

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.22.2

СВОЙСТВА ДВУХ- И ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

© 2021 г. М. В. Агеев¹, Ю. Н. Ведерников¹, Г. Г. Зегря², А. С. Мазур³,
У. М. Побережная³, В. К. Попов¹, Г. Г. Савенков^{2, 3*}

¹Научно-производственное предприятие “Краснознамёнец”, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2020;

после доработки 12.09.2020;

принята в печать 20.10.2020

Представлены результаты экспериментов по определению чувствительности к удару и навалу, а также к времени срабатывания взрывчатых композиций на основе пористого кремния с различными окислителями и флегматизирующими или инертными добавками. Проведено сравнение полученных результатов с данными по времени срабатывания штатных воспламенительных составов и инициирующих взрывчатых веществ.

Ключевые слова: энергонасыщенный композит, пористый кремний, инициирующее взрывчатое вещество, удар, навал, время срабатывания.

DOI: 10.31857/S0207401X2103002X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одними из перспективных направлений исследований в прикладной физике горения и взрыва являются разработки, связанные с созданием так называемых “зеленых” энергетических материалов, например ударно-воспламенительных составов (УВС) для капсулей-воспламенителей или капсулей-детонаторов, на основе структурированного на наноуровне кремния [1–9], как монокристаллического, так и пористого.

В современных капсулях-воспламенителях как ударного, так и напольного действия рецептуры капсульных составов не отличаются друг от друга, но они могут различаться по соотношению компонентов. Так, процентное содержание инициирующих взрывчатых веществ (ВВ) в капсульных составах для капсулей-воспламенителей напольного действия больше, чем для капсулей-воспламенителей ударного действия [10].

Существующие составы для капсулей-воспламенителей подразделяются обычно на шесть типов [10]: 1) гремучертутные корродирующие; 2) корродирующие без гремучей ртути; 3) гремучертутные некорродирующие; 4) некорродирующие без гремучей ртути (на основе соединений свинца); 5) перспективные составы без соединений свинца — на основе соединений динитроди-

азофенола, щелочных солей нитробензофуороксанов, стронция диазодинитрорезорцината, органических азидов и других; 6) прочие составы — составы с использованием крайне редко применяющихся компонентов: красного фосфора, стабана-тов (комплексных солей нитраминотетразола и стифната свинца). То есть пять из шести типов УВС (кроме пятого типа) содержат крайне экологически грязные вещества и соединения. Таким образом, исходя из сложившегося положения в капсульной промышленности, можно утверждать, что исследования, направленные на создание новых экологически чистых (“зеленых”) ударно-воспламенительных составов, в настоящее время весьма актуальны.

В принципе, кремний как горючее в пиротехнических малогазовых составах применялся еще в начале тридцатых годов прошлого века [11]. Но в целом применение кремния в качестве горючего в пиротехнических составах было ограничено, что связано с трудностью его окисления даже при применении самых энергичных окислителей [12].

Однако с развитием технологий получения высокодисперсного и нанодисперсного кремния (n-Si) и применения его в различных энергонасыщенных составах было установлено [13], что уменьшение размера частиц кремния приводит к существенному увеличению скорости его горения.

Так, при сбалансированном содержании кислорода скорость горения наноразмерных частиц кремния приблизительно в два раза выше по сравнению с кремнием с частицами микронного (μ -Si) размера. При этом состав μ -Si/ KClO_4 (перхлорат калия) горит со скоростью менее 5 мм/с, в то время как механоактивированный композит n -Si/ KClO_4 горит с уникально высокими скоростями взрывного горения: 180–640 м/с (в зависимости от плотности и соотношения компонентов) [4].

