

ЭФФЕКТЫ АНОМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГОЁМККИХ СОСТАВОВ В ЗАРЯДАХ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ ИХ ИНИЦИИРОВАНИИ ПРОДУКТАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»
192076, Санкт-Петербург, Советский пр., д. 33А

Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург

Экспериментально исследовано воспламенение зарядов насыпной плотности из двух реакционноспособных энергоёмких материалов при помощи электроразрядной плазмы, возникающей при электрическом взрыве проводников из меди. Определены скорости горения материалов. Предложен объёмный механизм воспламенения зарядов, объясняющий аномально высокую скорость горения составов.

Ключевые слова: электровзрыв, электроразрядная плазма, взрыв проводника, фильтрация, зажигание.

Введение

Воспламенение или инициирование электроразрядной плазмой, образующейся при электрическом взрыве (ЭВ) проводников (фольг или проволок), конденсированных энергетических материалов рассматривалось неоднократно в ряде работ практически сразу же, как только начались интенсивные исследования ЭВ проводников [1, 2]. Явление электрического взрыва представляет процесс резкого расширения вещества в ходе интенсивного джоулевого нагрева объёма металла проводника импульсом электрического тока. При помощи электрического взрыва проводников (ЭВП) происходит быстрое (микросекундное) инициирование взрывчатых веществ (ВВ) в высоковольтных промышленных электродетонаторах. В качестве примера, можно привести электродетонатор ЭДВ-1 [3], разработанный в СССР в 60-е годы прошлого века. В ЭДВ-1 с помощью электрического взрыва мостика происходит инициирование ТЭНа насыпной плотности. Близко к этому находятся и конструкции электродетонаторов, в которых инициирование ВВ происходит за счёт импульса высокого напряжения и образующегося плазменного канала пробоя в веществе [4, 5].

В работе [6] был проведён анализ условий минимизации энергии разряда для зажигания реакционноспособных веществ (РСВ) и на основе расчётно-экспериментальных исследований определены параметры источника энергии и разрядного контура, обеспечивающих реализацию стабильных режимов их зажигания. В работе [7] исследовано влияние параметров переходного слоя и температуры разрушения на режимы зажигания

при различных длительностях импульса тока при электровзрыве. Однако, необходимо отметить, что инициирование ВВ и других энергоёмких материалов с помощью рассматриваемого способа происходит в медленном режиме ЭВП, когда магнитное давление превышает термодинамическое, и развитие магнитной гидродинамической неустойчивости, возникающее по завершении плавления, опережает ввод энергии [8].

В работе [3], являющейся обзором работ, выполненных в ИГД СО РАН, начиная с 1961 г., по динамическому инициированию импульсным искровым разрядом вторичных ВВ, приводятся данные по их аномально высокой скорости горения. В основу этого эффекта авторами положен абляционный механизм, обусловленный разрушением тонкого слоя расплава, возникающего в высокоэнтальпийном потоке на поверхности гранул плавящегося вторичного ВВ. Там же указывается, что по такому механизму не могут гореть пороха, которые не плавятся.

Поскольку свойства вторичных ВВ сильно отличаются от свойств порохов и смесевых твёрдых ракетных топлив (СТРТ) (или их компонентов), то понятно что чувствительность к быстрому внешнему энергетическому воздействию СТРТ и порохов, в том числе к воздействию электроразрядной металлической плазмы, должна проверяться отдельно. Кроме того, учитывая высокое быстродействие электрического разряда, возникает необходимость проверки устойчивости зажигания при коротких импульсах внешнего воздействия.

Целью настоящей работы является изучение воздействия электроразрядной плазмы, образующейся при

¹ Савенков Георгий Георгиевич, д-р техн. наук, зам. главного конструктора ФГУП «СКТБ «Технолог», e-mail: sav-georgij@yandex.ru

² Морозов Виктор Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. физической механики СПбГУ

³ Семашкин Георгий Владимирович, канд. техн. наук, зам. директора ФГУП «СКТБ «Технолог», e-mail: info@sktb-technolog.su

ЭВ цилиндрического проводника (проволочки) из меди, на два различных (по физическим свойствам) реакционно-способных энергоёмких материала.

