

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С ГИДРОКАРБОНАТОМ НАТРИЯ

И. А. Стурин, А. А. Седов, А. А. Шалыгин, О. В. Шевлягин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе приведены результаты исследования детонационных характеристик (скорости и критической толщины детонации) малоплотных взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия (пищевая сода, NaHCO_3). Получены зависимости указанных детонационных характеристик от размера частиц и массовой доли соды во взрывчатых смесях с высокодисперсным (ВДТС) и крупнодисперсным тэном (ТС). Подтверждена оптимальность выбора массовой доли соды в смеси с высокодисперсным тэном, применительно к использованию состава для сварки взрывом тонких слоев металлов. Для данного состава построена зависимость скорости детонации от толщины насыпного слоя.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработано смесевое взрывчатое вещество (ВВ), в котором используются высокодисперсный тэн и инертная добавка – гидрокарбонат натрия в массовом соотношении 35 %/ 65 % соответственно. Это ВВ обладает уникальным свойством: при наличии большого количества инертной добавки детонировать со скоростью $D \approx 2$ км/с ($\rho \approx 0,7$ г/см³) в слое толщиной ≈ 2 мм [1]. Основным назначением данного ВВ является использование его для сварки взрывом тонких (≤ 2 мм) слоев металлов [2].

Целью данной работы является развитие данного направления работ в части более широкого изучения влияния на детонационные свойства малоплотных взрывчатых смесей тэна с содой таких параметров как дисперсность взрывчатого наполнителя и инертной добавки, а также соотношения их массовых долей в ВВ, которые в конечном счете позволят оптимизировать смесевое взрывчатое вещество применительно к сварке взрывом.

Результаты работы по определению газодинамических характеристик получены с использованием радиоинтерферометрического метода исследования быстротекающих процессов [3].

Постановка опытов по определению скорости и критической толщины детонации

Объектом исследований являлись смеси тэна с содой с различными массовыми долями добавки (α , %)

и с различной удельной поверхностью ($S_{уд}$ см²/г) тэна и соды насыпной плотности.

Схема экспериментальных сборок представлена на рис. 1.

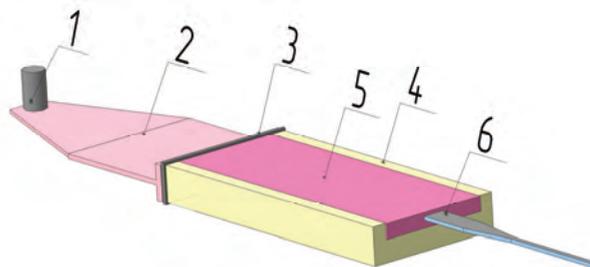


Рис. 1. Схема экспериментальных сборок: 1 – ЭД; 2 – пластина ТТ; 3 – алюминиевая фольга; 4 – планка из пенопласта; 5 – исследуемое ВВ; 6 – плоский облучатель радиоинтерферометра

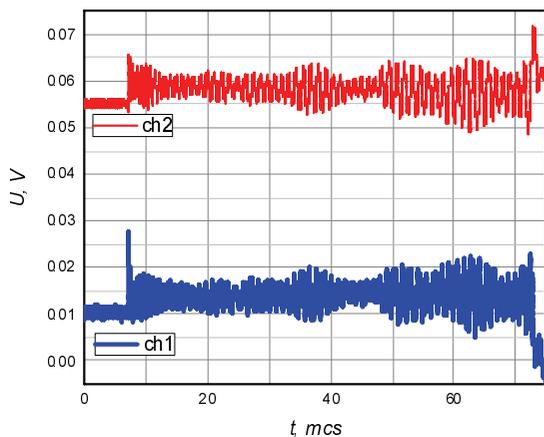
ВВ насыпной плотности размещали в планки из пенопласта 4 с полостью шириной 30 мм, длиной 80 мм. Толщина стенок планки – 4 мм. Высота насыпаемого в планку ВВ (H , мм) варьировалась. При таком размещении насыпного ВВ его плотность в рамках погрешности ($0,02$ г/см³) совпадала с насыпной.

Инициирование исследуемого ВВ 5 осуществляли путем подвода детонации пластиной из пластифицированного тэна (ПТ) 2. Алюминиевая фольга 3 выполняла роль экранировки исследуемого процесса от детонации пластин ПТ при регистрации радиоинтерферометром.

