

Дополнительным преимуществом ХЖ радиальной геометрии является снижение потребления газа-носителя, что особенно актуально при проведении внутрискваженных экспериментов. С целью

увеличения эффективной длины ХЖ предлагается составлять ХЖ в стержни.

*Автор признателен компании Шлюмберже за возможность опубликования результатов данной работы.*

#### Список литературы

1. Purnell J.H. Comparison of efficiency and separating power of packed and capillary gas chromatographic columns // *Nature*. – 1959. – V. 184. – № 4704. – P. 2009.
2. Жданев О.В. Хроматография переменной геометрии // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 100–104
3. Жданев О.В. Хроматография переменной геометрии в случае прямоугольных хроматографических колонок // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 104–108.
4. Apparatus and Method for Analyzing the Composition of Formation Fluids: US Patent 5166747; filing date 01.06.90, published 24.11.92. URL: <http://www.google.com/patents/US5166747> (дата обращения: 15.05.2013).
5. Jahn F., Cook M., Graham M. Hydrocarbon exploration and production. – Germany: Elsevier, 2008. – 444 p.
6. Neue U.D. HPLC columns. Theory, technology, and practice. – New York: Wiley-VCH Inc., 1997. – 416 p.
7. Spangler G. Height equivalent to a theoretical plate theory for rectangular GC column // *Analytical Chemistry*. – 1998. – V. 70. – P. 4805–4816.
8. Giddings J.C. Plate height of nonuniform chromatographic columns // *Analytical Chemistry*. – 1963. – V. 35. – № 3. – P. 353–356.
9. Grushka E. Chromatographic Peak Shapes. Their Origin and Dependence on the Experimental Parameters // *Journal of Physical Chemistry*. – 1973. – V. 76. – № 18. – P. 2586–2593.
10. Golay M.J.E. Theory of chromatography in open and coated tubular columns with round and rectangular cross-section // *Gas Chromatography*. – London: Butterworths, 1958. – P. 36–55.

*Поступила 31.05.2013 г.*

УДК 544.452.14

## ВЛИЯНИЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ПОРОГИ ЛАЗЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ СМЕСИ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ И ОКСИДА ЖЕЛЕЗА

В.В. Медведев, А.П. Ильин, А.А. Решетов\*

Томский политехнический университет

\*Тюменский государственный нефтегазовый университет

E-mail: medvedev@tpu.ru

*Приведены результаты экспериментальных исследований по зажиганию пиротехнического состава (нанопорошок алюминия+оксид железа) лазерным излучением ( $\lambda=1,06$  мкм) с длительностью импульса 3,5 мс. Измерены энергетические пороги лазерного зажигания исследуемого состава и состава с добавками оксида алюминия при различных плотностях запрессовки. Исследован фазовый состав конечных продуктов сгорания. Установлено, что добавки нанопорошка оксида алюминия в железо-алюминиевый термит с увеличением плотности образцов снижают энергетические пороги зажигания.*

#### Ключевые слова:

*Лазерное излучение, зажигание, пиротехнический состав.*

#### Key words:

*Laser radiation, ignition, pyrotechnic composition.*

#### Введение

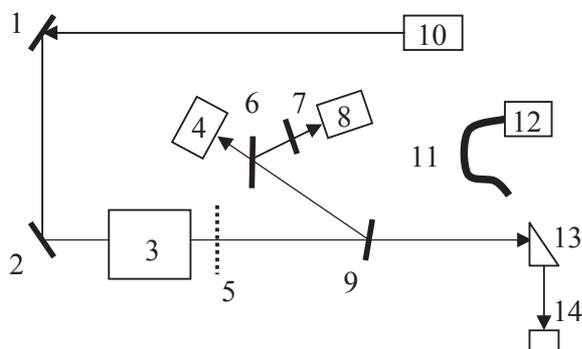
Применение ряда материалов в виде нанопорошков (НП) приводит к резкому увеличению химической активности как отдельных НП, так и их смесей с различными веществами. Поэтому становится актуальной проблема понижения чувствительности наносистем к нагреву, трению, удару и т. д.

Целью данной работы являлось изучение влияния добавок нанопорошка гамма-оксида алюминия на устойчивость термитной смеси (25 % НП алюминия + 75 % НП  $Fe_2O_3$ ) к действию лазерного излучения.

