

06;12

## **Графен как сенсibiliзирующая добавка в энергонасыщенную соль кобальта для усиления воздействия сильноточного электронного пучка**

© Г.Г. Савенков<sup>1</sup>, В.А. Морозов<sup>2</sup>, М.А. Илюшин<sup>1</sup>, В.М. Кац<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 января 2018 г.

Исследуется влияние на чувствительность энергонасыщенной соли кобальта к воздействию сильноточного электронного пучка наносекундной длительности добавок графена. Энергонасыщенный композит изготавливался путем ультразвукового смешения 80 mass % аммоната кобальта и 20 mass % графена. Показано, что использование графена в качестве сенсibiliзирующей добавки в энергонасыщенный композит снижает энергетические параметры электронного пучка и повышает энергетические характеристики и скорость горения энергонасыщенных материалов.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.12.46289.17204

Одним из перспективных направлений, связанных с повышением скорости горения смесевых энергонасыщенных материалов (ЭНМ) и быстрым переходом горения в детонацию, является применение наноразмерных компонентов в системе горючее–окислитель [1]. В первую очередь применение таких составляющих ЭНМ объясняется резким увеличением эффективной поверхности контактирующих компонентов смеси, их химической активности [2] и скорости реакции между горючим и окислителем. Напомним, что в классических взрывчатых веществах (подкласс ЭНМ), состоящих, как правило, из атомов углерода, водорода, азота и кислорода, окислитель и горючее находятся в

одной и той же молекуле, поэтому реакция между ними происходит с максимально возможной скоростью.

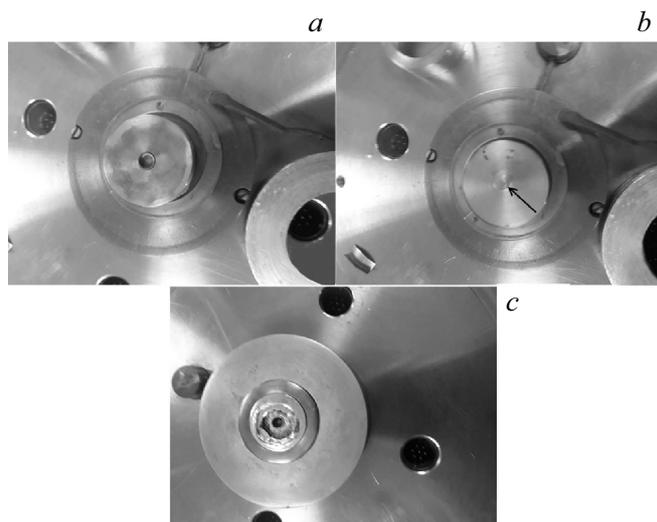
В работе [3] на основании предположения о том, что кристаллические взрывчатые вещества (ВВ) являются полупроводниками, показано, что скорость их горения зависит от ширины запрещенной зоны: чем меньше ширина запрещенной зоны, тем выше скорость горения. Отсюда следует, что если создать смесевые ЭНМ (или ВВ как их подкласс) в виде проводников, у которых ширина запрещенной зоны равна нулю, а также использовать при этом наноразмерные компоненты, то можно получить максимальную скорость горения даже на зарядах с небольшими размерами и тем самым резко сократить время индукции перехода горения в детонацию.

Очевидно, что если добавлять проводящие добавки в ЭНМ (ВВ), то наибольшую эффективность получаемого энергонасыщенного композита (ЭНК), по крайней мере с точки зрения чувствительности к внешнему иницирующему импульсу, можно ожидать при электрофизических способах иницирования: высоковольтным разрядом [4], электрическим взрывом проводника [5], сильноточным электронным пучком наносекундной длительности [6].

