

## СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 541.124.16

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ СМЕСЕЙ  
ФУРАЗАНОТЕТРАЗИНДИОКСИДА И ДИНИТРОДИАЗАПЕНТАНАВ. Е. Зарко<sup>1</sup>, В. Н. Симоненко<sup>1</sup>, П. И. Калмыков<sup>2</sup>, А. А. Квасов<sup>1</sup>,  
Е. Н. Чесноков<sup>1</sup>, К. Э. Купер<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, zarko@kinetics.nsc.ru<sup>2</sup>ФГУП ФНПЦ «Алтай», 659322 Бийск<sup>3</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментов по определению порогового уровня плотности энергии лазерного импульса, приводящего к взрывному превращению исследуемых смесей. Показана принципиальная возможность использования методики лазерного инициирования для экспрессного тестирования смесей варьируемого состава и структуры.

Ключевые слова: лазерное инициирование, кристаллизованные смеси, фуразанотетразиндиоксид, динитродиазапентан.

## ВВЕДЕНИЕ

Эндотермическое вещество 5,6-(3', 4'-фуразано)-1,2,3,4-тетразин-1,3-диоксид (С<sub>2</sub>N<sub>6</sub>O<sub>3</sub>, ФТДО), обладающее высокой энтальпией образования, представляет большой интерес в качестве перспективного высокоэнергетического материала [1]. Однако его практическое использование затруднено в связи с высокой чувствительностью к механическим воздействиям, сопоставимой с чувствительностью азидов свинца [2]. Для преодоления этого препятствия предложено кристаллизовать ФТДО в смеси с линейным нитраминоом 2,4-динитро-2,4-диазапентаном (ДНП) [3]. Такие смеси характеризуются наличием двух эвтектик ФТДО/ДНП (18/82 и 65/35) и молекулярного соединения (49/51). Найдено, что смеси устойчиво горят при атмосферном давлении, но при повышении давления до нескольких десятков атмосфер горение переходит в нестационарный режим [4]. Чем выше содержание ФТДО в смеси, тем ниже пороговое значение давления срыва устойчивого горения.

Анализ данных по переходу горения в неустойчивый режим исследуемых кристаллизованных смесей позволяет предположить, что причиной этого явления служит превышение критического уровня скорости роста температуры в реакционной зоне конденсированной фазы. Действительно, при скорости горения 20 мм/с расчетный максимальный градиент температуры в конденсированной фазе составляет  $\approx 100$  К/мкм. При этом скорость роста температуры достигает значения  $\approx 10^6$  К/с. Это обуславливает появление больших термических напряжений, которые могут приводить к механическому разрушению кристаллов и переходу горения в режим, близкий к взрывчатому превращению. Преимущественное инициирование взрывного превращения при горении может происходить в локальных областях с повышенным содержанием ФТДО.

В настоящей работе предпринята попытка оценить чувствительность кристаллизованных смесей ФТДО/ДНП к действию теплового импульса, имитирующего условия в волне горения. Тепловой импульс создавался с помощью сфокусированного излучения импульсного СО<sub>2</sub>-лазера. Лазер был настроен на линию 10Р32 ( $932.96 \text{ см}^{-1}$ ), совпадающую с максимумом

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-03-00636-а).

мом одной из полос поглощения в ИК-спектре смеси ФТДО/ДНП. Импульс имел типичную для CO<sub>2</sub>-лазеров форму: начальный пик длительностью 0.2 мкс и «азотный хвост» длительностью около 1.5 мкс. Энергия начального пика составляла около 30 % от полной энергии лазерного импульса. Полная энергия импульса варьировалась в интервале 0.1 ÷ 0.5 Дж.

В работе исследовались образцы кристаллизованной смеси ФТДО/ДНП составов 49/51 (молекулярное соединение) и 65/35 (энергетически богатая эвтектика). Образцы были приготовлены путем нагрева до расплавления перемешанных порошков исходных веществ с последующей кристаллизацией миниатюрных капель (масса 8 ÷ 12 мг) смеси на покровном стекле или на фторопластовой пленке. Кристаллизация капель проводилась при различных температурах подложки: нижний предел — температура жидкого азота, верхний — 50 ÷ 55 °С (вблизи точки плавления соответствующей смеси).

На синхротронном источнике ИЯФ СО РАН методом рентгеновской микротомографии проводилось исследование структуры образцов молекулярного соединения и эвтектической смеси, кристаллизованных при температурах подложки  $T_{\text{п}} = 20$  и  $-18$  °С. В результате получены реконструированные изображения тонких срезов образцов эвтектической смеси. Их анализ позволяет найти величину порозности, определяемой как отношение объема пор к объему образца, а также распределение пор по размерам. Выявлено, что порозность молекулярного соединения уменьшается с увеличением темпа охлаждения образцов, при этом кривая распределения пор по размерам смещается в сторону малых размеров: для  $T_{\text{п}} = 20$  и  $-18$  °С порозность составила соответственно 1.3 и 0.8 %, а модальный (среднесчетный) размер пор  $D_{10}$  равен 16 и 13 мкм. Для эвтектической смеси порозность в обоих случаях составила 0.9 %, а модальные размеры  $D_{10}$  равны 16 и 14 мкм для  $T_{\text{п}} = 20$  и  $-18$  °С соответственно.

