

12

## **Зажигание энергетических материалов сильноточным электронным пучком наносекундной длительности**

© Г.Г. Савенков, В.А. Морозов, А.А. Лукин,  
В.А. Брагин, Г.В. Семашкин

Специальное конструкторско-технологическое бюро „Технолог“,  
Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Научно-исследовательский институт „Поиск“, Санкт-Петербург  
E-mail: sav-georgij@yandex.ru

*Поступило в Редакцию 1 ноября 2013 г.*

Приведены результаты экспериментов по инициированию воспламенения энергетических составов с широким диапазоном физико-химических параметров сильноточным электронным пучком наносекундной длительности. Показана возможность инициирования таких составов даже при низких энергетических параметрах пучка, при условии, что температура воспламенения состава не превышает 200°С.

В последнее время в связи с созданием мощных электронных ускорителей (а в перспективе возможна их миниатюризация) возросла актуальность проблемы взаимодействия импульсного электронного пучка и сопутствующего ему катодного факела с энергетическими материалами. В первую очередь это относится к удаленному инициированию таких материалов в глубоком вакууме (космосе), где эффективность сильноточного электронного пучка (СЭП) резко возрастает по сравнению с лабораторными условиями.

Работ, посвященных инициированию детонации как в первичных (инициирующих), так и во вторичных (бризантных) взрывчатых веществах (ВВ) при помощи СЭП наносекундной длительности достаточно много [1,2]. Причем инициирование с помощью СЭП бризантных ВВ является дискуссионной проблемой [2]. При этом стоит отметить, что говорить о возбуждении детонации в образцах малой толщины (< 2mm), которые использовались во всех без исключения экспе-

риментальных работах, вероятно, методически неверно, более точно речь может идти о возбуждении неких взрывчатых превращений в бризантных ВВ (БВВ). Естественно, что никто не подвергает сомнению возможность инициирования в БВВ с помощью СЭП детонации или воспламенения им же энергетических материалов. При определенной закачке энергии указанные процессы в образцах запустятся, поэтому речь идет о пороговых характеристиках СЭП, при которых начнутся процессы детонации или горения.

Зажигание (и, как следствие, горение, которое является видом взрывчатого превращения вещества) энергетических материалов с помощью СЭП пока в научной литературе не обсуждалось. Кроме того, что это является интересной задачей в целом, такая работа помогает в освещении не менее важной проблемы устойчивости зажигания в случае импульсного действия внешних тепловых источников [3]. Поэтому целью настоящей работы является исследование возможностей зажигания и его устойчивости высокоэнергетических материалов с помощью СЭП наносекундной длительности при достаточно низких энергетических параметрах пучка.

В качестве материалов, подвергавшихся воздействию СЭП, были выбраны три энергетических состава (ЭС): на основе пикрата калия (в дальнейшем — ЭС-1), на основе свинцового сурика (ЭС-2), со средним размером зерна  $\sim 100 \mu\text{m}$  для обоих составов, и на основе нитрата калия (ЭС-3) со средним размером зерна  $\sim 300 \mu\text{m}$ . Также воздействию пучка подвергали образцы с высокодисперсным перхлоратом аммония (ПХА) (размер частиц ПХА  $8\text{--}12 \mu\text{m}$ ), который, являясь окислителем для ракетных топлив, горит в достаточно узком диапазоне давлений  $2\text{--}10 \text{ МПа}$ . Поэтому кроме образцов с чистым ПХА испытывались образцы со смесью ПХА и наноразмерного порошка меди (до 30% массовой доли), который должен был играть либо роль горючего, либо (как предполагалось) частицы металла разогревались бы до высокой температуры и зажигали бы ПХА. Поскольку любые наноразмерные металлические порошки в силу своей высокой химической активности быстро окисляются, то по сути образцы представляли собой смесь ПХА и окиси меди  $\text{CuO}$ .

Температура воспламенения  $T_{ign} = 340\text{--}360^\circ\text{C}$  — для ЭС-1,  $T_{ign} = 180\text{--}220^\circ\text{C}$  для ЭС-2 и  $T_{ign} = 280\text{--}300^\circ\text{C}$  для ЭС-3. Температура воспламенения ПХА  $T_{ign} = 260\text{--}280^\circ\text{C}$ .