Организация экспериментов, энергоёмкие составы и методика измерения

Эксперименты проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 1. В качестве энергоёмких материалов (ЭМ) использовались составы: СБК-3 (ТУ 4854 – 311 – 05121441 – 2006) на основе нитрата калия (KNO_3) с добавками фенолформальдегидной смолы (горючее), диацетидиамида (охлаждающая добавка) (в дальнейшем ВС-1) и перхлорат аммония (далее – ВС-2). Состав помещался в контейнер из оргстекла с внутренним диаметром $d = 5$ мм и длиной (15,5 – 16) мм (толщина заглушек – 1,0 мм). Внутри контейнера находилась медная проволочка диаметром 80 мкм, длиной 30 мм в обоих случаях. Отметим, что перхлорат аммония горит только в диапазоне давлений 2 – 10 МПа [9].

Разрядное напряжение составляло во всех случаях 20 кВ, ёмкость конденсатора – 0,5 мкФ. При замыкании цепи под действием мощного электрического тока, протекающего по проволочке, она взрывалась и образовывала плазменный цилиндрический канал, в который вводилась основная доля (не менее 97 %) энергии накопителя. Мощное тепловое воздействие и волновое возмущение приводили в итоге к зажиганию ВС.

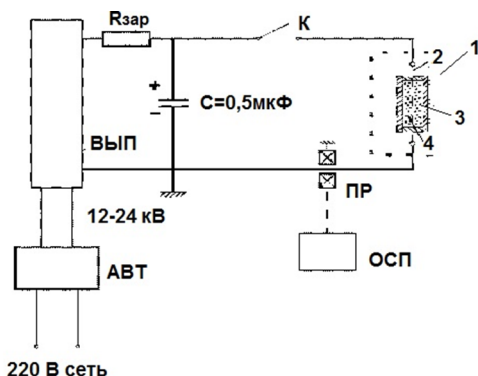


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

(АВТ - автотрансформатор; ВЫП - выпрямитель; $R_{зар}$ - зарядное сопротивление; C - конденсатор; К - разрядник; ПР - пояс Роговского; ОСП - осциллограф; 1 - защитный корпус; 2 - взрывающийся проводник; 3 - контейнер; 4 - состав)

Для оценки времени горения применялась экспериментальная схема, изображённая на рисунке 2. В этой экспериментальной схеме фотодиод устанавливался напротив боковой стенки контейнера, что позволяло регистрировать время свечения от начала горения составов и до полного разлета продуктов их горения.

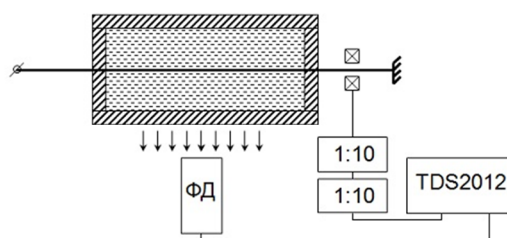


Рисунок 2. Схема измерения времени горения

ВС-1 представлял из себя гранулированный порошок белого цвета, средний размер гранул 300 мкм, ВС-2 – белый порошок, средний размер частиц 5 – 10 мкм. Температура вспышки для ВС-1 $T_{ign} = (260-300)^\circ\text{C}$, для ВС-2 $T_{ign} = (300-320)^\circ\text{C}$. Температуры горения, соответственно, 1200 и 850 $^\circ\text{C}$. Скорости горения в нормальных условиях для ВС-1 – $u_1 = 1,6 \pm 0,1$ мм/с, для ВС-2 для вышеуказанного диапазона давления $u_2 = 16$ мм/с. Эксперименты проводились при различных плотностях зарядов в контейнере.

Начало процесса плавления металла проводника определяли по скачку импульса тока на осциллограмме процесса (рисунок 3), начало ЭВП соответствовало первому максимуму тока после плавления [10].