Композиции на основе пористого кремния (por-Si), в принципе, могут заменить штатные капсульные (ударно-воспламеняемые или даже детонирующие) составы и ВВ (в частности, ТЭН), так как они показали достаточный уровень чувствительности к простым начальным импульсам [8, 14]. Кроме того, благодаря уникальной пористой структуре кремния связь последнего с окислителем осуществляется почти на молекулярном уровне, т.е. мы имеем некое приближение к индивидуальному взрывчатому веществу. И наконец, применение кремния в качестве горючего выгодно и с точки зрения его распространенности при использовании в качестве сырья в полупроводниковой промышленности. К тому же сам процесс изготовления ВВ на основе por-Si совместим с методами изготовления микроэлектромеханических систем, что позволяет изготавливать ВВ как неотъемлемый элемент этой системы в процессе серийного производства

Однако данных по ряду характеристик (например, по скорости горения) составов на основе por-Si в литературных источниках нет. Для ряда составов на основе пористого кремния, как для двухкомпонентных, так и трехкомпонентных, отсутствуют данные и по чувствительности. Поэтому в настоящей работе авторы постарались восполнить указанные пробелы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследуемые составы на основе por-Si и технология их получения

Пористый кремний с размерами пор 10–20 нм для составов получали из пластин монокристаллического кремния марки КДБ-100 по технологии, описанной в работе [9]. В результате получали порошок por-Si со средним размером частиц 30–40 мкм. По классификации Международного союза по чистой и прикладной химии (IUPAC) полученный нами пористый кремний относится к мезопористым структурам.

В качестве окислителей в настоящей работе применялись перхлораты натрия (NaClO_4) и бария (BaClO_4)₂, а также нитрат кальция ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), ТЭН и аммониевая соль динитрамида (АДНА, $(\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2)$) [15]. Выбор окислителей обусловлен их простотой, доступностью (кроме последнего) и

высокой растворимостью в широко распространенных и легколетучих растворителях. Кроме того, учитывался их кислородный эквивалент – масса окислителя в граммах, которая требуется для выделения 1 г кислорода при полном (или неполном) его восстановлении [8]. Выбор соли динитрамида обусловлен тем, что она является перспективным бесхлорным окислителем смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ), обладающим лучшими энергетическими характеристиками по сравнению с традиционно используемым в СТРТ перхлоратом аммония [15].

Кроме бинарных составов исследованию подвергались трехкомпонентные композиции (с добавками). В первую очередь это связано с тем, что, как показали испытания бинарных составов [8], они оказались достаточно чувствительными к механическим воздействиям. А в ряде конструкций капсулей-воспламенителей имеется деталь – наковаленка [16], в которую упирается ударный состав, и при досылке наковаленки в оболочку капсуля может произойти несанкционированное срабатывание состава. Поэтому необходимы флегматизирующие добавки, чтобы устранить такое срабатывание. В качестве флегматизирующих добавок применялись ТЭН, многослойный (5–10 слоев) графен (Gr), эпоксидно-полиамидный клей марки ОК-15.

Взрывчатые композиции (ВК) изготавливали по так называемой “мокрой” технологии. Навеска порошка por-Si, засыпанная в сборку (матрица с внутренним диаметром 5 мм) для испытаний, пропитывалась насыщенным раствором окислителя путем закапывания. Количество капель рассчитывали так, чтобы после испарения растворителя массовое соотношение между окислителем и порошком por-Si было на уровне 1 : 1, а полная масса навески взрывчатой композиции составляла 0.012 ± 0.002 г.

После того как навеска нанопористого кремния пропитывалась раствором окислителя, ее прессовали на прессе под удельным давлением 100 МПа и ставили сушиться в термостат при температуре 60 °С до полного высыхания. После высыхания путем взвешивания контролировалась масса навески взрывчатой композиции.

Так как после высыхания чувствительность композиций резко возрастала (как и вероятность срабатывания от несанкционированного срабатывания), снаряжение состава (закапывание окислителя) проводили непосредственно в сборке для проведения испытаний. Введение в состав добавок проводилось перед закапыванием. Рецепт исследованных трехкомпонентных составов приведена в табл. 1. Выбор процентного содержания графена будет объяснен ниже.