Облучение исследуемых образцов кристаллизованных смесей производилось одиночными импульсами CO<sub>2</sub>-лазера. Образцы в форме чечевицы диаметром 3 ÷ 5 мм, обращенные плоским основанием к выходному окну лазера, помещались в области перетяжки лазерного луча, сфокусированного длиннофокусной ( $f = 250$  мм) линзой из NaCl. Полная энергия импульса излучения измерялась прибором

ИМО-2М.

Распределение плотности энергии в области перетяжки было измерено сканированием сечения пучка пластиной с точечным отверстием. Профиль распределения оказался близким к гауссову с шириной на уровне  $\exp(-1)$ , равной  $a = 1.4$  мм. Соответственно максимальная плотность энергии  $E_0$  в центре перетяжки вычислялась по формуле  $E_0 = 4W/(\pi a^2)$ , где  $W$  — полная энергия лазерного импульса.

Часть лазерного излучения, поступающего на фокусирующую линзу, отражалась пластинкой из NaCl на пироэлектрический приемник МГ-33. Сигнал с приемника использовался для регистрации энергии лазерного импульса в огневых экспериментах. Калибровка приемника проводилась с помощью измерителя ИМО-2М непосредственно перед серией из нескольких экспериментов и сразу после них. Энергия лазерного импульса варьировалась путем изменения энергии электрического разряда в лазере и давления лазерной смеси, а также с помощью ослабляющих светофильтров из стекла КРС-5.

В экспериментах по лазерному инициированию смесей ФТДО/ДНП получены следующие результаты. При вариации удельной плотности энергии импульса в пределах 10 ÷ 35 Дж/см<sup>2</sup> образцы молекулярного соединения демонстрируют лишь кратковременную вспышку с последующим погасанием. На облученной поверхности регистрируется кругообразная область с частичным уносом и плавлением исходного вещества. На кинокадрах (съемка со скоростью 30 кадр/с) фиксируются факел в струе отходящих от поверхности продуктов пиролиза и последующее погасание. При действии максимального импульса излучения регистрируется разрушение образца с образованием центрального кратера и сравнительно крупных фрагментов (рис. 1). В опытах с эвтектической смесью ФТДО/ДНП (65/35) измерены пороговые значения удельной плотности энергии, при которых инициируется взрывное разложение. Как и в случае молекулярного соединения, при относительно слабых энергетических воздействиях регистрируются кратковременная вспышка и последующее погасание. Это сопровождается специфическим разрушением облученной поверхности с образованием центрального кратера и отдельных слабосвязанных фрагментов с характерными размерами 0.1 ÷ 0.5 мм (см. рис. 1). Дости-

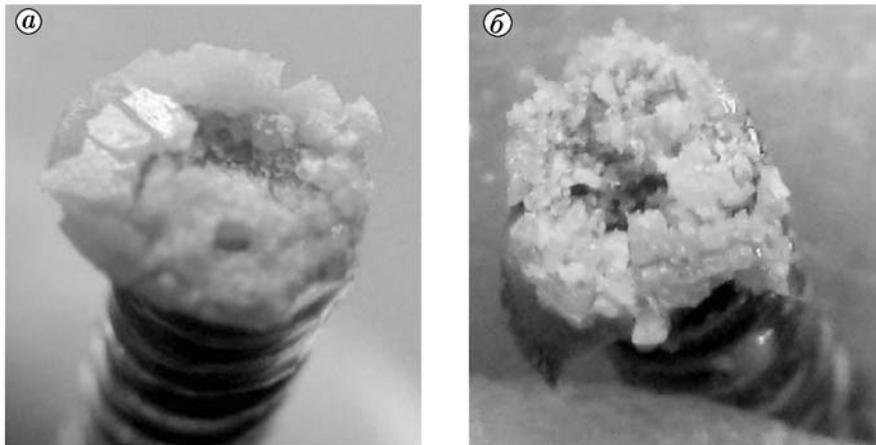


Рис. 1. Фотографии поверхностей молекулярного соединения (а) и эвтектической смеси (б) после действия импульсов излучения допороговой интенсивности

