

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ И АЛЮМИНИЯ

Е.В. Форат

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А.Н. Яковлев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: forategor@gmail.com

В данной работе экспериментально исследовано зажигание смесового состава перхлорат аммония (ПХА) с порошком алюминия различной дисперсности, взятыми в стехиометрическом соотношении лазерным излучением ($\lambda=1.06$ мкм) с длительностью импульса 0.8 мс. Предварительно ПХА квалификации «ч.д.а.» измельчался в агатовой ступке и просеивался через капроновое сито со средним размером ячеек $\sim 85 \times 85$ мкм. Средние размеры частиц алюминия в исследуемых порошках представлены в таблице 1. Смесь массой ~ 9 мг засыпалась в капсулу из полиметилметакрилата с внутренним диаметром 3 мм и глубиной 3 мм. Навески запрессовывались пуансоном в капсулу до давления 800 кГс/см². Диаметр лазерного пучка на поверхности образца составлял 2 мм. Облучалась как открытая поверхность, так и под прикрытием. Полученные данные, приведенные в таблице 1, можно объяснить с двух позиций.

В первую очередь рассмотрим вариант зажигания одиночной частицы в матрице ПХА. Приближенную оценку средней температуры очага нагрева ΔT на момент окончания лазерного воздействия τ_u можно получить из выражения:

$$\Delta T = \frac{F(\rho_0)H_{TR} \cdot 3}{4 \cdot c \cdot \rho \cdot R_0} \cdot k(R_0, \lambda_0) \cdot \frac{R_0^3}{(R_0 + \sqrt{\alpha\tau})^3}, \quad \text{где } F(\rho_0) - \text{ безразмерный коэффициент,}$$

связывающий освещенность поверхности образца, задаваемая лазерным пучком, с освещенностью в объеме [1]; ρ_0 - коэффициент диффузного отражения образца;

$$k(R_0, \lambda_0) = \frac{\sigma(R_0, \lambda_0)}{\pi R_0^2} - \text{ относительное сечение поглощения на длине волны лазерного}$$

излучения λ_0 , c - удельная теплоемкость, ρ - плотность ПХА.

Результаты оценок ΔT_{oz} для различных смесей приведены в таблице 1. Видно, что максимальный разогрев очага при пороговых уровнях лазерного воздействия (3500 °С) происходит в окрестности частиц алюминия размером $2R_0 = 80$ мкм (состав ПХА/АСД-1). При этом размер теплового очага $2R$ составляет $2R = 2R_0 + 2\sqrt{\alpha\tau}$, т.е. около 100 мкм. С уменьшением $2R_0$ температура нагрева уменьшается, уменьшается запас тепла W ($W = F \cdot H_{TR} \cdot k \cdot \pi \cdot R_0^2$). Так при $2R_0 = 80$ мкм запас тепла составляет около 3 мДж, а при $2R_0 = 0,14$ мкм ($2R \sim 10$ мкм) – 3×10^{-10} Дж, т.е. меньше на 6 порядков.

Возникает парадоксальная ситуация, в которой тепловые очаги с малым запасом тепла являются более реакционно способными, нежели очаги с много большим запасом тепла. Это противоречит основным положениям тепловой очаговой теории зажигания и здравому смыслу. Отсюда следует вывод о том, что зажигание из одиночного микроочага, возникающего в окрестности отдельной частицы Al в данных смесях невозможно.

Второй крайний случай предполагает, что происходит разогрев приповерхностного слоя толщиной $Z_l = \frac{1}{\mu} + \sqrt{\alpha\tau}$, где μ - показатель поглощения смеси. При этом μ находится из

соотношения: $\mu = \pi R_0^2 \cdot k(R_0, \lambda_0) \cdot C$, где C - концентрация частиц Al ($C = \frac{\eta \cdot \rho_c}{M_{pat}(1-\eta)}$; η - массовая доля частиц Al; ρ_c - плотность смеси; M_{pat} - масса частицы). Температуру нагрева слоя можно оценить из соотношения: $\Delta T_l = \frac{F \cdot H_{TR}}{Z_l c \rho}$, где $F = 1 - \rho_F$ - коэффициент поглощения, взятый с учетом френелевского отражения.

Таблица 1. Характеристики зажигания составов ПХА/Al

Состав	Характерный размер частиц Al $2R_0$, мкм	Пороговая плотность энергии зажигания с закрытой поверхности H_{TR} , Дж/см ²	Пороговая плотность энергии зажигания с открытой поверхности H_{TR} , Дж/см ²	Температура нагрева микроочага в окрестности частицы ΔT_{oz} , °C	Запас тепла в микроочаге W, Дж
ПХА/АСД-1	80	153*	—	3500	$\sim 3 \times 10^{-3}$
ПХА/АСД-4	8-10	16.9	—	228	$\sim 4 \times 10^{-6}$
ПХА/АСД-8	3-4	11.8	—	86	$\sim 5 \times 10^{-7}$
ПХА/АСД-10	2-3	8.3	—	35	8×10^{-8}
ПХА/НП Al	0.14	3.3	1.3	0.25	3×10^{-10}

Таблица 2. Характеристики зажигания составов ПХА/Al

Состав	Характерный размер частиц Al $2R_0$, мкм	Концентрация частиц Al, частиц/см ³	Показатель поглощения слоя μ , см ⁻¹	Толщина прогретого слоя ΔZ , см	Температура нагрева слоя ΔT_l , °C
ПХА/АСД-1	80	$\sim 2 \times 10^6$	9	~ 0.1	765
ПХА/АСД-4	8-10	$\sim 1 \times 10^9$	74	$\sim 1 \times 10^{-2}$	845
ПХА/АСД-8	3-4	$\sim 5 \times 10^9$	185	$\sim 6 \times 10^{-3}$	983
ПХА/АСД-10	2-3	$\sim 1.5 \times 10^{10}$	370	$\sim 4 \times 10^{-3}$	1037
ПХА/НП Al	0.14	$\sim 3 \times 10^{13}$	3700	$\sim 1 \times 10^{-3}$	1650

Видно, что с увеличением дисперсности частиц алюминия температура поверхностного слоя растет при одновременном уменьшении толщины слоя ΔZ . Тем не менее, реакционная способность теплового макроочага плоской конфигурации с температурой нагрева 1650 °C и толщиной около 10^{-3} см (состав ПХА/НП Al) значительно выше, чем у очага с температурой нагрева 765 °C и толщиной слоя около 10^{-1} см (состав ПХА/АСД-1). Эта ситуация соответствует классическим представлениям о тепловом очаговом зажигании, в частности критическому параметру Франка-Каменецкого [2]. Таким образом, увеличение чувствительности составов с увеличением дисперсности частиц Al указывает на макроочаговую тепловую природу зажигания смесевых составов ПХА+Al.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aleksandrov E.I., Voznyuk A.G., Tshipilev V.P. Effect of absorbing impurities on explosive initiation by laser light// Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 1989. – 1 – P. 1–7
2. Baum F.A., Orlenko et al. Explosion Physics – Nauka, 1975. – 156 p.