

06

Скорость горения и время срабатывания воспламенительных составов на основе пористого кремния

© Г.Г. Савенков^{1,2}, У.М. Побережная^{1,2}, А.И. Козачук², В.М. Фрейман², А.Г. Зебря², Г.Г. Зебря²¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2024 г.

В окончательной редакции 23 ноября 2024 г.

Принято к публикации 3 декабря 2024 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению скорости горения воспламенительных составов на основе двух типов легированного (бором или мышьяком) пористого кремния в качестве горючего с перхлоратными окислителями.

Ключевые слова: пористый кремний, перхлораты, скорость горения, энергонасыщенный композит.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60074.20151

В настоящее время перед разработчиками патронов к гражданскому (охотничьему и спортивному) стрелковому оружию стоит задача по разработке и внедрению в них (патронах) новых экологически чистых и эффективных энергетических материалов. Первый элемент любого патрона стрелкового оружия — капсуль-воспламенитель (КВ), который состоит из оболочки (чашечки) и воспламенительного состава (ВС). Как за рубежом, так и в России гражданские КВ максимально унифицированы с военными образцами [1].

Как правило, в рецептуру воспламенительного состава, представляющего собой механическую смесь, входят инициирующее взрывчатое вещество (ИВВ) и пиротехнический состав. Последний состоит из окислителя, горючего, различных инертных добавок, связующих и взрывчатых добавок (тетразен, тетранитропентаэритрит (ТЭН)), повышающих чувствительность к удару и наколу [1]. В качестве ИВВ применяются гремучая ртуть, тринитрорезорцинат свинца (ТНРС), азиды свинца, кадмия и серебра и др. Применение ИВВ обусловлено одним из главных требований, предъявляемых к воспламенительным составам, — обеспечением времени срабатывания в пределах 20–40 μs [1]. Следует отметить, что существует проблема, связанная с повышением надежности (зависит в основном от чувствительности состава) и уменьшением времени срабатывания капсуль-воспламенителя. Некоторые разработчики КВ предлагают решить данную проблему путем совершенствования конструкции самого КВ [2].

Как видно из приведенного состава ИВВ они являются (по большей части) солями тяжелых металлов (ртуть, свинец, кадмий), что не обеспечивает требования по экологии производства и эксплуатации, поскольку указанные металлы, накапливаясь в экосистемах и живых организмах, вызывают негативные последствия. Кроме того, добавка ИВВ или псевдо-ИВВ (ТНРС) в рецептуру

воспламенительного состава усложняет производство КВ и снижает его безопасность.

Решением указанных проблем является применение экологически чистых составов, не содержащих и не образующих токсичных веществ в процессе производства и эксплуатации, чувствительность которых находится на уровне чувствительности штатных ВС. При этом время срабатывания таких экологически чистых составов должно быть не более времени срабатывания штатных ВС. Заметим, что в США пошли двумя параллельными путями: первый связан с разработкой принципиально новых пиротехнических составов, которые не требуют ИВВ, второй — с заменой ИВВ на промежуточные между инициирующими и бризантными взрывчатыми веществами, которые лишены недостатков, присущих классическим ИВВ [3].

В нашем случае представляется перспективным направлением применение порошков сильно легированных бором (КДБ) или мышьяком (КЭМ) до концентрации 10^{19} cm^{-3} пористого кремния (в качестве горючих) с различными окислителями, которые заполняют наноразмерные поры горючего. Размер пор и толщина стенок пористого кремния (*por-Si*) приводят к тому, что получаемый энергонасыщенный композит (ЭНК) (*por-Si* + окислитель) подобен индивидуальному энергонасыщенному материалу, в котором горючее и окислитель находятся в одной молекуле.

Поскольку время срабатывания ВС определяется скоростью его горения при прочих равных геометрических параметрах и материале оболочки КВ, определение данной характеристики для наиболее известных составов *por-Si* + окислитель является достаточно актуальной задачей, решению которой и посвящена настоящая работа.