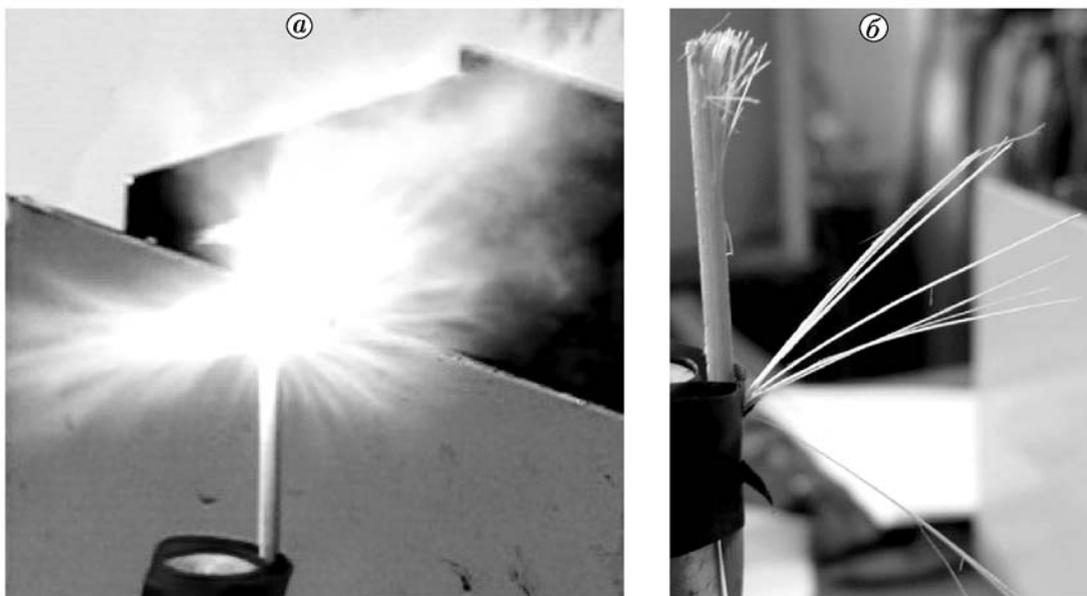


Рис. 2. Фотография взрыва эвтектической смеси (а) и изображение расщепленного деревянного стержня (б)

жение порогового уровня энергии излучения характеризовалось появлением резкого хлопка, разлетом продуктов сгорания по круговой сфере и расслаиванием деревянного стержня, используемого для крепления образца (рис. 2). Найдено, что пороговый уровень энергии излучения, соответствующий взрывному превращению, зависит от структурных свойств образца. В частности, кристаллизованная при  $T_{\text{п}} = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$  эвтектическая смесь ФТДО/ДНП

(65/35) взрывается при плотности энергии  $E \geq 18\text{ Дж/см}^2$ , а смесь, кристаллизованная при  $T_{\text{п}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , взрывается при  $E \geq 21\text{ Дж/см}^2$ .

Зарегистрированное различие пороговых значений плотности энергии инициирования взрыва для модификаций эвтектической смеси, кристаллизованных при двух различных температурах подложки, не имеет в настоящее время однозначного объяснения. С одной стороны, низкая температура подложки (высокая

скорость охлаждения капли) способствует образованию более мелких кристаллов. С другой стороны, при этом могут образовываться кристаллы менее совершенной формы, чем в случае умеренной скорости кристаллизации при комнатной температуре подложки. Размеры пор, как следует из проведенных измерений при  $T_{\text{п}} = 20$  и  $-18$  °С, уменьшаются при понижении температуры подложки (данные для температуры жидкого азота отсутствуют). Требуется провести более детальные исследования, включающие как изучение характеристик кристаллической структуры при вариации условий охлаждения, так и применение современных методов скоростной визуализации процесса лазерного инициирования.

Таким образом, в данной работе показано, что результаты экспериментов по лазерному инициированию могут служить в качестве специфической характеристики термического превращения исследуемых образцов высокоэнергетических материалов. Обнаруженное качественное подобие характеристик взрывного превращения при лазерном инициировании и при горении в условиях повышенных давлений означает принципиальную возможность использования методики лазерного инициирования для экспрессного тестирования смесей варьируемого состава и структуры. К достоинствам метода лазерного инициирования следу-

ет также отнести реальные возможности оперирования ограниченной массой исходных веществ и надежного обеспечения безопасных условий испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лемперт Д. Б., Нечипоренко Г. Н., Согласнова С. И. Зависимость удельного импульса композиций ракетных топлив, содержащих окислители на базе атомов С, N и O от энтальпии образования и элементарного состава окислителя // Хим. физика. — 2004. — Т. 23, № 5. — С. 75–81.
2. Теселкин В. А. О чувствительности фуразано-1,2,3,4-тетразин-1,3-диоксида к механическим воздействиям // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 140–142.
3. Калмыков П. И., Сидельников А. А., Коптюг А. В., Анчаров А. И., Зарко В. Е., Рябчикова Т. П. Исследование особенностей кристаллизации и фазовой структуры бинарных систем ФТДО-ДНП // Сб. тез. IV всерос. конф. «Энергетические конденсированные системы». — М.; Черноголовка, 2008. — С. 26–28.
4. Калмыков П. И., Зарко В. Е., Симоненко В. Н., Вдовина Н. П., Трошина О. А., Сидоров К. А. Исследование взаимосвязи физико-химических свойств фуразанотетразиндиоксида (ФТДО) и закономерностей горения конденсированных систем на его основе // Сб. тез. XIV Симпозиума по горению и взрыву. Горение и кинетика. — Черноголовка, 2008. — С. 79.

*Поступила в редакцию 11/VIII 2009 г.*