

Санкт-Петербургский государственный университет  
Saint-Petersburg State University

# Х Поляховские чтения

Материалы  
международной научной конференции по механике,  
23–27 сентября 2024 г., Санкт-Петербург, Россия

# X Polyakhov's Reading

Proceedings  
of the International Scientific Conference on Mechanics,  
September 23–27, 2024, Saint-Petersburg, Russia

Санкт-Петербург  
2024

УДК 531/534+537+539+51-7+52

ББК 22.2

Д 37

Д 37 X Поляховские чтения : Материалы международной научной конференции по механике, 23–27 сентября 2024 г., Санкт–Петербург, Россия. — СПб.: Издательство ВВМ, 2024. 755 с.

ISBN 978-5-9651-1587-7

В сборник включены материалы докладов, представленных на международную научную конференцию по механике «X Поляховские чтения», которая посвящена 300-летию Санкт-Петербургского университета и 300-летию Российской Академии наук. Материалы содержат информацию о проведенных исследованиях и представляют собой статьи небольшого размера, в которых даётся обобщённое изложение полученных результатов. Обсуждаются современные проблемы теоретической и прикладной механики, динамики естественных и искусственных небесных тел, гидроаэромеханики, физико-химической аэромеханики, механики деформируемого твёрдого тела, устойчивости и стабилизации механических и электромеханических систем, биомеханики, физической механики, применения методов искусственного интеллекта в задачах механики и истории механики.

Под редакцией:

Е.В. Кустовой, А.А. Тихонова, О.В. Куновой, Г.В. Павилайнен, А.В. Орехова.

ISBN 978-5-9651-1587-7

© Авторы, 2024

**Влияние нанолуглеродных добавок (графена, фуллеритов) на эффективность энергонасыщенных композиций пористого кремния с перхлоратами бария и натрия при воздействии импульсного электронного пучка**

*Побережная У.М.,<sup>1,2</sup> Морозов В.А.,<sup>3</sup> Кац В.М.,<sup>3</sup> Платонов П.С.,<sup>3</sup>  
Илюшин М.А.,<sup>1</sup> Зегря Г.Г.,<sup>2</sup> Савенков Г.Г.<sup>1,2</sup>*

*sav-georgij@yandex.ru*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),

190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московский пр., 26,

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26,

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,

199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

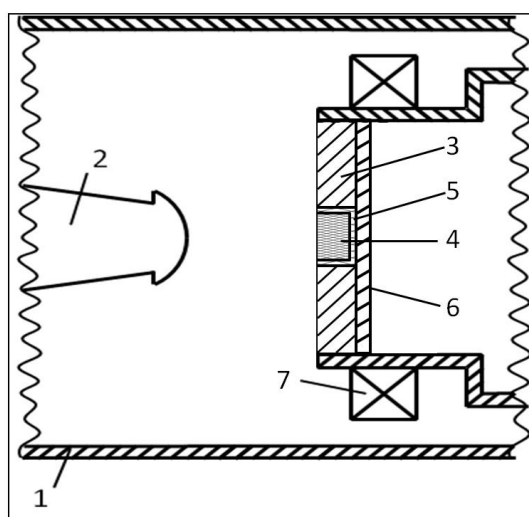
**Аннотация.** Представлены результаты экспериментов по воспламенению образцов при помощи сильнофокусированного пучка наносекундной длительности энергонасыщенных композитов (ЭНК) на основе пористого кремния с двумя окислителями — перхлоратом бария и перхлоратом натрия и двумя добавками — графеном и фуллеритами. Установлено, что с некоторой долей вероятности добавки являются своеобразными триггерами фазовых превращений в латунных колпачках, в которых находился запрессованный ЭНК.

*Ключевые слова:* энергонасыщенный композит, сильнофокусированный электронный пучок, пористый кремний, графен, фуллерит, быстрая экзотермическая реакция, горение.

В последние два десятилетия в мире возник устойчивый интерес к энергонасыщенным композитам (ЭНК) на основе пористого кремния (por – Si) (в качестве горючего) с различными окислителями [1]. Наиболее эффективными из них являются перхлораты, имеющие как высокое содержание кислорода, так и относительно высокую физическую и химическую стабильность по сравнению с другими окислителями. По мнению некоторых авторов наиболее оптимальный из перхлоратов для применения в ЭНК на основе пористого кремния — перхлорат натрия ( $\text{NaClO}_4$ ) [1]. Теплота ( $q$ ), выделяющаяся в условиях быстрой экзотермической реакции (которая инициируется различными внешними источниками и является горением композита) при взаимодействии por – Si с  $\text{NaClO}_4$  — 20 МДж/кг [2]. Для сравнения аналогичная теплота быстрой экзотермической реакции для гексогена (RDX) — 5,77 МДж/кг [3]. Расчеты теплового эффекта, проведенные нами в рамках стандартной вычислительной программы АСТРА-4, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана, для быстрой

экзотермической реакции взаимодействия пористого кремния с перхлоратом бария ( $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ ) дали значение  $q = 21,4$  МДж/кг.