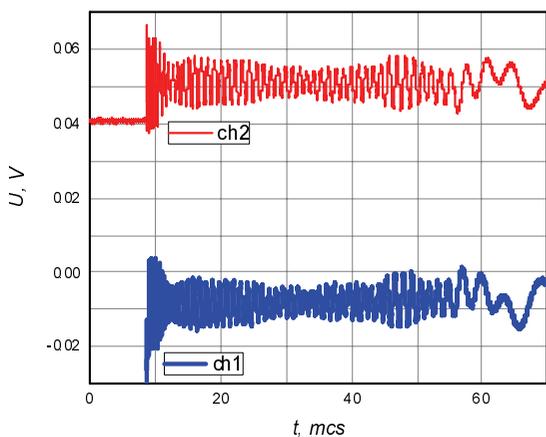
С помощью радиоинтерферометра ПРИ-03 (длина волны 3,2 мм) регистрировали интерферограммы движения детонационной волны (ДВ) в исследуемом ВВ, при обработке которых получали $x-t$ диаграммы движения ДВ. По динамике движения ДВ определяли характер процесса (затухающий или нет). Наименьшую толщину слоя, при котором в ВВ возникала детонация с постоянной скоростью, считали критической ($H_{кр}$, мм), соответствующую ей среднюю скорость детонации – критической ($D_{кр}$, м/с). Дальнейшее уменьшение толщины слоя приводило к затуханию ДВ.

Среднюю скорость детонации (D , м/с) определяли путем аппроксимации $x-t$ диаграммы линейной функцией. Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой равен значению средней скорости детонации. Относительная погрешность измерения D не превышала 3 %.

Типичные интерферограммы без затухания и с затуханием детонации представлены на рис. 2, а и б соответственно.



а



б

Рис. 2. Интерферограмма детонации и затухания детонации ВВ ВДТ-сода, $\alpha = 90\%$, $H = 9$ мм: а – детонация, б – затухание детонации

Типичные $x-t$ диаграммы, полученные в опытах, и пример их аппроксимации представлены на рис. 3.

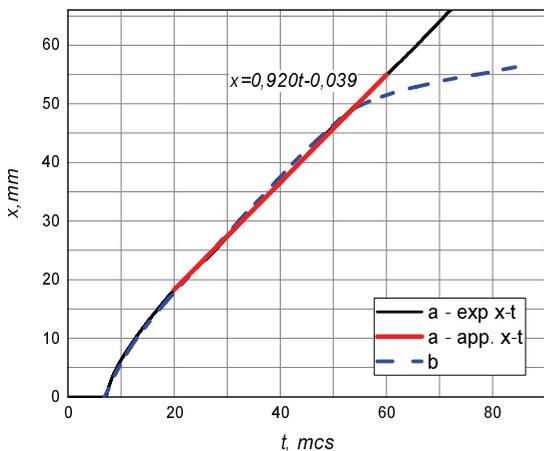


Рис. 3. $X-t$ диаграммы, полученные в опытах: а – детонация ВВ ВДТ – сода, $\alpha = 90\%$, $D = 920$ м/с, $H = 9$ мм; б – затухание детонации ВВ ВДТ-сода, $\alpha = 90\%$, $H = 8$ мм

Зависимость критической толщины детонации ВВ ТС 35/65 (тэн-сода 35/65) и ВДТС 35/65 от размера частиц NaHCO_3

Исследовались ВВ ТС 35/65 ($D \approx 2$ км/с, $H_{кр} \approx 10$ мм, при $\rho \approx 1$ г/см³) и ВДТС 35/65 ($D \approx 2$ км/с, $H_{кр} \approx 2$ мм, при $\rho \approx 0,7$ г/см³), которые ранее [1] были использованы для сварки взрывом.

В работе [4] показано существование оптимального размера частиц добавки, при которой критический диаметр детонации был минимальным, а значит существует возможность уменьшения критической толщины детонации составов ВДТС 35/65 и ТС 35/65 за счет изменения размеров частиц. Реализуя данный подход, можно ожидать уменьшение критической толщины детонации ВВ ТС 35/65, вплоть до толщин, позволяющих использовать данный состав для сварки взрывом тонких металлических пластин.

