

## 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](mailto: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  $\sim 9$  мг засыпалась в капсулу из полиметилметакрилата с внутренним диаметром 3 мм и глубиной 3 мм. Навески запрессовывались пуансоном в капсулу до давления 800 кГс/см<sup>2</sup>. 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  $\Delta T$  на момент окончания лазерного воздействия  $\tau_u$  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];  $\rho_0$  - 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  $\lambda_0$ ,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность ПХА.

Результаты оценок  $\Delta T_{oz}$  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) –  $3 \times 10^{-10}$  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  $\mu$  - показатель поглощения смеси. При этом  $\mu$  находится из

соотношения:  $\mu = \pi R_0^2 \cdot k(R_0, \lambda_0) \cdot C$ , где  $C$  - концентрация частиц Al ( $C = \frac{\eta \cdot \rho_c}{M_{pat}(1-\eta)}$ ;  $\eta$  - массовая доля частиц Al;  $\rho_c$  - 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 <sup>2</sup>	Пороговая плотность энергии зажигания с открытой поверхности $H_{TR}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Температура нагрева микроочага в окрестности частицы $\Delta T_{oz}$ , °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	$8 \times 10^{-8}$
ПХА/НП Al	0.14	3.3	1.3	0.25	$3 \times 10^{-10}$

Таблица 2. Характеристики зажигания составов ПХА/Al

Состав	Характерный размер частиц Al $2R_0$ , мкм	Концентрация частиц Al, частиц/см <sup>3</sup>	Показатель поглощения слоя $\mu$ , см <sup>-1</sup>	Толщина прогретого слоя $\Delta Z$ , см	Температура нагрева слоя $\Delta T_l$ , °C
ПХА/АСД-1	80	$\sim 2 \times 10^6$	9	$\sim 0.1$	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  $\Delta Z$ . 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.