4\* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 6

Составы запрессовывались в стальные кольца толщиной 2 mm с внешним диаметром 30 mm и внутренним 16 mm. Плотность запрессованных составов для: ЭС-1 — 1.25 g/cm<sup>3</sup>, ЭС-2 — 3.5 g/cm<sup>3</sup>, ЭС-3 — 1.55 g/cm<sup>3</sup>, ПХА — 1.6 g/cm<sup>3</sup>.

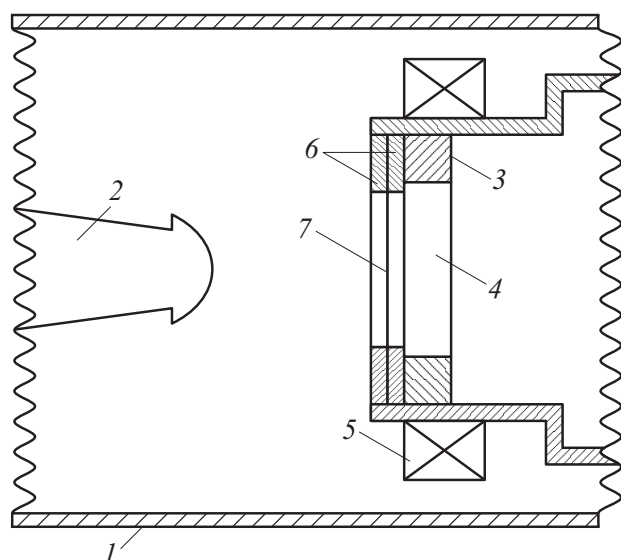
В качестве источника возбуждения СЭП использовался импульсный сильноточный ускоритель электронов ГКВИ-300 со средней энергией электронов  $E$  в спектре 250 keV и длительностью  $t_b$  импульса напряжения на полувысоте 60 ns. Диаметр пучка электронов — 10 mm. Воздействие электронного пучка на образцы осуществлялось в вакуумной камере при давлении остаточных газов  $\sim 10^{-2}$  Pa и температуре помещения 20°C. Образец устанавливался в оправку перпендикулярно летящему пучку электронов.

Поскольку в работе применялся в качестве источника электронов катод, работающий в режиме взрывной эмиссии, то кроме электронного пучка существенный вклад в нагружение и нагрев образца может вносить металлическая плазма (так называемый катодный факел (КФ)), возникающая при генерации пучка [4] и летящая вслед за пучком электронов со скоростью  $\sim 150$  km/s [5]. Поэтому в работе применяли две схемы нагружения образца. В первой схеме с образцами взаимодействовали и пучок электронов и плазма, во второй схеме плазма отсекалась с помощью полимерной пленки с напыленным алюминиевым порошком, устанавливаемой перед образцом. Толщина пленки с напылением составляла 10  $\mu$ m. Расстояние между катодом и образцом составляло 4 mm. Схема облучения образца приведена на рис. 1.

Воздействие на образцы с ЭС-1 СЭП совместно с катодным факелом приводило только к образованию, под действием растягивающих напряжений, каверны в образце, при этом следов воспламенения не наблюдалось (рис. 2, а). После таких результатов было принято решение: экспериментов с воздействием чистого электронного пучка без КФ на образцы с ЭС-1 не проводить.

Воздействие СЭП как совместно с КФ, так и в случае отсечки КФ на ЭС-2 приводило к полному выгоранию состава, при этом катод полностью покрывался слоем продуктов горения, что также указывало на зажигание и горение состава (рис. 3, а).

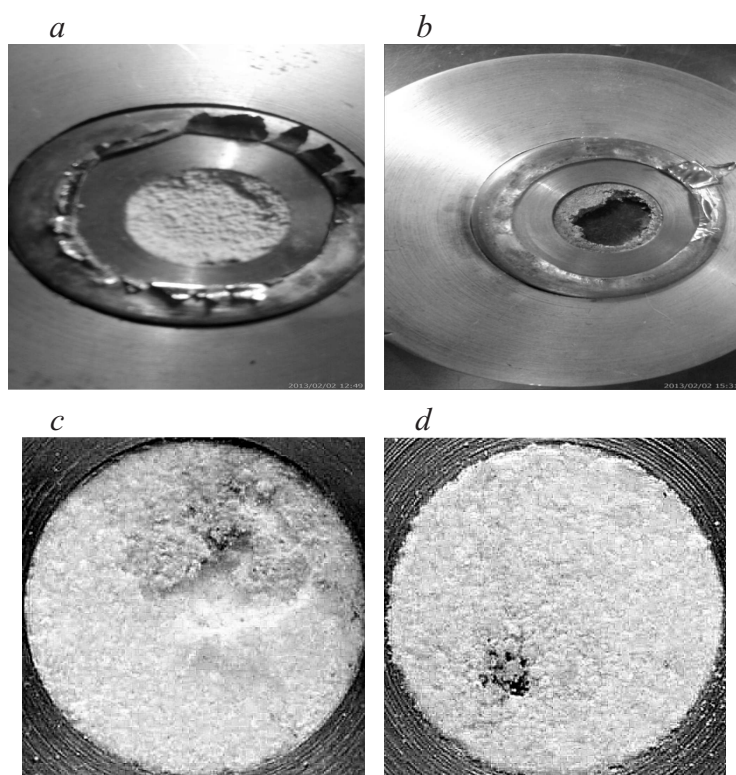
Воздействие СЭП как совместно с КФ, так и в случае отсечки КФ на ЭС-3 и ПХА к воспламенению состава не приводило. Композиционные составы (ПХА + наноразмерный порошок окиси меди) также не