Для составов ВДТС 35/65, ТС 35/65 насыпной плотности определена зависимость критической толщины детонации от размера частиц NaHCO_3 (δ , мкм), характеризующих удельной поверхностью. Удельная поверхность определялась на приборе типа прибора Товарова. Гранулометрический состав NaHCO_3 , полученный путем отсева на ситах, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав NaHCO_3

δ , мкм	Массовая доля, %
от 0 до 40	9,6
от 40 до 71	24,2
от 71 до 100	13,2
от 100 до 125	10,2
от 125 до 160	13,6
от 160 до 250	22
от 250 до 355	6,8
от 355 до 400	0,2
от 400	0,3

Результаты опытов представлены в табл. 2.

По данным табл. 2 построена зависимость критической толщины детонирующего слоя ВВ ВДТС 35/65 и ТС 35/65 от величины удельной поверхности добавки NaHCO_3 (см. рис. 4).

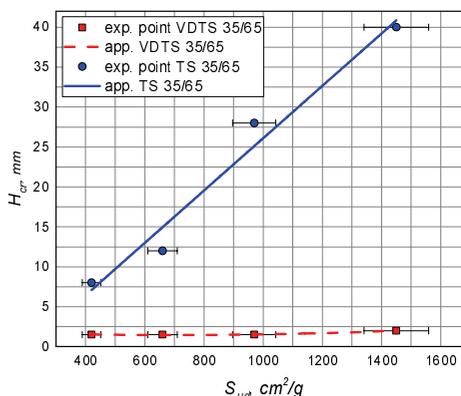


Рис. 4. Зависимость $H_{кр}$ от $S_{уд}$ NaHCO_3 для ВВ ВДТС 35/65 и ТС 35/65

Критическая толщина ВВ в зависимости от размера частиц NaHCO_3

Обозначение ВВ	$S_{уд}, \text{см}^2/\text{г}$		$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$H_{кр}, \text{мм}$	$D_{кр}, \text{м}/\text{с}$
	тЭН	NaHCO_3			
ВДТС 35/65	4500	1450 ($\delta < 40 \text{ мкм}$)	0,56	2	1440
		970 ($40 < \delta < 71 \text{ мкм}$)	0,65	1,5	1430
		660 (полный гранулометрический состав)	0,68	1,5	1630
		420 ($160 < \delta < 250 \text{ мкм}$)	0,68	1,5	1680
ТС 35/65	500	1450 ($\delta < 40 \text{ мкм}$)	1	*40	1230
		970 ($40 < \delta < 71 \text{ мкм}$)	1,05	29	1340
		660 (полный гранулометрический состав)	1,02	12	1220
		420 ($160 < \delta < 250 \text{ мкм}$)	1,08	8	1100

*критический диаметр в цилиндре из пенопласта с толщиной стенки 4 мм

$H_{кр}$ ВДТС 35/65 при уменьшении размера частиц добавки растет не значительно с 1,5 до 2 мм во всем исследованном диапазоне. Рост $H_{кр}$ ТС 35/65 с 8 до 40 мм с уменьшением δ может быть связан с эффектом экранирования кристаллов тЭна. Мелкие частицы соды окружают кристалл тЭна, тем самым, создают экран, защищающий кристалл как от УВ, так и от ПВ. УВ и/или ПВ требуется большее время на передачу энергии сжатием или конвективным поджигом, что и определяет $H_{кр}$. Для ВДТС 35/65 такого эффекта не обнаружено, по видимому, из-за значительно меньших размеров кристаллов ВДТ ($\approx 4 \text{ мкм}$) по сравнению с NaHCO_3 . Частицы ВДТ будут расположены близко к друг другу в порах, образованных частицами NaHCO_3 .

Для ВВ ТС 35/65 путем уменьшения удельной поверхности (увеличения размера частиц соды) удалось уменьшить критическую толщину детонации в 1,5 раза (относительно добавки с полным гранулометрическим составом). Не исключено, что использование более крупных частиц соды ($\delta > 250 \text{ мкм}$) позволит еще уменьшить критическую толщину. Однако, для этого потребуется выполнить поиск путей укрупнения частиц NaHCO_3 .

Зависимость критической толщины насыпного слоя и скорости детонации ВВ от массовой доли соды в смеси с ВДТ

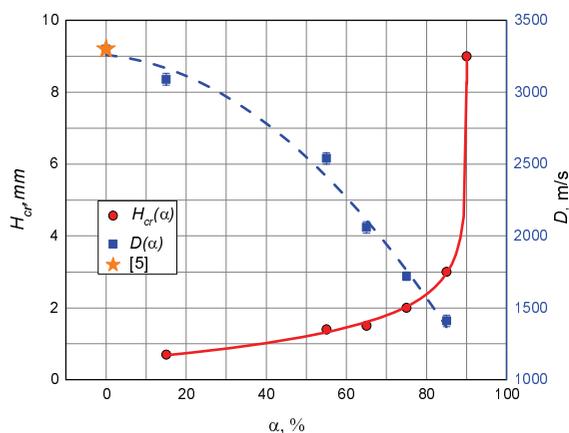
Результаты опытов представлены в табл. 3.

