

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. В. Сильвестров, А. В. Пластинин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, silver@hydro.nsc.ru

Рассмотрены эмульсионные взрывчатые вещества (ВВ) со скоростью детонации до $2 \div 3$ км/с. Особенностью композиций является большое количество в их составе полых микросфер из стекла. Приведены примеры использования низкоскоростных эмульсионных ВВ для плакирования металлических пластин фольгами толщиной до 0.1 мм и сварки трубки малого диаметра со стальной втулкой в параллельной схеме сварки взрывом.

Ключевые слова: низкоскоростные эмульсионные ВВ, сварка взрывом.

ВВЕДЕНИЕ

Предложение использовать эмульсионные ВВ (ЭмВВ) для сварки взрывом, по-видимому, впервые сформулировано в [1]. Там же приведены примеры взрывного плакирования металлов с применением слоев ЭмВВ толщиной $\Delta = 10 \div 32$ мм, детонирующих со скоростью $D = 2.45 \div 4.05$ км/с. Но публикаций, связанных с применением ЭмВВ для сварки взрывом, практически нет, за исключением единичных работ, например [2], мало отличающихся от примеров из [1].

При практической реализации сварки взрывом необходимы ВВ с более низкой скоростью детонации, до $2 \div 2.5$ км/с [3]. В этом случае практически для всех металлов можно использовать параллельную схему сварки. За рубежом с этой целью применялись многокомпонентные порошковые смеси со скоростью детонации $D = 1.6 \div 4$ км/с, например: аммонит с алюминием — тримонит [4]; ВВ серии Semtex на основе смесей тэна с содой [5]; аммиачно-селитренное ВВ Donarite-4, содержащее нитроглицерин [6]. В настоящее время для обработки металлов взрывом производятся порошковые ВВ Semtex S25, S30, S35 плотностью $\rho_0 \approx 1$ г/см³ со скоростью детонации $D = 1.7 \div 2.4$ км/с, минимальная допустимая толщина слоя $\Delta_{\min} = 15 \div 8$ мм [7]. Интерес представляет также пластическое ВВ Obrysit ($\rho_0 = 0.5$ г/см³, $D = 2.05$ км/с, минимальный диаметр заряда $d_{\min} = 20$ мм) [8], содержа-

щее включения из полых полимерных микросфер. Оригинальные смеси аммиачной селитры с алюминием и другими наполнителями, в которых взрывные процессы протекают с очень низкой скоростью — $1 \div 2.5$ км/с — при диаметре заряда не менее $18 \div 25$ мм, рассмотрены в [9].

В России для сварки взрывом используются либо порошковые смеси аммонитов с поваренной солью [10], аммиачной селитрой [11], кварцевым песком [12], либо смеси аммиачной селитры с дизельным топливом (АСДТ) [13] или с песком [14]. При использовании этих ВВ доступен весь диапазон скоростей детонации — $1.5 \div 3$ км/с, необходимый для сварки взрывом. Основная проблема — относительно большая критическая толщина слоя Δ_{cr} , что ограничивает применение этих ВВ в приложениях, где необходимо использовать минимальное количество ВВ.

Отмеченные взрывчатые смеси имеют ряд недостатков. Многие из них неводостойки, и влажность окружающей среды влияет на параметры детонации. Эти ВВ характеризуются относительно большой критической толщиной, не менее $10 \div 20$ мм, и их скорость детонации существенно растет при увеличении поперечного размера заряда ВВ. Низкоскоростные ВВ, за исключением АСДТ, содержат в своем составе тротил, тэн или нитроглицерин, т. е. необходимо соблюдать соответствующие меры безопасности при их хранении и применении. Порошковые аммиачно-селитренные ВВ детонируют в неидеальных режимах и образуют при взрыве токсичные оксиды азота и углерода; в результате страдает экология окружающей среды.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (№ НШ-1886.2008.1), программы Президиума РАН № 12.10 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00164-а).

Таким образом, разработка ВВ для сварки металлов взрывом до сих пор представляет интерес. Подобное ВВ должно иметь скорость детонации $\approx 1.5 \div 3$ км/с, слабо зависящую от поперечного размера заряда — диаметра или толщины. Взрывчатое вещество должно быть достаточно мощным и в зависимости от приложений иметь плотность $0.5 \div 1$ г/см³. Для плакирования металлов тонкими фольгами желательнее, чтобы критическая толщина плоского слоя ВВ составляла ≈ 1 мм и менее. Для обеспечения высокой безопасности ведения взрывных работ необходима минимальная чувствительность ВВ к механическим и тепловым воздействиям.

Для решения указанной задачи интерес представляют эмульсионные ВВ. Они не содержат мощных бризантных ВВ, отличаются более низкой стоимостью по сравнению с тротилом, тэном или гексогеном, крайне низкой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям наряду с хорошей восприимчивостью к детонации, низкой газовой вредностью и высокой водостойкостью [15]. Изготовление ЭмВВ возможно непосредственно на месте проведения взрывных работ, что значительно упрощает их транспортировку.