Скорость горения определялась для следующих энергокомпозигов: 1) КДБ + перхлорат натрия (ПХН) (NaClO_4), масса компонентов: КДБ — 10 mg, NaClO_4 — 10 mg; 2) КЭМ + перхлорат кальция

Значения параметров процесса взрывчатого превращения ЭНК

№ п/п	Энергокомпозит	por-Si/окислитель, mg/mg	Время срабатывания, μs	Скорость горения, m/s
1	КДБ+ПХН	10/10	13.4	75
2		10/10	11.0	90
3		10/10	12.0	83
4	КЭМ+ПХК	10/5	8 ± 2	120 ± 30
5	КДБ+АДНА	10/10	6.4	156
6	КДБ+ПХБ	10/10	14 ± 3	70 ± 20

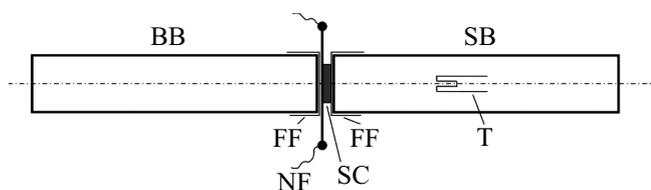


Рис. 1. Схематическое изображение образца, закрепленного между двумя мерными стержнями тензодатчика. SB — измерительный стержень с тензометрическим датчиком Т ($d = 8 \text{ mm}$), ВВ — опорный стержень ($d = 8 \text{ mm}$), SC — образец, FF — фторопластовая пленка толщиной $100 \mu\text{m}$, NF — нихромовая фольга (тепловой инициатор).

(ПХК) ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$), масса компонентов: КЭМ — 10 mg , $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$ — 5 mg ; 3) КДБ + перхлорат бария (ПХБ) ($\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$): КДБ — 10 mg , ПХБ — 10 mg ; 4) КДБ + аммониевая соль динитрамида (АДНА) ($\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$): КДБ — 10 mg , АДНА — 10 mg . Таким образом, масса горючего равнялась массе окислителя. Исключение составляет состав КЭМ+ПХК, в котором масса горючего в 2 раза больше массы окислителя, т.е. состав испытывал недостаток окислителя. Как правило, окислитель должен присутствовать в избытке [4].

Методика получения порошков пористого кремния и их характеристики приведены в работе [5], методика получения ЭНК (por-Si + окислитель) — в работе [6].

Полученные воспламенительные составы запрессовывались под давлением 100 MPa до высоты 1.0 mm (высота запрессованных штатных ВС в КВ $\leq 1 \text{ mm}$) в алюминиевые колпачки диаметром 8 mm и высотой 1.5 mm .

Испытания проводились на экспериментальной установке, по сути являющейся установкой, реализующей метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона [7]. Экспериментальная установка представляет собой систему из двух стержней, изготовленных из высокопрочной стали, на одном из которых наклеен тензодатчик, с которого снимается информация о деформации стержня (рис. 1). С помощью данных о деформации стержня можно определять давление продуктов взрывчатого превращения (в нашем случае — горения)

ЭНК и время их срабатывания. Расчет амплитуды давления (p_{max}) осуществляется по амплитуде механических напряжений, сопровождающих вызванную взрывчатым превращением волну деформаций в стержне, и производится по формуле

$$p_{\text{max}} = \sigma = \frac{\Delta U E S_1}{I R_0 k S_0},$$

где ΔU — импульс напряжения на осциллограмме, $I = 15 \text{ mA}$ — ток в тензодатчиках, $R_0 = 200 \Omega$ — сопротивление тензометров, $E = 200 \text{ GPa}$ — модуль Юнга материала измерительного и опорного стержней (мягкие стали), $k = 2$ — коэффициент тензочувствительности, S_1 — площадь сечения измерительного стержня, S_0 — площадь торцевой поверхности образца.

Время срабатывания энергетического состава в колпачке определяется по временной развертке на осциллографе. Соответствующим пересчетом (высота заряда, деленная на время срабатывания) находится скорость горения.

Типичные (обработанные) сигналы с тензодатчика, отображаемые на осциллограммах, представлены на рис. 2. В таблице приведены данные, полученные в результате обработки осциллограмм.

Анализ результатов, представленных в таблице, показал следующее.

1. Все исследованные воспламенительные составы при толщине навески 1 mm имеют значения времени срабатывания значительно ниже, чем у штатных воспламенительных составов ($20\text{--}40 \mu\text{s}$) (см. выше). При этом наименьшим временем срабатывания (и соответственно наибольшей скоростью горения) обладает состав КДБ+АДНА: оно практически в 2 раза меньше, чем у других исследованных составов.

2. Полученные скорости горения исследованных ВС на порядки превышают скорости горения быстрогорящих ИВВ (\sim десятки и сотни mm/s) [8].