#### Характеристика исходных материалов и методики эксперимента

Соотношение термит/оксид алюминия составляло 70/30. Среднеповерхностный диаметр частиц алюминия составлял ~ 0,25, оксида железа ~ 1, оксида алюминия ~ 0,04 мкм. Смесь вышеперечисленных компонентов тщательно растирали в агатовой ступке. Навески массой ~ 10 мг засыпали в пресс-форму и запрессовывали до требуемой плотности. Получали образцы в виде таблеток диаметром 4 мм и толщиной 1...3 мм (толщина зависела от давления прессования). Плотность меняли в интервале  $-0,1 < \rho / \rho_m < 0,7$  (наибольшая возможная

плотность  $\rho_m \sim 4,16 \text{ г/см}^3$ ). Облучали по нормали центральную часть диаметром 3 мм торцевой поверхности образца. Такой метод лазерного облучения связан с тем, что при прессовании края образцов пропрессовывались хуже, чем центральная часть, и это могло повлиять на измерение энергетических порогов зажигания (ЭПЗ). В работе использовалось излучение неодимового лазера, генерирующего квазипрямоугольный, квазинепрерывный (глубина модуляции не более 30 %) лазерный импульс длительностью  $\sim 3,5 \text{ мс}$  (многомодовый режим генерации). Неравномерность облучения торцевой поверхности образца составила не более 20 %. Методика определения неравномерности лазерного излучения по сечению пучка приведена в работе [1]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема установки зажигания пиротехнической смеси лазерным излучением: 1, 2) поворотные зеркала; 3) импульсный лазер; 4) калориметр; 5, 7) нейтральные светофильтры; 6, 9) светоделительные пластины; 8) фотоприемник ФЭК-09К; 10) юстировочный лазер ЛГН-109; 11) световодный жгут; 12) фотоприемник ФЭУ-118; 13) поворотная призма; 14) образец

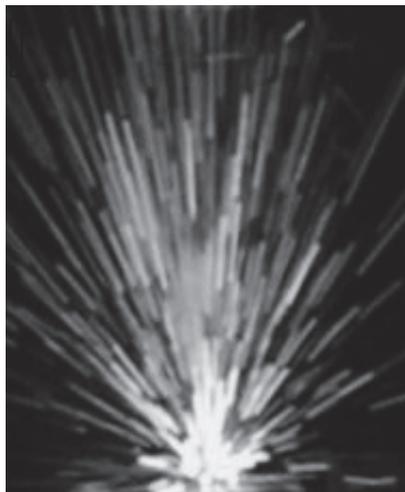
Величины ЭПЗ определяли по методике, описанной в работе [2]. Вначале строили вероятностные кривые зажигания от 0 до 100 % ( $P$  = количество зажиганий/количество опытов), как функцию  $P$  от плотности энергии  $E$  подводимого излучения. Каждой точке зависимости соответствовал статистический набор из 25 опытов при точности показаний калориметра не более  $\pm 10 \%$  от среднего значения. За величину ЭПЗ принимали значения  $E_{50}$ , при которых реализовалось зажигание с вероятностью  $P=50 \%$ .

В работе использовали НП алюминия, полученный в условиях электрического взрыва проводников (газовая среда – аргон) [3] и пассивированный медленным окислением в воздухе; такой НП устойчив до  $350...450 \text{ }^\circ\text{C}$  [4].

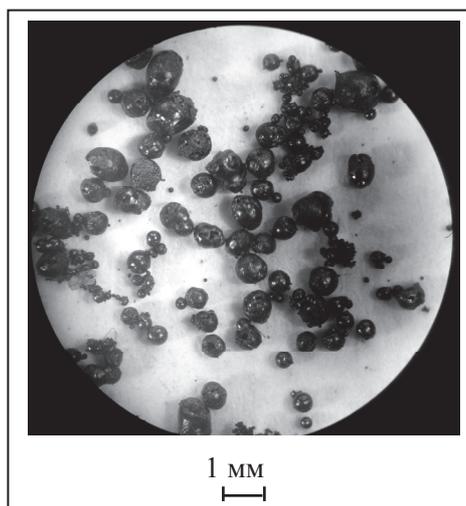
#### Результаты эксперимента

В смеси с НП  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  температура начала окисления НП алюминия снижается незначительно. Скорость горения такой смеси резко возрастает и, в отличие от смеси грубодисперсных порошков, сопровождается факелом и выбросом продуктов горения (рис. 2), которые представляют собой оплавленные

сферические частицы, большая часть которых является полыми (рис. 3).



**Рис. 2.** Фотография факела горящего прессованного образца термитной смеси (25 % НП алюминия + 75 % НП  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )



**Рис. 3.** Фотография осажденных частиц продуктов горения термитной смеси (25 % НП алюминия + 75 % НП  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

Повышение скорости горения создает практически адиабатические условия, при которых температура в зоне горения увеличивается и достигает больших значений, чем при сгорании штатного термита. Все эти процессы затрудняют возможность использования термитных смесей на основе НП по назначению. Для определения химической активности НП алюминия и их смесей использовали четыре параметра, которые получают по данным дифференциально-термического анализа [5]. Конечными продуктами горения смесей нанопорошков алюминия и оксида железа является также интерметаллид  $\text{AlFe}_3$  и, в качестве основной кристаллической фазы, обнаружен шпинелеподобный алюминат железа  $\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{II})$ . Заметных количеств других фаз с помощью рентгенофазового анализа не обнаружено. Продуктами сгорания

классического железо-алюминиевого термита являются металлическое железо и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , причем эти продукты достаточно компактны: в процессе горения отсутствует факел и не происходит их выброса.