Кроме исследованных составов на основе por-Si для сравнения были проведены испытания

Таблица 1. Рецептатура составов

Взрывчатая композиция	Компонент		
	Содержание, %		
por-Si + NaClO ₄ + Gr	<u>por-Si</u> 38.5	<u>NaClO₄</u> 53.8	<u>Gr</u> 7.7
por-Si + Ba(ClO ₄) ₂ + ОК-15	<u>por-Si</u> 50.0	<u>Ba(ClO₄)₂</u> 50.0	<u>ОК-15</u> 2(сверх 100%)
por-Si + Ba(ClO ₄) ₂ + ОК-15	<u>por-Si</u> 50.0	<u>Ba(ClO₄)₂</u> 50.0	<u>ОК-15</u> 10(сверх 100%)

капсюльного ударного неоржавляющего модернизированного состава УНМТ (тротильный эквивалент – 0.66). Его рецептатура приведена в табл. 2.

Методики испытаний

на чувствительность ВК к удару и трению

Для определения чувствительности исследуемых ВК к удару использовался вертикальный копер В.С. Козлова К-44-1 [17]. Испытания проводили по методике “Определение чувствительности к удару продуктов, соответствующих ГОСТ 1905-78 и составов на их основе”, разработанной в АО “НПП “Краснознамёнец”.

По штатной методике матрицу с прессованной навеской ВК массой (0.012 ± 0.002) г вставляют в цилиндрическое гнездо копра. В отверстие матрицы помещают отполированный и тщательно проверенный стальной боек с ударной площадкой длиной (1.20 ± 0.02) мм [8]. Груз массой 200 г сбрасывается с соответствующей высоты. Максимальная высота падения груза – 25 см. В соответствии с ГОСТ 4545-88 за взрыв принимают взрывчатое превращение, сопровождаемое звуковым эффектом или пламенем. Испытания на чувствительность ВК к трению проводились на копре К-44-3 в соответствии с ГОСТ Р 50835-95.

Методика испытаний на время срабатывания ВК при ударе и наколе

Испытания как при ударе, так и при наколе проводили с помощью копра К-44-1, а также пьезоэлектрического и фотодатчиков. Схема установки для определения времени срабатывания ВК представлена на рис. 1.

Снаряженную сборку вставляли в корпус, внутри которого находился пьезоэлектрический датчик. Сверху сборку закрывали крышкой с закрепленным световодом. В центре крышки сделано отверстие для бойка (или жала), на который падал груз.

При сбрасывании груза 1 (рис. 1) он ударяет по бойку 2 и запускает развертку осциллографа (вход, 2.5 В). Сигнал при ударе генерируется на пьезодатчике и записывается на канале 2 развертки

Таблица 2. Компоненты штатного состава УНМТ

Компонент	Содержание, %
ТНПС (C ₆ H(NO ₂) ₃ (OPb) ₂)	38 ± 3
Нитрат бария (Ba(NO ₃) ₂)	32 ± 3
Сульфид сурьмы (Sb ₂ S ₃)	15 ± 2
Цирконий	7 ± 2
ТЭН (C(CH ₂ ONO ₂) ₄)	5 ± 2
Тетразен (C ₂ H ₆ N ₁₀ · H ₂ O)	3 ± 1

осциллографа. При вспышке состава свет по световоду 8 попадает на фотодиод 7 и фиксируется по отклонению луча 1 развертки осциллографа.

Испытания при наколе проводили по той же схеме, вставляя вместо бойка короткое закаленное до твердости (42±63)HRC₃ жало (рис. 2) из стали У10. Высота падения груза – 6 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты испытаний

на чувствительность ВК к удару и трению

Результаты испытаний на чувствительность к удару и трению взрывчатых бинарных компози-