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей ЭНК на основе пористого кремния с перхлоратом натрия и перхлоратом бария с добавками графена и фуллеренов при иницировании реакции сильноточным электронным пучком (СЭП) наносекундной длительности.



**Рис. 1.** Экспериментальная схема облучения пучком электронов образца: 1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — стальное кольцо, 4 — энергонасыщенная композиция, 5 — колпачок, 6 — подложка.

ностью 50 Вт в течение 30 минут при комнатной температуре. В результате  $\text{NaClO}_4/\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$  адсорбировался на стенках пор и равномерно распределялся в массе пористого кремния. В качестве добавок использовались многослойный (2 — 5 слоев) графен (Gr), который содержит гидроксильные группы  $\text{OH}-$ , в результате чего в таком графене содержится  $\sim 9\%$  кислорода, что увеличивает содержание окислителя в ЭНК, и фуллериты (со средним размером 30 — 50 нм). Фуллериты — системы, состоящие из молекул фуллеренов (которые в свою очередь являются сферическими многогранниками, состоящими, например, как в настоящей работе из 60 или 70 атомов углерода), имеют размеры в десятки нанометров и являются типичными полупроводниками, легко эмитирующими

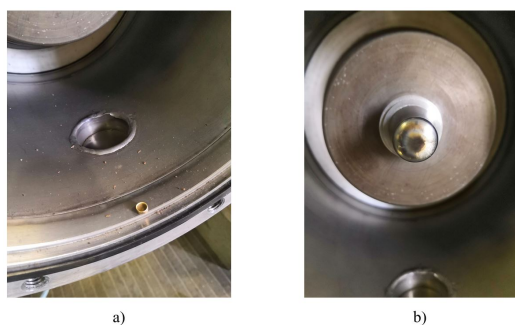
Соотношение между пористым кремнием и соответствующим окислителем в ЭНК составляло 50:50 (массовые доли). Пористый кремний с пористостью  $\sim 66 - 68\%$  был получен из пластин толщиной  $\sim 700 - 800$  мкм монокристаллического кремния, легированного бором (марка КДБ-100). Технология получения пластин пористого кремния, порошка (размер частиц порошка 35 — 45 мкм) из них и энергонасыщенного композита на основе  $\text{por} - \text{Si}$  изложена в работе [1, 4]. Раствор перхлората натрия или перхлората бария в этиловом спирте и порошок пористого кремния обрабатывали в ультразвуковой ванне «Сапфир» мощностью

свободные электроны при нагревании [5]. Массовое содержание фуллеритов и графена в ЭНК составляло 17% от суммарной массы пористого кремния и перхлората. Значение массового содержания добавок (17%) объясняется тем, что оно является значением перколяционного предела, при достижении которого в системе (в нашем случае в ЭНК) образуются перколяционные кластеры — цепочки контактирующих частиц (графена или фуллеритов), пронизывающие весь объем запрессованного ЭНК. Все ЭНК запрессовывали в латунные колпачки с внутренним диаметром 4,55 мм на высоту 1,6 — 1,7 мм (полная глубина колпачка 2,0 мм). Масса всех запрессованных ЭНК составляла 30 — 35 мг, плотность  $\rho \approx 1,1 - 1,3 \text{ г/см}^3$ . Внешний диаметр стального кольца, в которое устанавливался колпачок с составом — 30 мм. Стальное кольцо устанавливалось на стальную подложку толщиной 2,2 — 2,5 мм, под которую устанавливался датчик давления. Схема облучения образца (ЭНК) пучком приведена на рис. 1. В качестве электронного ускорителя использовалась установка ГКВИ — 300. Длительность импульса тока на его полувывсоте составляла 20 — 40 нс, средняя энергия электронов в пучке — 250 кэВ, расстояние между катодом и образцом — 4 мм, диаметр пучка — 8 мм.

Результаты экспериментов по иницированию исследуемых ЭНК приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты экспериментов по иницированию ЭНК.

№	ЭНК	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Результат	Примечание
1	por - Si + Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1,17 — 1,2	+	
2	por - Si + Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> + Gr (17% mass)	1,17 — 1,28	+	Колпачок в камере отсутствовал, на катоде частицы латуни
3	por - Si + Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> + Ф(17% mass)	1,17 — 1,2	+	Колпачок в камере отсутствовал, на катоде частицы латуни
4	por - Si + NaClO <sub>4</sub>	1,1 — 1,15	+	
5	por - Si + NaClO <sub>4</sub> + Gr (17% mass)	1,15 — 1,17	+	Выгорело ~ 2/3 массы ЭНК
6	por - Si + NaClO <sub>4</sub> + Ф (17% mass)	1,8 — 1,2	+	В одном образце выгорело ~ 1/4 массы ЭНК, в другом — ЭНК полностью сгорел



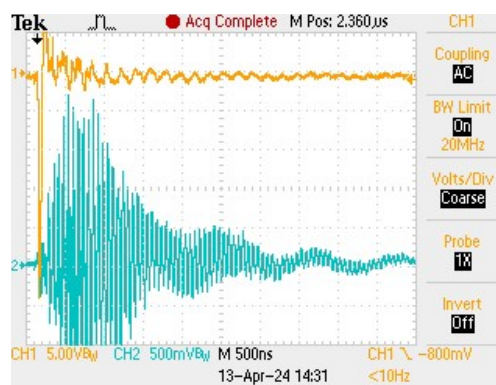
**Рис. 2.** Изображение камеры с колпачком (а) и вид катода с частицами латуни (б).