По данным табл. 3 построены графики зависимости критической толщины и скорости детонации ВВ ВДТ-сода от массовой доли соды в смеси (см. рис. 5). Значение D при $\alpha = 0 \%$ взято из работы [5].

Критическая толщина и скорость детонации ВВ ВДТС при различной массовой доле содержания добавки

$\alpha, \%$	$S_{уд}, \text{см}^2/\text{г}$		$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$H_{кр}, \text{мм}$	$D_{кр}, \text{м}/\text{с}$	$D_{пр}, \text{м}/\text{с}$
	ВДТ	NaHCO_3				
90	4500	660	0,98	9	920	—
85			0,92	3	1150	1410
75			0,79	2	1510	1720
65			0,68	1,5	1630	2060
55			0,61	1,4	1850	2540
15			0,39	0,7	2900	3090

$D_{пр}$ – предельная скорость детонации, м/с

Рис. 5. Графики зависимости $H(\alpha)$ и $D(\alpha)$

Из рис. 5 видно, что в интервале $15\% < \alpha < 85\%$ критическая толщина детонирующего слоя с увеличением массовой доли соды возрастает от 0,7 мм до 3 мм, а при $\alpha > 85\%$ происходит более резкий рост критической толщины слоя до 9 мм.

Скорость детонации монотонно возрастает от 1400 м/с до 3300 м/с при уменьшении α от 85% до 15%.

Таким образом, путем изменения массовой доли добавки в ВВ можно варьировать в широких пределах скорость детонации, при этом критическая толщина детонации остается в разы меньше, чем для большинства промышленных ВВ.

На основе полученных данных выбран оптимальный состав для сварки взрывом тонких металлических пластин.

При использовании для сварки взрывом схемы с параллельным расположением метаемой и неподвижной пластин, скорость точки контакта совпадает со скоростью детонации заряда ВВ, $V_k = D$. Экспериментально определенная область скоростей соударения, при которой имеет место устойчивое и прочное сварное соединение находится в интервале $2,0 \text{ км}/\text{с} \leq V_k \leq 2,3 \text{ км}/\text{с}$ [6]. Для удовлетворения этого требования можно использовать составы в интервале массовой доли добавки $58\% \leq \alpha \leq 68\%$. Как видно, выбранная ранее рецептура с $\alpha = 65\%$, является практически оптимальной.

Зависимость скорости детонации от толщины насыпного слоя ВВ ВДТС 35/65

ВВ ВДТ-сода с $\alpha = 65\%$ (ВДТС35/65) непосредственно применяется для сварки взрывом тонких металлических пластин, где требуется устойчивая детонация ВВ в слоях толщиной от 10 мм и менее, в связи с чем, для этого ВВ подробно определена зависимость $D(H)$.

Результаты опытов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Толщина насыпного слоя и скорость детонации ВВ ВДТС 35/65

$S_{уд}, \text{см}^2/\text{г}$		$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$H, \text{мм}$	$D, \text{м}/\text{с}$
ВДТ	NaHCO_3			
4500	660	$0,70 \pm 0,02$	1,5	1650
			1,5	1620
			2	1700
			2	1750
			2,5	1810
			3	1860
			3	1950
			3,5	1920
			4	2000
			4,5	1930
			5	2010
			6	1990
			6	1960

По данным табл. 4 построен график зависимости скорости детонации от толщины слоя ВВ ВДТС 35/65 (см. рис. 6).

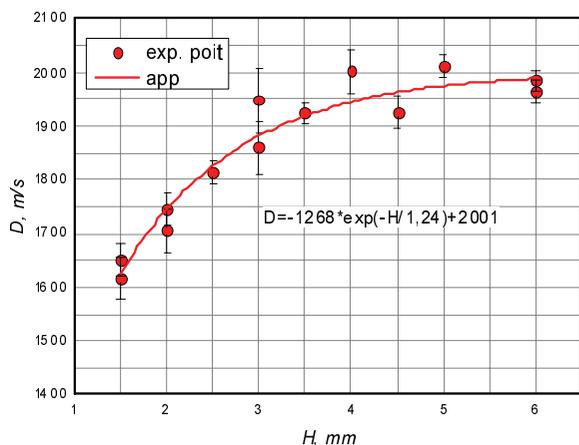


Рис. 6. График зависимости $D(H)$ для ВВ ВДТС 35/65

Из рис. 6 видно, что для исследованного ВВ вид зависимости $D(H)$ не имеет каких-либо особенностей (например, излом зависимости $D(H)$) характерных для сильноразбавленных ВВ [4].