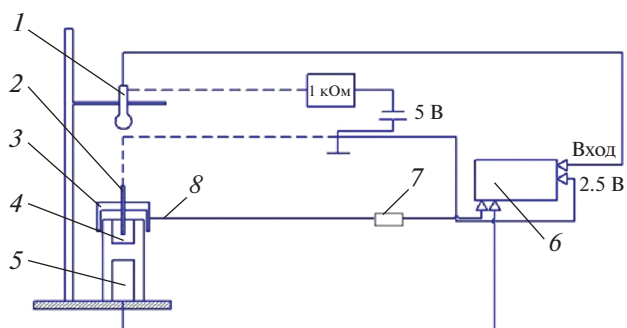


Рис. 1. Функциональная схема установки для определения времени срабатывания: 1 – груз массой 200 г, 2 – боек, 3 – крышка испытательной сборки, 4 – сборка с запрессованным составом, 5 – пьезодатчик, 6 – осциллограф, 7 – фотодиод, 8 – световод.

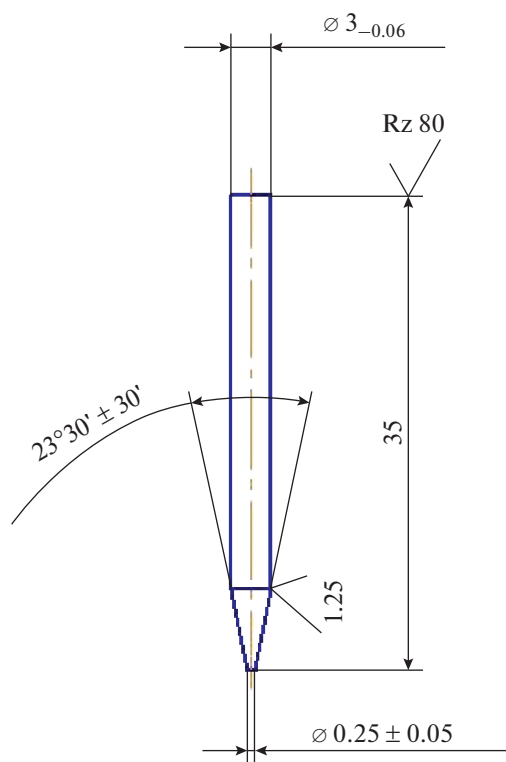


Рис. 2. Конструктивная схема короткого жала.

ций $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4$, $\text{por-Si} + \text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ и $\text{por-Si} + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ приведены в работе [8]. Бинарная композиция $\text{por-Si} + \text{ТЭН}$ была нечувствительна

Таблица 3. Чувствительность к удару трехкомпонентных составов

Композиция (состав)	H_0 , см	H_{50} , см	H_{100} , см
$\text{por-Si} + \text{NaClO}_4 + \text{Gr} (3 : 1)$	2.0	3.0	4.0
$\text{por-Si} + \text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 + \text{OK-15}$ (2% ОК-15)	—	0.5	1.5
$\text{por-Si} + \text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 + \text{OK-15}$ (10% ОК-15)	3.0	5.5	10.5
УНМТ	2	—	3

Таблица 4. Время срабатывания бинарных композиций

Окислитель	Время срабатывания, мкс
$\text{NaClO}_4 (3 : 1)$	376
NaClO_4 (вода)	1500
$\text{NaClO}_4 (1 : 1)$	1600
NaClO_4 (ацетон)	240
$\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ (ацетон)	212–408

Примечание: в скобках указаны растворители и соотношения между ацетоном и водой в смешанном растворителе; разброс по времени составляет 100–130 мкс.

к удару на копре К-44-1, что можно объяснить слишком большим критическим диаметром горения композиции по отношению к малой площади торцевой поверхности бойка. Верхний предел чувствительности к трению, определенный на копре К-44-3, у данной композиции оказался равен $P_{100} = 1000$ МПа, нижний предел $P_0 = 300$ МПа, что значительно выше, чем у бинарных композиций, исследованных в работе [8].