О возможности детонации ЭмВВ лабораторного изготовления в слоях толщиной до 0.5 мм (критический диаметр детонации $d_{cr} < 6$ мм) сообщалось в [16]. Позднее было показано, что критическая толщина промышленного ЭмВВ, содержащего включения алюминия, составляет $\Delta_{cr} = 3.3$ мм, а скорость его детонации $D_{cr} \approx 3$ км/с [17]. В [18] разработано ЭмВВ, детонирующее в слое толщиной до $\Delta_{cr} \approx 2$ мм ($D_{cr} \approx 2.7$ км/с), но скорость детонации композиции быстро увеличивалась с толщиной слоя ВВ: уже при $\Delta > 5$ мм она превышала 4 км/с.

Цель данной работы состояла в понижении предельной скорости детонации эмульсионного ВВ до $2 \div 3$ км/с при сохранении достаточно высокой детонационной способности. Рассмотрено два способа существенного уменьшения скорости детонации: введение в состав ВВ добавок, поглощающих энергию детонационной волны, и уменьшение начальной плотности ВВ за счет включений низкой плотности. Приведены примеры применения разработанных ЭмВВ для плакирования взрывом металлических пластин тонкими фольгами и сварки взрывом трубы малого диаметра с моделью

трубной доски.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Массовый состав эмульсии типа «вода в масле» следующий: аммиачная селитра марки «Б» — 67 %, натриевая селитра — 14 %, вода — 12 %, твердый парафин — 3 %, эмульгатор сорбитан моноолеат — 2 %, индустриальное масло И-40 — 2 % (входит в состав эмульгатора). Кислородный баланс равен нулю. Плотность высокодисперсной эмульсии $\rho_e = 1.41 \pm 0.01$ г/см³. Эмульсия проявляет свойства неньютоновской упругоэластической жидкости, ее кажущаяся динамическая вязкость составляет $(30 \div 40) \cdot 10^3$ П при 60 °С и увеличивается при комнатной температуре (измерена при помощи ротационного вискозиметра Visco Elite R при скорости вращения шпинделя 0.3 мин⁻¹).

Для получения ВВ в эмульсию подмешивались полые стеклянные микросферы марки МСВ отечественного производства, играющие роль физического сенсibilизатора. Средний размер микробаллонов $\bar{d} = 58$ мкм, насыпная плотность $\rho_{mb} = 0.14 \div 0.15$ г/см³ [18]. В качестве базового ЭмВВ рассматривался состав, содержащий $\mu = 5$ % микробаллонов (сверх массы эмульсии). Плотность такого ЭмВВ $\rho_0 = 1.12$ г/см³, скорость детонации $D \geq 4.5$ км/с при диаметре цилиндрического заряда $d \geq 20$ мм (рис. 1, кривая 8). Критические параметры детонации: $5 < d_{cr} \leq 9.7$ мм, $3.6 < \Delta_{cr} \leq 4.1$ мм, $D_{cr} \approx 3.12$ км/с.

Дополнительные включения добавлялись в готовое эмульсионное ВВ в необходимом количестве сверх массы эмульсии. При большом количестве включений ЭмВВ формуется от руки с трудом, но обладает вполне удовлетворительной пластичностью.

В экспериментах использовались цилиндрические и плоские заряды ЭмВВ, постановка опытов аналогична [18]. В первом случае ВВ помещалось в трубы из пластика с толщиной стенки $1 \div 2$ мм, внутренний диаметр которых изменялся в диапазоне $d = 46 \div 20$ мм. Относительная длина зарядов составляла $L/d = 10 \div 12$ калибров. Иницирование осуществлялось детонатором ЭДВ-1, погруженным в ЭмВВ. При $d \leq 20$ мм ЭмВВ размещалось внутри трубок из полиэтилена с толщиной стенки $0.6 \div 0.7$ мм.

Во втором случае эмульсионное ВВ размещалось внутри плоских коробок из пластика

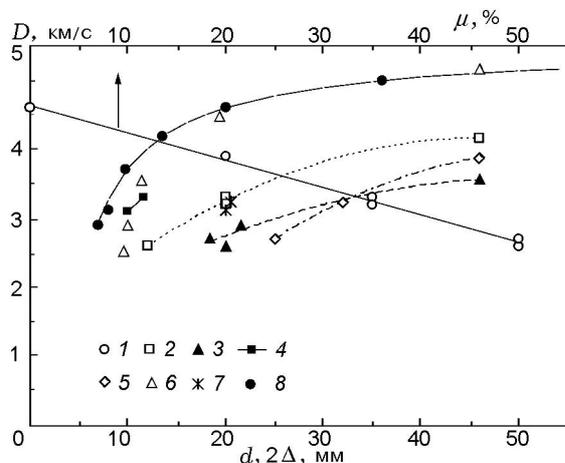


Рис. 1. Зависимость скорости детонации ЭмВВ: 1 — от массовой доли поваренной соли при $d = 20$ мм, 2–7 — от диаметра (толщины) заряда для «тяжелых» включений

добавки: 2, 3 — NaCl, $\mu = 35$ и 50 % соответственно; 4 — Al_2O_3 , $\mu = 15$ %; 5 — аммиачная селитра, $\mu = 68$ %; 6 — алюминиевая пудра, $\mu = 3$ %; 7 — пищевая сода, $\mu = 50 \div 65$ %; 8 — базовое ЭмВВ, $\mu = 5$ % МСВ

толщиной 0.5 мм. Ширина зарядов составляла $b = 80$ мм, толщина слоя ЭмВВ изменялась от 2 до 10 мм, длина зарядов $L = 200$ мм, т. е. относительные длина и ширина плоских зарядов составляли $L/\Delta \approx 100 \div 20$ и $b/\Delta \approx 40 \div 8$.