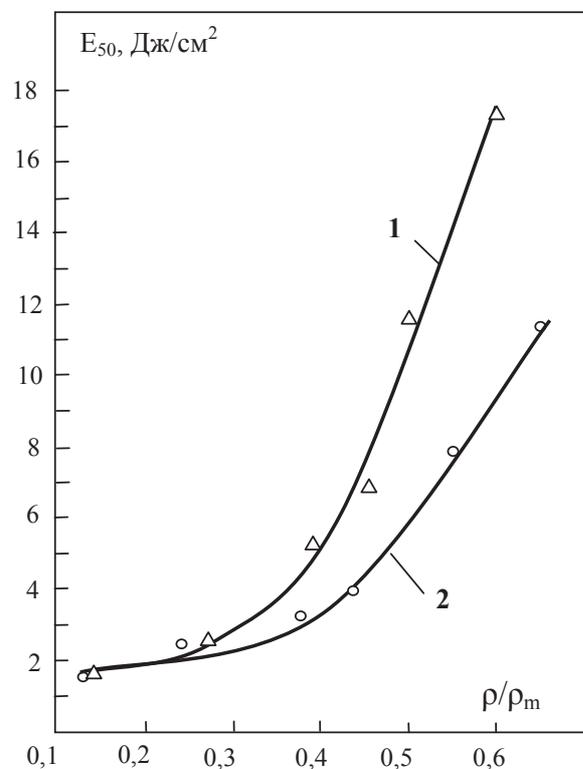


Рис. 4. Зависимость энергетических порогов зажигания от плотности образцов: 1 – состав: 25 % НП алюминия + 75 % НП  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 2 – состав 70 % плотности состава 1: 25 % НП алюминия + 75 % НП  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  + 30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Эксперименты по лазерному зажиганию термита насыпной плотности с добавками оксида алюминия и без него показали, что данные составы имеют незначительную разницу в порогах зажигания. Если предположить, что некоторое снижение ЭПЗ связано с меньшей теплопроводностью частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по сравнению с частицами алюминия, а в насыпном со-

стоянии контакт между частицами невелик, тогда при увеличении уплотнения смеси эффект уменьшения ЭПЗ должен быть более значимым.

С этой целью были проведены эксперименты по влиянию плотности образцов на ЭПЗ. Результаты приведены на рис. 4.

Согласно полученным зависимостям с увеличением плотности образцов разница величин ЭПЗ растет, что подтверждает выдвинутое предположение. Горение смеси (50 % НП Al + 50 % НП  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) отличалось от горения других термитов. Данный состав зажигался и горел в конденсированной фазе, без разбрызгивания продуктов. После сгорания образовывался пустотелый шарик бурого цвета, если масса навески была не более 10 мг. При массе более 10 мг образовывалась полусфера. Образование пустотелого шарика можно объяснить тем, что при горении поверхностный слой жидкого металла препятствует воздуху, находящемуся в порах, выходить наружу и разбрызгивать жидкий металлический слой. За счет сил поверхностного натяжения образуется шарик, а воздух перемещается внутрь образца. Когда давление становится достаточным, воздух выходит наружу. Обращает также на себя внимание, что образцы с нанопорошком алюминия горят иначе, чем образцы с грубодисперсным порошком алюминия, которые после сгорания обычно сохраняют свою форму [6].

#### Выводы

1. Добавки нанопорошка оксида алюминия в железо-алюминиевый термит с увеличением плотности образцов снижают энергетические пороги зажигания.
2. Замена грубодисперсных порошков на нанопорошки алюминия и оксида железа меняет не только внешние параметры: увеличение скорости горения, появление факела и вынос продуктов горения, но и состав конечных продуктов сгорания. За счет более высоких температур в зоне горения образуется шпинелеподобный продукт  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ , представляющий собой основную кристаллическую фазу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев В.В. Лазер с регулируемой длительностью импульса на базе о.к.г. ГОС301 // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 6. – С. 89–91.
2. Медведев В.В. Влияние интенсивности лазерного излучения на пороги зажигания пористого двухосновного топлива // Химическая физика. – 2004. – Т. 23. – № 3. – С. 73–78.
3. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / под ред. А.П. Ильина. – Томск: Изд-во Том. Политех. ун-та, 2005. – 148 с.
4. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. – 154 с.
5. Ильин А.П., Яблунский Г.В., Громов А.А. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 58–62.
6. Максимов Э.И., Мержанов А.Г., Шкиро В.М. Безгазовые составы как простейшая модель горения нелетучих конденсированных систем // Физика горения и взрыва. – 1965. – Т. 1. – № 4. – С. 24–30.

Поступила 14.03.2013 г.