3. Состав КЭМ+ПХК, несмотря на недостаток окислителя, имеет низкое значение времени срабатывания (на уровне состава КДБ+АДНА) и высокую скорость горения, что может указывать на высокие окисляющие характеристики перхлората кальция и более высокие

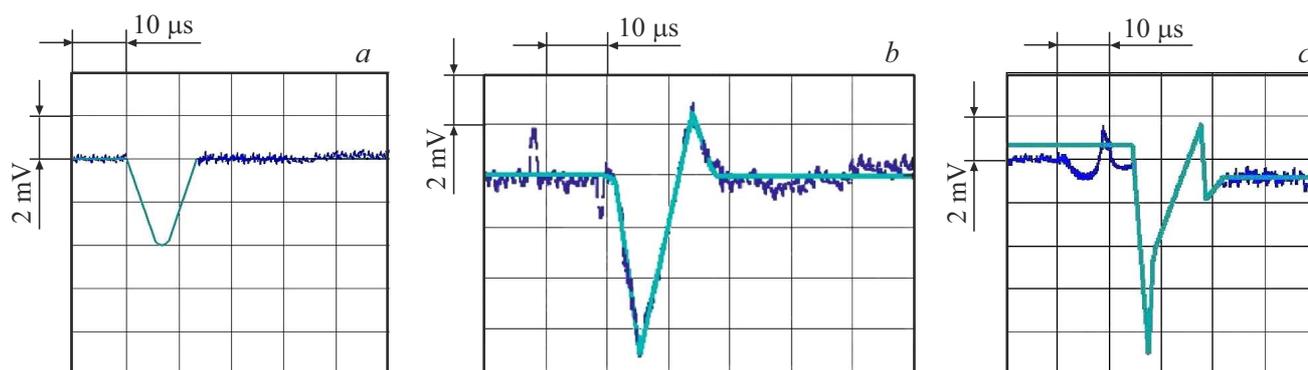


Рис. 2. Обработанные осциллограммы импульсов деформации в инертных стержнях. *a* — КДБ+NaClO₄, *b* — КЭМ + Ca(ClO₄)₂, *c* — КДБ+NH₄N(NO₂)₂.

энергетические характеристики пористого кремния, легированного мышьяком.

Таким образом, можно констатировать, что воспламенительные составы на основе пористого кремния имеют несомненную перспективу применения в КВ современного и перспективного стрелкового оружия.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00426.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Г. Джангирян, Д.В. Фадеев, В.Н. Агеев, В.С. Кругликов, А.В. Шабров, *Производство капсулей-воспламенителей* (ИД „Весь Сергиев Посад“, Сергиев Посад, 2015).
- [2] В. Жарков, *Оружейный журн. „Калашников“*, № 2 (2017).
- [3] T.M. Massis, in *Proc. of the Twenty-Seventh DoD Explosives Safety Seminar* (Las Vegas, NV, 1996). ADM00076.
- [4] П.С. Гринчук, О.С. Рабинович, *Физика горения и взрыва*, **40** (4), 41 (2004). [P.S. Grinchuk, O.S. Rabinovich, *Combust. Explos. Shock Waves*, **40** (4), 408 (2004). DOI: 10.1023/B:CESW.0000033563.66432.1c].
- [5] Г.Г. Савенков, А.И. Козачук, У.М. Побережная, В.М. Фрейман, Г.Г. Зегря, *Письма в ЖТФ*, **47** (4), 7 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.04.52076.18994 [G.G. Savenkov, A.I. Kozachuk, U.M. Poberezhnaya, V.M. Freiman, G.G. Zegrya, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (Suppl. 3), S292 (2023). DOI: 10.1134/S1063785023010297].
- [6] Г.Г. Савенков, А.Г. Зегря, Г.Г. Зегря, Б.В. Румянцев, А.Б. Синани, Ю.М. Михайлов, *ЖТФ*, **89** (3), 397 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47175.271-18 [G.G. Savenkov, A.G. Zegrya, G.G. Zegrya, B.V. Rumyantsev, A.B. Sinani, Yu.M. Mikhailov, *Tech. Phys.*, **64** (3), 361 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219030204].

- [7] А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов, *Экспериментальное обеспечение расчетных оценок динамической прочности конструкции* (ННГУ, Н. Новгород, 2020).

- [8] К.К. Андреев, А.Ф. Беляев, *Теория взрывчатых веществ* (Оборонгиз, М., 1960).