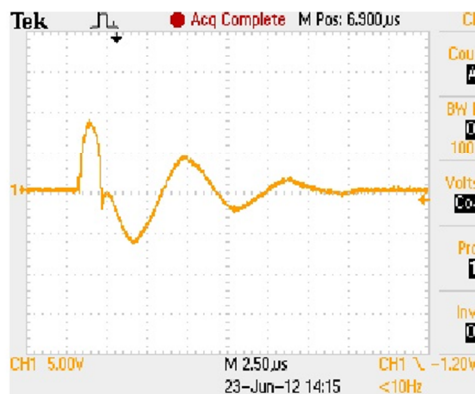


Рисунок 3. Осциллограмма тока при электрическом взрыве медного проводника в пустом контейнере

Результаты экспериментов и их обсуждение

Примеры осциллограмм тока с пояса Роговского (измеряет ток при ЭВП) и с фотодиода приведены на рисунках 4 и 5. Для ВС-1 плотность заряда в контейнере составляла $0,775 \text{ г/см}^3$, для ВС-2 – $1,1 \text{ г/см}^3$ (только для экспериментов, соответствующих рисункам 4 и 5). Результаты замеров скоростей горения зарядов в зависимости от их плотности приведены в таблице. На каждое значение плотности заряда, приведенное в таблице, было проведено не менее трёх экспериментов.

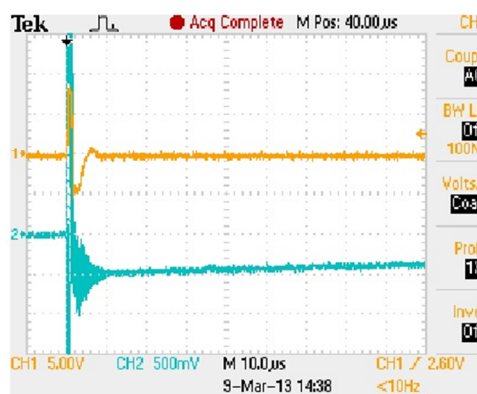


Рисунок 4. Осциллограммы тока для ЭВП с ВС-1 (СБК-3)

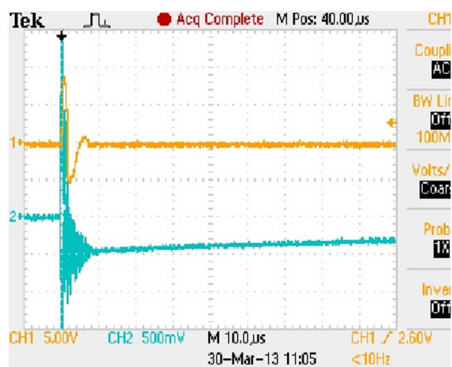


Рисунок. 5. Осциллограммы тока для ЭВП с ВС – 2 (ПХА)

Таблица. Скорости горения энергоёмких материалов в СБК – 3 и перхлората аммония

Энергоёмкий материал	Плотность, г/см ³	Скорость горения, м/с
СБК – 3	0,775±0,06	333±12
	0,935±0,04	277±18
	1,02±0,07	250±19
Перхлорат аммония	1,1±0,03	310±16
	1,24±0,07	223±21
	1,43±0,04	178±12

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что значения скоростей горения имеют аномально высокие значения для обоих составов и для всех значений плотностей зарядов. И, кроме того, можно заметить, что с увеличением плотности заряда скорость горения падает. Проанализируем, с чем же связаны такие высокие значения скоростей горения? Известно, что давление внутри плазменного канала, образующегося в момент электрического взрыва, достигает порядка 3000 Мпа (3 ГПа) [11]. Такие высокие значения давления, а также тот факт, что скорость горения уменьшается с увеличением плотности позволяют предложить следующий механизм горения составов. Очевидно, что в этом случае воспламенение составов может осуществляться за счёт химически активных, нагретых до температур $\sim 10^4$ К [2], частиц плазмы, фильтрующихся из области высокого давления и поджигающих каждую частицу энергоёмкого состава. В этом случае мы имеем дело не с поверхностным, а с **объемным горением** заряда, помещенного внутрь контейнера.