**Рис. 1.** Схема проведения эксперимента: 1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — стальное кольцо-анод, 4 — образец, 5 — пояс Роговского (измеритель тока электронного пучка), 6 — кольца для крепления пленки или фольги, 7 — майларовая напыленная алюминием пленка или алюминиевая фольга.

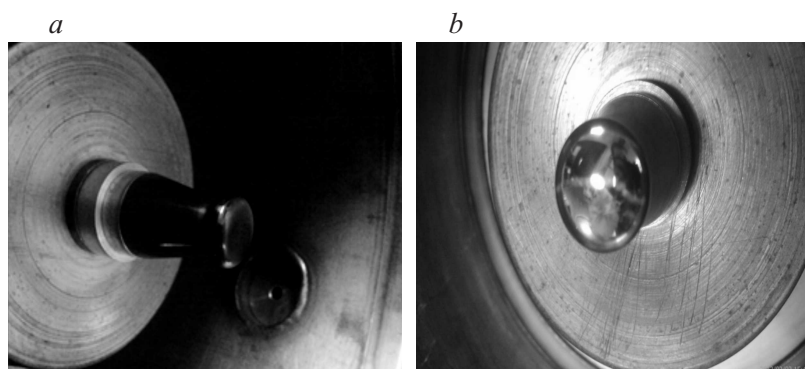
воспламенялись. Из полученного результата можно сделать вывод о том, что либо в композиционном образце не хватало горючего, либо поглощение металлическими частицами быстрых электронов не столь эффективно по сравнению с матричным составом (ПХА) и поэтому нагрев наночастиц  $\text{CuO}$  был не очень высок.

Можно отметить, что совместное действие катодного факела и электронного пучка на все эти образцы приводило к образованию каверны в образцах большего диаметра (вплоть до того, что в ЭС-1 образовывалась каверна на всю толщину образца (рис. 2, *b*)), чем при действии только электронного пучка (рис. 2, *b* и *c*). Так, на рис. 2, *c* показано действие на образец с ЭС-3 КФ и СЭП, а на рис. 2, *d* — действие на тот же состав только СЭП. Видно, что каверна на рис. 2, *c* существенно больше, чем на рис. 2, *d*.



**Рис. 2.** Вид образцов ЭС-1 (*a, b*) и ЭС-3 (*c, d*): *b, c* — действие пучка и катодного факела, *a, d* — действие только электронного пучка.

При этом в случае ЭС-1 на катоде наблюдалось термическое пятно (рис. 3, *b*), что указывало на частичное горение состава, т.е. после начального воспламенения произошло погасание заряда, тем самым процесс горения оказался неустойчивым и перехода к стационарному процессу не произошло. Заметим, что в работе [6] также не удалось с помощью СЭП наносекундной длительности возбудить взрывчатые превращения в пикрате калия (который, отметим, является бризантным взрывчатым веществом).



**Рис. 3.** Вид катода после воздействия СЭП на ЭС-2 (а) и термическое пятно на катоде (указано стрелкой) после воздействия СЭП и катодного факела на ЭС-1 (б).

Таким образом, можно констатировать, что с помощью как сильного электронного пучка, так и в совокупности его с катодным факелом, который усиливает действие СЭП, удастся воспламенить энергетический состав с относительно низкой температурой воспламенения ( $T_{ign} \approx 200^\circ\text{C}$ ) и достаточно высокой плотностью ( $\rho_0 = 3.5 \text{ kg/m}^3$ ), равной приблизительно 0.8 от теоретической.