Композиция $\text{por-Si} + \text{АДНА}$ также обладала существенно меньшей чувствительностью к удару на копре К-44-1 по сравнению с классическими инициирующими взрывчатыми веществами и бинарными композициям [8]. Нижний предел чувствительности к удару для этой композиции равен $H_0 = 23$ см, верхний предел чувствительности, H_{100} , для этой композиции установить не удалось (так как на копре К-44-1 максимальная высота падения груза равна 25 см).

Результаты испытаний на чувствительность к удару на копре К-44-1 трехкомпонентных композиций приведены в табл. 3. Кроме испытаний композиции с процентным содержанием графена, указанным в табл. 1, проводились испытания и с другими массовыми долями Gr: от 10 до 25%. При таких значениях массовой доли графена чувствительность ВК к удару резко снижалась, и отказы происходили уже на высоте 23 см.

Поскольку мотивацией работы, кроме указанной во Введении, была в том числе и разработка состава с чувствительностью на уровне штатного, то эмпирически были определены массовая доля графена для композиции, представленной в табл. 1, а также рецептура растворителя. Растворителем для NaClO_4 в данной композиции служила смесь ацетона и воды в соотношении 3 : 1. Композиция с указанными параметрами и участвовала в расширенных испытаниях.

Как следует из результатов, представленных в табл. 3, составы с содержанием 2–5% полимеров сверх 100% оказались слишком чувствительны к механическим воздействиям: состав на основе перхлората бария с добавкой с 2% ОК-15 срабатывал на копре К-44-1 при сбросе груза с высоты 0.5 см. Вероятно, добавка клея приводила к более резкому нарастанию давления в очаге возбуждения. Введение 10% полимера в состав значительно снижало чувствительность, но вместе с ней снижался и режим взрывчатого превращения: состав при ударе просто выгорал (без звуковых эффектов).

Так как величина H_{100} для штатного состава УНМТ меньше, чем для композиции $\text{Si} + \text{NaClO}_4 + \text{Gr}$, то чувствительность к удару у УНМТ несколько выше.

*Результаты испытаний
на время срабатывания ВК при ударе*

Результаты испытаний на время срабатывания бинарных ВК $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4$ (с различными растворителями) приведены в табл. 4. Пример осциллограммы срабатывания бинарной композиции с перхлоратом бария представлен на рис. 3.

Результаты испытаний на время срабатывания разработанной композиции $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4 + \text{Gr}$ (из табл. 1 и 3), а также штатного состава УНМТ представлены в табл. 5. На рис. 4 приведены примеры типичных осциллограмм процесса их срабатывания. Анализ результатов, представленных в табл. 4 и 5, показывает, что: 1) время срабатывания бинарных композиций с перхлоратом натрия существенно выше, чем у разработанного состава $\text{por-Si} + \text{графен} + \text{NaClO}_4$; 2) время срабатывания

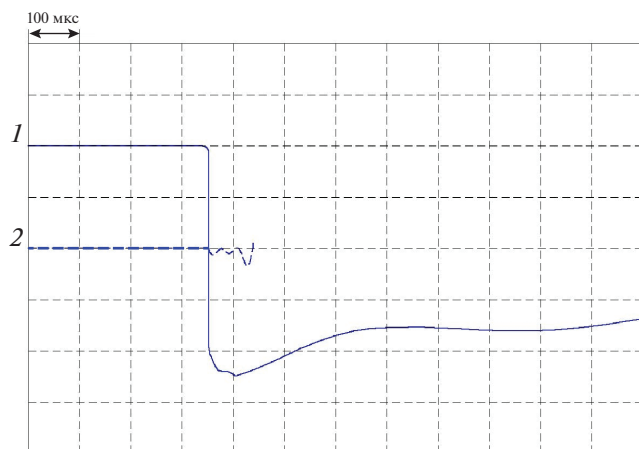


Рис. 3. Осциллограмма срабатывания композиции $\text{por-Si} + \text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ при ударе: 1 — сигнал с фотодатчика, 2 — сигнал с пьезодатчика.