Поскольку фильтрация является достаточным медленным процессом, то данное предположение подлежит проверке. Оценим (скорее всего, с занижением) скорость фильтрации (V_f) частиц плазмы. Для такой оценки воспользуемся соотношением для перепада давления Δp в зернистом слое толщиной $d/2$ [12]:

$$\Delta p = \frac{3}{4} \zeta \frac{d}{2d_1} \cdot \frac{\tau}{\varepsilon} \rho \frac{V_0^2}{\psi^2}, \quad (1)$$

Где $\zeta = \zeta(\text{Re}, \tau)$ – коэффициент сопротивления частицы среды (в нашем случае – зерна ЭМ); d_1 – средний размер частиц ЭМ; τ – объемная концентрация твердой фазы (частиц ЭМ); $\varepsilon = 1 - \tau$ – пористость; ρ – плотность зернистой среды (заряда ЭМ); $V_0 = \psi V_f$ – скорость частиц плазмы в пустом контейнере; ψ – относительное проходное сечение среды.

Минимальное относительное проходное сечение среды определяется зависимостью [13]

$$\psi = 0,61 \varepsilon^{0,25}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим

$$V_f = 2 \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{d_1 \varepsilon \Delta p}{\zeta \tau \rho}}. \quad (3)$$

Подставим в (3) значения параметров, входящих в него, получим при $\zeta = 0,4$ [12] для СБК–3 при $\rho = 0,935$ г/см³ $V_f = 1025$ м/с, для ПХА при $\rho = 1,1$ г/см³ $V_f = 1320$ м/с. Тогда

частицы плазмы достигнут стенок контейнера для заряда из СБК–3 через $t \approx 2,4$ мкс и через $t \approx 1,9$ мкс что вполне сопоставимо (а, по сути, в несколько раз меньше) с временем процесса электрического взрыва и длительностью протекания тока по плазменному каналу.

Таким образом, наше предположение относительно **объемного** горения заряда, в некотором отношении верно, и этот вид горения может иметь место при зажигании зарядов из энергетических материалов насыпной плотности.

Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований и оценочных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. В диапазоне длительностей внешнего воздействия (электроразрядной плазмы, возникающей при электрическом взрыве медного проводника) (7,5–11,5) мкс наблюдается устойчивое загорание энергоёмких материалов СБК–3 и перхлората аммония;
2. При зажигании зарядов из СБК–3 и перхлората аммония насыпной плотности наблюдаются аномально высокие скорости горения зарядов 165–350 м/с;
3. Такие скорости горения (165–350 м/с) объясняются объемным горением зарядов, что связано с воспламенением каждой частицы порошковых составов под действием частиц металлической плазмы, фильтрующихся внутрь заряда.

Литература

1. Muller G.M., Moore D.B., Bernstein D. Growth of explosion in electrically initiated RDX // J. Applied Physics. 1961. V. 32, No. 6. P. 1065–1075.
2. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Литунковский В.Н. Электрический взрыв проводников. Л.: НИИЭФА, 1977. 120 с.
3. Лукьянчиков Л.А. Системы инициирования на вторичных взрывчатых веществах // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 5. С. 48–61.
4. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
5. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. М.: Энергоатомиздат, 2010. 784 с.
6. Буркин В.В., Буркина Р.С., Домуховский А.М. Анализ условий минимизации энергии разряда при электроплазменном инициировании конденсированных реакционноспособных веществ // Хим. физика и мезоскопия. 2009. Т.11, № 1. С. 14–21.
7. Буркина Р.С., Домуховский А.М. Влияние структурных изменений приповерхностного слоя конденсированного вещества на его загорание мощным импульсом излучения // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 5. С.122–129.
8. Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А. [и др.]. Обзор литературы по моделированию электрического взрыва тонких металлических провололок / Препринт 9. ФИАН. М., 2004. 26 с.
9. Иващенко Ю.С., Садырин А.Л., Павленко В.Л. Исследование электропроводности поверхности горения ПХА // Физика горения и взрыва. 1986. № 4. С. 30–33.
10. Булгаков А.В., Булгакова Н.М., Бураков И.М. [и др.]. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. 462 с.
11. Иванов В.В. О расчёте характеристик подводных электрических взрывов на ЭВМ // Физика горения и взрыва. 1980. № 6. С. 116–118.
12. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2005. 358 с.
13. Богдавленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978. 112 с.