Одним из таких перспективных материалов, обладающих указанными свойствами, который можно использовать в качестве добавок в ЭНМ, является двумерная аллотропная форма углерода — графен. Кроме того, что он обладает большой электропроводностью. Графен также по некоторым оценкам имеет аномально высокий коэффициент теплопроводности  $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  [7]. И наконец, можно отметить, что графен выгодно отличается от существующих достаточно доступных металлических (а значит, проводящих) нанопорошков, которые очень быстро пассивируются при хранении [8], отсутствием такой пассивации. Можно также отметить, что введение графена в нитрометан (жидкое ракетное топливо) снизило температуру зажигания и повысило скорость горения топлива [9].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния на чувствительность энергонасыщенной соли кобальта (NCP) к воздействию сильноточного электронного пучка (СЭП) наносекундной длительности добавок графена.

Энергонасыщенный композит на основе аммината кобальта (перхлорат (5-нитротетразолато- $\text{N}^2$ ) пентааминкобальта (III) с акцепторным заместителем (соединение NCP)) (плотность кристаллов NCP



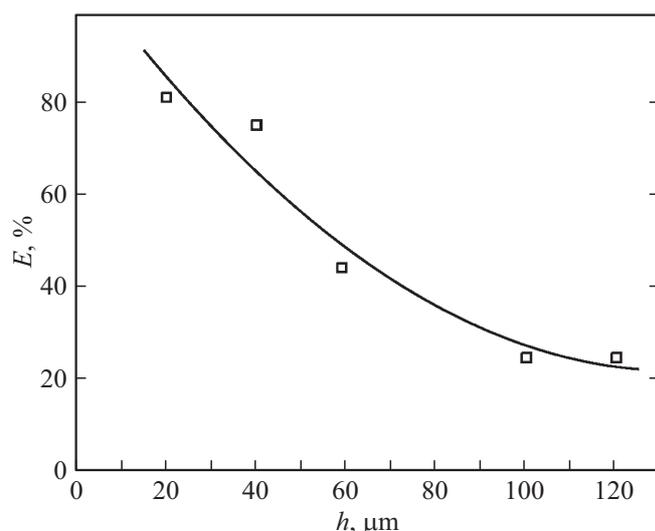
**Рис. 1.** Фотографии устройства для установки образца после проведения опытов: цвета побежалости (а), отпечаток (указан стрелкой) на стальной подложке (b) и колпачек с наполовину выгоревшим ЭНК (c).

$\rho_{exp} = 2.03 \text{ g/cm}^3$ ) изготавливался путем ультразвукового смешения 80% НСР и 20% графена (приведены массовые доли), полученного с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза технического лигнина [10].

Полученный по указанной технологии ЭНК запрессовывался в колпачок глубиной 2 mm с внутренним диаметром 4.5 mm. Масса запрессованного ЭНК составляла 38 mg, плотность  $\rho_c = 1.2 \text{ g/cm}^3$ .

Схема облучения образца (ЭНМ) пучком в принципе аналогична схеме, приведенной в работах [6,11–13]. В качестве электронного ускорителя использовалась установка ГКВИ-300 [14]. Колпачок с исследуемым ЭНК помещался в стальное кольцо с внешним диаметром 30 mm. Стальное кольцо устанавливалось на стальную подложку толщиной 2.2–2.5 mm.

Длительность импульса тока на его полувывоте составляла 20–40 ns, средняя энергия электронов в пучке 250 keV, расстояние между катодом и образцом 4 mm, диаметр пучка 8 mm. Эксперименты



**Рис. 2.** Изменение энергии СЭП в зависимости от толщины алюминиевой фольги.

проводились как с отсечкой (путем установки на кольцо алюминиевой фольги толщиной 20 или 40 μm) катодного факела (КФ) (т.е. в этом случае на образец действовал только электронный пучок), так и без отсечки (в этом случае на образец действовал СЭП + КФ). Пояснения понятия „катодный факел“ и его характеристики приведены в [6,12].

Действие СЭП (при отсечке КФ) на образцы с чистым NCP (без добавок графена) при плотности, равной плотности ЭНК, к возбуждению взрывчатых превращений (ВП) в образцах не приводило. Совместное действие СЭП+КФ приводило к возбуждению ВП (горению), и NCP в колпачке полностью выгорал, при этом на подложке отпечатка от колпачка не наблюдалось, т.е. можно полагать, что в этом случае происходило послойное горение образцов с малой скоростью.