Прокомментируем результаты, приведенные в примечаниях строк 2 и 3. Во всех случаях полного выгорания ЭНК в колпачке, последний всегда находился в камере (рис. 2(а)). Однако в случаях 2 и 3 колпачок отсутствовал, а на катоде наблюдались частицы латуни, которые хорошо были заметны при его полировке для последующих экспериментов. Можно предполагать, что вследствие большого энерговыделения во время быстрой экзотермической реакции, а также воздействия катодного факела (взрыв микронеоднородностей на катоде из-за лавинообразного нарастания тока, вызванного джоулевым нагревом эмиттера), имеющего высокую температуру ( $\sim 5000$  К), колпачки могли испариться (температура кипения латуни  $\sim 1300$  К). Таким образом, существует вероятность того, что добавки графена или фуллеритов в ЭНК послужили неким триггером для фазовых превращений латунного колпачка.

Отсутствие аналогичных изменений при воздействии СЭП на ЭНК с перхлоратом натрия, а также неполное выгорание композитов с добавками может быть связано с меньшим энерговыделением при горении композита и с его большим критическим диаметром горения.

Зафиксированные на осциллограммах кривые давления (пример осциллограммы приведён на рис. 3) позволили оценить скорости горения ЭНК с перхлоратом натрия.

Оценки скорости горения ( $u_{\text{ign}}$ ) дали следующие значения: ЭНК без добавок —  $u_{\text{ign}} \approx 350 - 400$  м/с, ЭНК с добавками —  $u_{\text{ign}} \approx 400 - 480$  м/с. Таким об-



**Рис. 3.** Осциллограмма процессов при испытании образца ЭНК с графеном (строчка 5 в таблице 1): 1 — кривая импульса напряжения; 2 — кривая импульса давления.

разом, и в этом случае добавки являются каталитическими элементами. Для сравнения, скорость горения пористого кремния без окислителя находится в диапазоне  $u_{\text{ign}} \approx 20 - 25$  м/с.

### Литература

- [1] Савенков Г. Г., Зегря А. Г., Зегря Г. Г., Румянцев Б. В., Синани А. Б., Михайлов Ю. М. Возможности энергонасыщенных композитов на основе нанопористого кремния (обзор и новые результаты) // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 3. С. 397–403.
- [2] Abraham A., Nicholas W., Piekiet N. W., Christopher J., Morris C. J., Dreizin E. L. Combustion of Energetic Porous Silicon Composites Containing Different Oxidizers // Propell. Explos. Pyrot. 2016. Vol. 41. P. 179–188.
- [3] Физика взрыва. Т. 1. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. 832 с.
- [4] Савенков Г. Г., Козачук А. И., Побережная У. М., Фрейман В. М., Зегря Г. Г. Скорость горения порошкообразного пористого кремния в условиях ограниченного пространства // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 47. № 4. С. 7–10.
- [5] Kratschmer W., Lamb L. D., Fostiropoulos K., Huffman D. R. Solid C60: a new form of carbon // Nature. 1990. Vol. 347. P. 354–358.

## Исследование динамики температуры следа СВЧ разряда с лазерной безыскровой инициацией при различных давлениях

*Ренев М. Е., Добров Ю. В., Лашков В. А., Машек И. Ч.,  
Хоронжук Р. С.*

*renevme@mail.ru, youdobrov@gmail.com, youdobrov@gmail.com,  
Igor.Mashek@gmail.com, khoronzhuk@gmail.com*

Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Аннотация.** В статье проведено исследование лазерно-иницированного СВЧ-разряда, был определен порог зажигания микроволнового разряда в воздухе при различных давлениях, как без инициации, так и с использованием лазерной безыскровой инициации (он равен 50 и 80 Торр). Была получена динамика температуры нагрева в следе микроволнового разряда с лазерной инициацией в диапазоне давлений от 40 до 75 Торр с использованием интерферометрии. Оказалось, что при давлении среды 40 Торр (меньше порога зажигания) использование лазерной инициации приводит к повышению температуры следа на 110 К. Зафиксирован значительный нагрев газа в следе инициированного разряда, достигающий 1100–1300 К при 40–75 Торр.

**Ключевые слова:** СВЧ-разряд, лазерная безыскровая инициация, подкритический разряд, интерферометр, измерение температуры.