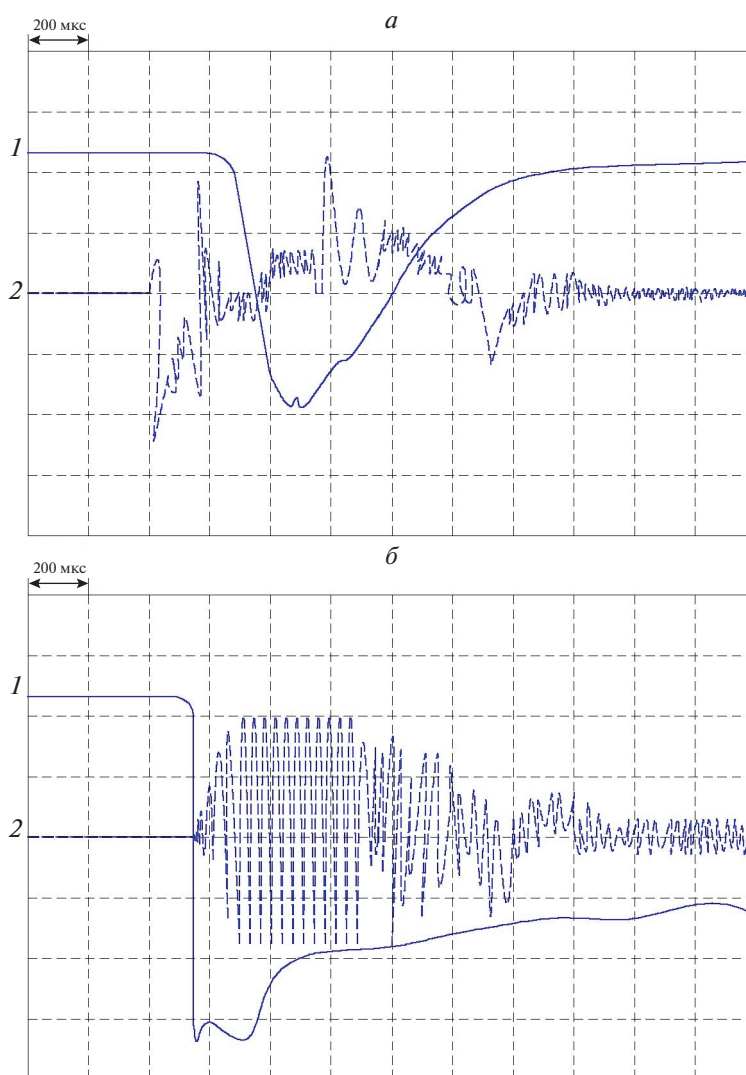


Рис. 4. Осциллограммы срабатывания составов $\text{por-Si} + \text{Gr} + \text{NaClO}_4$ (а) и УНМТ (б) при ударе: 1 — сигнал с фотодатчика, 2 — сигнал с пьезодатчика.

Таблица 5. Время срабатывания композиции и состава УНМТ

Композиция	Время срабатывания, мкс (разброс, %)
por-Si + NaClO ₄ + Gr	152–204 (29)
УНМТ	296–544 (59)

композиции por-Si + графен + NaClO₄ в 2–3 раза меньше, чем у штатного состава УНМТ.

Результаты испытаний на время срабатывания ВК при наколе

Поскольку композиция por-Si + Ba(ClO₄)₂ срабатывала при установке жала в крышку, т.е. данная композиция оказалась очень чувствительной к наколу, то в дальнейших испытаниях она не участвовала. Результаты испытаний к наколу разработанного состава por-Si + графен + NaClO₄ приведены в табл. 6, а примеры осциллограмм — на рис. 5.