Действие СЭП (при отсечке КФ путем установки на кольцо алюминиевой фольги толщиной 20 μm) на образцы из исследуемого ЭНК приводило к возбуждению ВП. При этом на кольце, в которое помещался колпачок с ЭНК, наблюдались цвета побежалости (рис. 1, а), а на

стальной подложке — отпечаток глубиной  $50\ \mu\text{m}$  (рис. 1, *b*). Отметим, что в [12] при инициировании образца NCP (без добавок) совокупным воздействием СЭП + КФ на подложке также наблюдался отпечаток глубиной  $50\ \mu\text{m}$ , но в указанной работе масса образца составляла  $54\ \text{mg}$ , а плотность запрессованного образца  $\rho_{\text{exp}} = 1.25\ \text{g/cm}^3$ . Таким образом, в настоящей работе при инициировании с помощью СЭП (без КФ) образца NCP с добавкой  $20\ \text{mass}\%$  графена (с меньшими общей массой и плотностью) наблюдаются как более быстрый режим горения (вплоть до дефлаграционного горения), так и режим с более высокими энергетическими характеристиками. При этом величина внешнего инициирующего импульса в настоящей работе была существенно меньше.

Установка на стальное кольцо алюминиевой фольги толщиной  $40\ \mu\text{m}$  приводила к тому, что ЭНК в колпачке выгорал наполовину (рис. 1, *c*), что свидетельствовало о невысокой энергии инициирующего импульса. В результате горение было неустойчиво и, как следствие, приводило к погасанию образца.

Действительно, эксперименты, проведенные с целью определения влияния толщины фольги на энергетические параметры пучка, показали, что при установке фольги толщиной  $40\ \mu\text{m}$  энергия электронов пучка уменьшается на  $\sim 25\%$  (рис. 2).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности использования графена в качестве сенсibiliзирующей добавки в энергонасыщенные материалы для снижения энергетических параметров сильноточного электронного пучка и повышения энергетических характеристик и скорости горения ЭНМ.

## Список литературы

- [1] Долгобородов А.Ю., Стрелецкий А.Н., Махов М.Н., Теселкин В.А., Гусейнов Ш.Л., Стороженко П.А., Фортвов В.Е. // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 8. С. 37–44.
- [2] Левданский В.В., Смолик И., Моравец И. // Инж.-физ. журн. 2010. Т. 83. № 2. С. 376–380.
- [3] Гребёнкин К.Ф. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 20. С. 1–4.
- [4] Брагин В.А., Душенок С.А., Куликов В.Г., Савенков Г.Г., Семашкин Г.В. // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 5. С. 57–64.

- [5] Лукин А.А., Морозов В.А., Савенков Г.Г. // Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах и технических системах. СПб.: Политехника, 2017. В. 1. С. 88–94.
- [6] Лукин А.А., Морозов В.А., Рашковский С.А., Савенков Г.Г. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 4. С. 69–75.
- [7] Shahil K.M.F., Balandin A.A. // Nano Lett. 2012. V. 12. N 2. P. 861–867.
- [8] Рогачёв А.С., Мукасян А.С. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 3. С. 3–30.
- [9] Sabourin J.L., Dabbs D.M., Yetter R. A., Dryer F.L., Aksay I.A. // ACS Nano. 2009. V. 3. N 12. P. 3945–3954.
- [10] Возняковский А.П., Савкин Д.И., Калинин А.В., Шугалей И.В., Крутов С.М., Мазур А.С. // Экологическая химия. 2016. Т. 25. № 3. С. 132–137.
- [11] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Брагин В.А., Кац В.М., Лукин А.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 7. С. 96–99.
- [12] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Илюшин М.А., Оськин И.А., Брагин В.А., Козлов А.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 11. С. 1701–1706.
- [13] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Персинен А.А., Оськин И.А., Брагин В.А., Лукин А.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 17. С. 28–33.
- [14] Морозов В.А., Савенков Г.Г., Брагин В.А., Кац В.М., Лукин А.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 5. С. 129–134.