На основании таких результатов можно предложить следующий механизм воспламенения (или не воспламенения) исследуемых энергетических материалов. Эффективная длина пробега электронов в соответствии с рис. 1 [2] составляет для ЭС-1  $h_{eff} \approx 0.3 \text{ mm}$ , для ЭС-2  $h_{eff} \approx 0.106 \text{ mm}$ , для ЭС-3  $h_{eff} \approx 0.24 \text{ mm}$ . Глубина максимального энерговыделения для одного электрона равна соответственно  $h_{e \text{ max}} = 0.13 \text{ mm}$ ,  $h_{e \text{ max}} = 0.046 \text{ mm}$  и  $h_{e \text{ max}} = 0.103 \text{ mm}$ , тогда из таких данных можно заключить, что большая часть энергии электронов рассеивается в более тонком слое (ТС) в ЭС-2 и нагревает этот ТС до температуры воспламенения. ТС воспламеняется, и от него процесс горения распространяется на всю оставшуюся часть образца.

С целью проверки выдвинутой гипотезы проведем оценочные тепловые расчеты, которые, конечно, являются необходимыми условиями,

Характеристики составов и параметры электронного пучка

Состав	$\rho_0$ , g/cm <sup>3</sup>	Теплоемкость ЭС $c_p$ , J/kg · K	$h_{eff}$ , mm	$h_{e \max}$ , mm	Мощность потока электронов на единицу площади $W$ , W/cm <sup>2</sup>	Значение энергии электронов после их прохождения через майларовую пленку $E$ , keV	Длительность импульса напряжения $t_b$ , ns
ЭС-1	1.25	230	0.3	0.13	$9.4 \cdot 10^8$	180	60
ЭС-2	3.5	851	0.106	0.0457	$9.4 \cdot 10^8$	180	60
ЭС-3	1.55	292	0.24	0.103	$9.4 \cdot 10^8$	180	60

но недостаточными для более надежного подтверждения выдвинутой гипотезы. Все параметры, необходимые для расчета, приведены в таблице. Методика расчета аналогична методике, приведенной в работе [7].

Оценки для образцов с ПХА, в том числе и с наноразмерными добавками, не производилось (в случае образцов с чистым ПХА в силу того, что ПХА — это просто окислитель, который горит в узком диапазоне давлений, а для композитных смесей ПХА + наноразмерный порошок  $\text{CuO}$  в силу того, что теплофизические параметры смеси неизвестны).

В результате расчетов получено повышение температуры в слое максимального энерговыделения для ЭС-1 на  $\Delta T = 141^\circ\text{C}$ , для ЭС-2 —  $\Delta T = 237^\circ\text{C}$ , для ЭС-3 —  $\Delta T = 112^\circ\text{C}$ . Таким образом, оценочные расчеты подтверждают выдвинутую гипотезу о механизме воспламенения энергетических материалов сильноточным электронным пучком. Для более надежного подтверждения необходимы эксперименты с более широким набором ЭС, имеющих диапазон температур воспламенения ниже  $180^\circ\text{C}$  и выше  $200^\circ\text{C}$ .

Таким образом, на основании полученных экспериментально-расчетных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Воспламенение энергетических материалов сильноточным электронным пучком при минимальных параметрах пучка возможно в случае невысоких (не более  $200^\circ\text{C}$ ) температур воспламенения материала.

2. Действие катодного факела усиливает общее воздействие СЭП на ЭС и приводит к неустойчивому горению состава с его дальнейшим погасанием, даже с высокой температурой воспламенения.

## Список литературы

- [1] Захаров Ю.А., Алукер Э.Д., Адуев Б.П. и др. Предвзрывные явления в азидах тяжелых металлов. М.: ЦЭИ „Химмаш“, 2002. 115 с.
- [2] Морозов В.А., Савенков Г.Г. // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 6. С. 69–77.
- [3] Зарко В.Е. // ФГВ. 1990. № 6. С. 3–16.
- [4] Месяц Г.А. Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000.



- [5] *Мещеряков Ю.И., Морозов В.А.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. В. 9. С. 1982–1986.
- [6] *Рябых С.М., Жуланова В.П., Холодковская Н.В.* и др. // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 3. С. 113–118.
- [7] *Морозов В.А., Савенков Г.Г., Брагин В.А.* и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 5. С. 129–134.