Дадим некоторые пояснения относительно приведенных осциллограмм. Начальная запись

давления с пьезодатчика относительно начала запуска развертки происходит по-разному, что связано с разной амплитудой волны сжатия, которая приходит на датчик (разная акустическая жесткость составов), а также, возможно, с недостаточной чувствительностью датчика в данной постановке, поскольку он находится за роликом сборки копра К-44-1 в металлическом корпусе. Поэтому запуск осуществляется с внешнего входа при ударе грузом весом 200 г. Датчик хорошо работает при испытаниях на копке К-44-2. Дребезг на осциллограмме при работе пьезодатчика связан не с наводками, а с частотой работы самого датчика (10 МГц), который работает без фильтра и усилителя, а сигнал на осциллограф поступает через простую R–C-цепочку. Датчик в данной постановке эксперимента не является измерительным инструментом, а фиксирует удар. Например, на рис. 5 накольный малогазовый пиротехнический состав срабатывает почти в отсутствие давления.

Для сравнения были проведены испытания на время срабатывания термостойкого накольного состава, представляющего собой малогазовый замедлительный состав Kp45Cc55, запрессованный

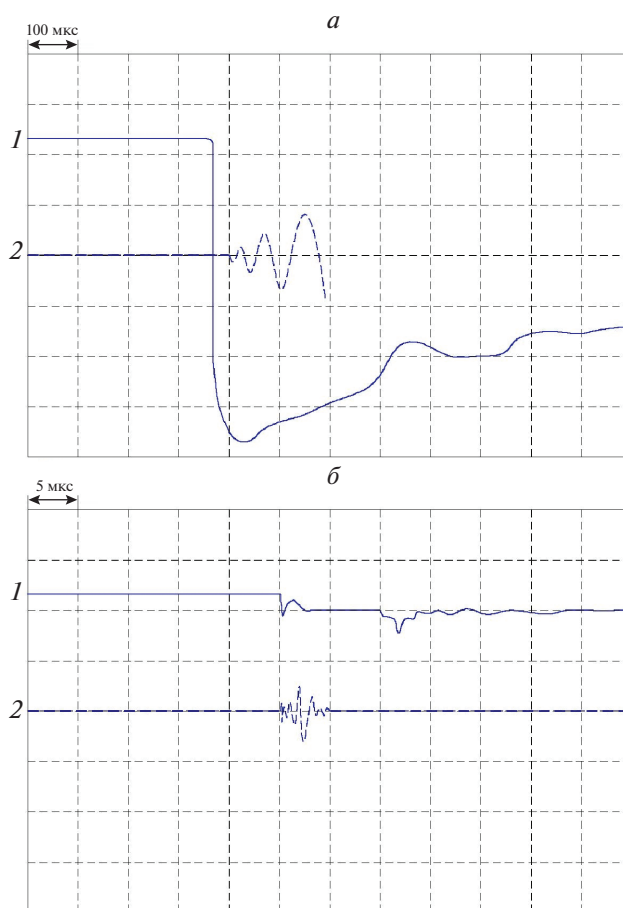


Рис. 5. Осциллограммы срабатывания составов por-Si + Gr + NaClO₄ (а) и Kp45Cc55 (б) при наколе: 1 — сигнал с фотодатчика, 2 — сигнал с пьезодатчика.

Таблица 6. Время срабатывания составов от накола жалом

Состав	Масса навески, г	Давление прессования, МПа	Время срабатывания, мс
por-Si + Gr + NaClO ₄ Kp45Cc55	0.012	100	0.168
	0.135	500	15
por-Si + Cc55	0.05	100	
	0.135	500	<1 мс
	0.05	100	

под давлением 500 МПа, который применяется в гражданских СИ (КВ-Н-11 и КД-Н-13). Рецепт-ура: Kp45Cc55 – микрокристаллический кремний с размером частиц 5–10 мкм – 45%, свинцовый сурик – 55%. Результаты испытаний на время срабатывания ВК также приведены в табл. 6.

И, наконец, в табл. 6 приведены результаты испытаний следующего состава: механическая смесь por-Si – 45% и свинцовый сурик – 55%. Замена микрокристаллического кремния на пористый привела к тому, что время срабатывания такого состава уменьшилось более чем на полтора порядка, что в целом может резко повысить надежность работы детонаторов. Как следует из результатов, представленных в табл. 6, время срабатывания композиции por-Si + Gr + NaClO₄ (3 : 1) не зависит от вида инициирования (удара или накола).