Данные аппроксимировались выражением:

$$D(\text{м}/\text{с}) = -1268 \cdot \exp(-H(\text{мм})/1,24) + 2001, 1,5 \leq H \leq 6 \quad (1)$$

За критическую толщину детонации принимали максимальную толщину слоя ВВ, при которой про-

цесс детонации все еще оставался стационарным. Таким образом критическая толщина и скорость детонации ВВ ВДТС 35/65 при $\rho = 0,07 \text{ г}/\text{см}^3$ составила 1,5 мм и $(1630 \pm 30) \text{ м}/\text{с}$ соответственно, предельная толщина и скорость $\approx 6 \text{ мм}$ и $(1990 \pm 40) \text{ м}/\text{с}$ соответственно.

Заключение

Проведены исследования детонационных характеристик взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия с помощью радиоинтерферометрического метода.

Определено влияние на критическую толщину детонации насыпных слоев ВВ ТС 35/65 и ВДТС 35/65 размера частиц добавки NaHCO_3 . Критическая толщина детонирующего слоя ВВ ВДТС 35/65 при уменьшении размера частиц добавки растет не значительно с 1,5 до 2 мм во всем исследованном диапазоне. Рост критической толщины детонирующего слоя ТС 35/65 от 8 до 40 мм с уменьшением размера частиц добавки может быть связан с эффектом экранирования кристаллов тэна.

Для ВВ ТС 35/65 путем уменьшения удельной поверхности от 660 до 420 $\text{см}^2/\text{г}$ (увеличения размера частиц) добавки удалось уменьшить критическую толщину детонации в 1,5 раза.

Определена скорость и критическая толщина детонации в смесях ВДТ с содой в различных соотношениях массовых долей. Критическая толщина детонации в интервале изменения массовой доли добавки от 15 до 90% возрастает с 0,7 до 9 мм, при этом скорость детонации возрастает монотонно от 1400 до 3300 м/с.

На основе полученных результатов определен диапазон массовой доли добавки в смеси с ВДТ, подходящий к использованию ВВ для сварки взрывом тонких металлических пластин – $58\% \leq \alpha \leq 68\%$. Оптимальной является рецептура с $\alpha = 63\%$. Выбранная ранее рецептура ВДТС 35/65 ($\alpha = 65\%$) близка к оптимальной.

Для ВВ ВДТС 35/65 используемого для сварки взрывом тонких металлических пластин, получена зависимость скорости детонации от толщины насыпного слоя, которая аппроксимируется выражением:

$$D(\text{м}/\text{с}) = -1268 \cdot \exp(-H(\text{мм})/1,24) + 2001, 1,5 \leq H \leq 6$$

Критическая толщина и скорость детонирующего слоя при плотности $0,7 \text{ г}/\text{см}^3$ составила 1,5 мм и $(1630 \pm 30) \text{ м}/\text{с}$ соответственно, предельная толщина и скорость $\approx 6 \text{ мм}$ и $(1990 \pm 40) \text{ м}/\text{с}$ соответственно;

Литература

1. «Перспективное ВВ для сварки взрывом тонких металлических фольг» Л. А. Андреевских, А. А. Дерibas и др. XIII Харитоновские чтения. Сборник статей. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 89–92.

2. Андреевских Л. А., Дроздов А. А., Михайлов А. Л., Самароков Ю. М., Скачков О. А., Дерибас А. А. Исследование возможности создания сваркой взрывом биметаллических композиционных материалов высокожаростойкая порошковая сталь-медь // Сталь, 2015, № 1. С. 84–87.

3. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Монография под редакцией А. Л. Михайлова. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 218–254.

4. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. I. Влияние инертной добавки на параметры детонации // ФГВ. 1979. № 3. С. 92–101.

5. Борзых М. Н., Кондриков Б. Н. Обобщенная зависимость скорости детонации вторичных ВВ от плотности заряда // ФГВ. 1978. № 1. С. 117–122.

6. Дерибас А. А. // Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.