриваются световые эффекты при взрыве заряда гомогенного ВВ. После выхода детонационной волны на поверхность заряда в видимой части спектра наблюдается яркое свечение продуктов детонации, имеющих температуру $3000 \div 4000$ К. В дальнейшем газообразные ПД расширяются и начинают остывать из-за волны разгрузки, распространяющейся по ПД от периферии к центру взрыва. При взаимодействии газообразных ПД с воздухом перед ними формируется воздушная УВ. На начальной стадии она представляет собой слой ударно-сжатого воздуха. Давление во фронте воздушной УВ в этот момент составляет $70 \div 90$ МПа, а температура достигает 10^4 К [4]. Фронт УВ на данной стадии взрыва для видимой части спектра является оптически толстым (непрозрачным), поэтому он экранирует свечение продуктов детонации, которые по мере расширения остывают и перестают излучать свет. Вследствие этого свечение газообразных ПД непродолжительно (несколько десятков микросекунд).

Впоследствии сформировавшаяся воздушная УВ отрывается от поверхности раздела ПД с воздухом. Поэтому в дальнейшем фиксируется свечение воздушной УВ, которое ослабевает по мере ее отхода от центра взрыва, так как параметры на ее фронте (давление и температура) падают. На расстоянии $15 \div 20$ радиусов заряда температура во фронте воздушной УВ падает ниже $2000 \div 2500$ К, а давление становится ниже $4 \div 6$ МПа и свечение УВ в видимой части спектра прекращается. Приведенные здесь расчетные значения газодинамических параметров получены авторами при моделировании наземного взрыва заряда ВВ цилиндрической формы с использованием двумерного гидродинамического кода. Параметры фик-

сируются у поверхности земли.

При взрыве алюмосодержащего взрывчатого состава наряду с вышеописанными световыми эффектами будет наблюдаться также свечение горящих частиц алюминия. Если частицы сгорят за $1 \div 10$ мкс, то картина свечения существенно не изменится. Свечение частиц будет наблюдаться только в начальный период взрыва. В это время (до 10 мкс от начала взрыва) облако горящих частиц будет находиться внутри области, занятой газообразными ПД, которые в этот момент, как было описано выше, сами являются мощным источником света. Поэтому отделить эти источники друг от друга практически невозможно.

Если время горения частиц алюминия размером $20 \div 30$ мкм лежит в миллисекундном диапазоне, как предполагается при использовании диффузионной модели, то после окончания свечения воздушной УВ (которая на начальной стадии своего движения будет экранировать излучение не только ПД, но и облака горящих частиц) должно наблюдаться свечение облака горящих частиц алюминия. Это расширяющееся облако распространяется за фронтом УВ.

Ниже рассмотрены полученные экспериментальные результаты. На рисунке представлены последовательные кадры скоростной киносъемки наземных взрывов цилиндрических зарядов тротила и состава, содержащего 80 % флегматизированного гексогена и 20 % алюминиевого порошка. Скорость киносъемки составляла $V = 4900 \div 5000$ кадр/с. Можно отметить, что на всех кинограммах над поверхностью земли регистрируется светящаяся область, увеличивающаяся во времени.

При анализе кинограммы взрыва заряда тротила (рисунк *a*) на первом кадре видно яркое свечение ПД (или, возможно, воздушной УВ на стадии ее формирования). На втором кадре ($200 \div 300$ мкс от начала взрыва) светящаяся область расширяется до размеров около 1.3 м (по радиусу) у поверхности земли. По-видимому, здесь регистрируется свечение интенсивной воздушной УВ, которая в этот период экранирует свечение ПД. На третьем кадре видно появление в светящейся зоне темных областей, которые на последующих кадрах увеличиваются. По-видимому, это связано с тем, что воздушная УВ в этот период времени перестает светиться из-за падения интенсивности. Газообразные ПД к этому времени также