ВЫВОДЫ

На основе результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Бинарные композиции пористого кремния с ТЭНом и аммониевой солью динитрамида имеют очень низкую чувствительность к удару по сравнению с классическими инициирующим ВВ и бинарными композициями por-Si с перхлоратами, что может быть связано для ТЭНа с большим критическим диаметром горения композиции по отношению к малой площади торцевой поверхности бойка, а для АДНА – неоптимальностью соотношения между горючим (por-Si) и окислителем (АДНА).

2. Чувствительность к удару композиции por-Si + Gr + NaClO₄ (3 : 1) находится на уровне чувствительности штатного воспламенительного состава УНМТ, что делает ее (с учетом малого времени срабатывания) перспективной для широкого применения как в качестве воспламенительного, так и инициирующего состава (в зависимости от массы навески и давления прессования).

3. Время срабатывания бинарных композиций por-Si + NaClO₄ и por-Si + Ba(ClO₄)₂ с растворителем (ацетоном или смесью ацетона и воды в соотношении 3 : 1) соответствует времени срабатывания штатного воспламенительного состава УНМТ.

4. Время срабатывания композиции por-Si + Gr + NaClO₄ (3 : 1) практически или мало зависит от вида инициирования (удара или накола).

5. Замена в составе Kp45Cc55 микрокристаллического кремния на пористый приводит к резкому уменьшению (на полтора порядка) времени срабатывания состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berger B.P., Haas B., Mathieu J., Vine T., Griffiths T.T. // Proc. 33th Intern. Pyrotechnics Sem. USA: IPS, 2006. P. 81.
2. Koch E.-C., Clément D. Special Materials in Pyrotechnics: V.I. Silicon – An Old Fuel with New Perspectives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2007. V. 32. № 3. P. 205.
3. Долгобородов А.Ю., Стрелецкий А.Н., Махов М.Н., Колбанёв И.В., Фортвов В.Е. // Хим. физика. 2007. Т. 26. № 12. С. 40.
4. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Стрелецкий А.Н. // Горение и взрыв. Вып. 3 / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2010. С. 219.
5. Долгобородов А.Ю., Стрелецкий А.Н., Махов М.Н. и др. // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 8. С. 37.
6. Kishilev E.G., Gany A. // Proc. 6 Seminar New Trends in Research of Energetic Materials. Pardubice: University of Pardubice, 2013. P. 197.
7. Зегря Г.Г., Савенков Г.Г., Морозов В.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. Вып. 4. С. 501.
8. Агеев М.В., Ведерников Ю.Н., Зегря Г.Г., Побережная У.М., Попов В.К., Савенков Г.Г. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 5. С. 48.
9. Савенков Г.Г., Зегря А.Г., Зегря Г.Г., Румянцев Б.В., Синани А.Б., Михайлов Ю.М. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 3. С. 397.
10. Джангириян В.Г., Фадеев Д.В., Агеев В.Н., Кругликов В.С., Шабров А.В. Производство капсулей-воспламенителей. Сергиев Посад: Изд-во “Весь Сергиев Посад”, 2015.
11. Мельников В.Э. Современная пиротехника. М.: Наука, 2014.
12. Шидловский А.А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973.
13. Гозуля М.Ф., Бражников М.А. // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 4. С. 1.
14. Михайлов Ю.М., Гаранин В.А., Ганин Ю.В., Гончаров Т.К., Ганина Л.В., Зегря Г.Г. // Изв. АН. Сер. Химическая. 2016. № 10. С. 2400–2404.
15. Лукьянов О.А., Тартаковский В.А. // Рос. хим. журн. 1997. Т. XLI. № 2. С. 5.
16. Власенко М.Е. Средства воспламенения боеприпасной техники. СПб.: Компьютербург, 2016.
17. Багал Л.И. Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. М.: Машиностроение, 1975.