Скорость детонации измеряли во второй половине заряда на базе ≈ 5 калибров для цилиндрических зарядов и на базе $10 \div 50$ калибров для плоских зарядов. Измерения проводились при помощи 3–4 чувствительных к импульсу давления коаксиальных контактных датчиков диаметром 0.6 мм, погруженных в ЭмВВ. Погрешность измерения скорости — $20 \div 40$ м/с. В пределах точности эксперимента по диаграммам путь — время контролировалась стационарность детонационного процесса.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ

Ударное нагружение эмульсионной матрицы давлением порядка 10 ГПа (характерное давление в ударной волне, ведущей детонацию) приводит к ее разогреву до ≈ 1000 К [19], что недостаточно для взрывного разложения эмульсии за времена ≈ 1 мкс и менее. Поэтому в эмульсионную матрицу вводится сенсibilизатор, создающий искусственную пористость: микроскопические пузырьки газа, мик-

робаллоны из стекла или полимера, пористые включения перлита [15]. Назначение сенсibilизатора — за счет тех или иных механизмов нагрева, реализующегося при схлопывании пор, подогреть матрицу в локальных «горячих точках» до температуры, достаточной для ее взрывного химического превращения.

Предельная скорость детонации эмульсионных ВВ составляет $\approx 3.5 \div 6$ км/с и зависит от состава эмульсии, ее дисперсности и типа сенсibilизатора [15, 16, 19, 20]. В отличие от порошковых и прессованных взрывчатых смесей, ЭмВВ характеризуются невысокой температурой детонации — около $(1.6 \div 2) \cdot 10^3$ К [16]. Поэтому возможности понижения скорости детонации ЭмВВ за счет введения инертных включений [10], поглощающих энергию детонационной волны, существенно ограничены. Другой путь — значительное увеличение числа пор, «подогревающих» эмульсионную матрицу и увеличивающих степень ее взрывного превращения, но уменьшающих объемное содержание собственно взрывчатого компонента. Ниже были апробированы оба способа понижения скорости детонации.

Влияние включений, увеличивающих плотность ЭмВВ

Использовались поваренная соль, диоксид алюминия, аммиачная селитра, пищевая сода и алюминиевая пудра, обычно применяемые для уменьшения скорости детонации мощных ВВ и аммонитов [4–6, 10–14]. Массовая доля включений $\mu = (m_{inc}/M_{exp}) \cdot 100$ % изменялась от 3 до 100 % сверх массы M_{exp} эмульсионного ВВ. Введение указанных добавок увеличивает плотность ЭмВВ.

При изменении концентрации поваренной соли (фракция ≤ 120 мкм) от 20 до 50 % плотность ЭмВВ увеличивается до 1.33 г/см³, а скорость детонации заряда диаметром 20 мм линейно уменьшается до 2.5 км/с (см. рис. 1, прямая 1). При $\mu = 65$ % заряд не взрывается. Критический диаметр детонации композиций растет при увеличении μ : $9 < d_{cr} \leq 12$ мм при $\mu = 35$ %, $14 < d_{cr} \leq 18$ мм при $\mu = 50$ % (рис. 1, кривые 2, 3). Критическая толщина плоского слоя примерно в два раза меньше. В обоих случаях $D_{cr} = 2.6 \div 2.7$ км/с, но в заряде диаметром 46 мм скорость детонации слишком высока для сварки взрывом: $D = 3.6 \div 4.2$ км/с.

Качественное влияние добавки Al_2O_3 аналогично: при $\mu = 15$ % критическая толщина

композиции увеличивается, $3.5 < \Delta_{cr} \leq 5$ мм, и скорость детонации в плоском слое остается высокой: $D = 3.1 \div 3.3$ км/с при $\Delta = 5 \div 5.8$ мм (рис. 1, точки 4). Введение в состав ЭмВВ пищевой соды в количестве $\mu = 50 \div 65$ % также приводит к увеличению критического диаметра, $10 < d_{cr} \leq 20$ мм, и скорость детонации остается выше 3 км/с (рис. 1, точки 7).

Введение в состав базового ЭмВВ дополнительно дробленной аммиачной селитры в твердом виде (размер фракции ≤ 300 мкм) приводит к более значительному увеличению критического диаметра детонации. При $\mu = 100$ % заряд ЭмВВ диаметром 20 мм не детонирует, при $\mu = 75$ % наблюдается затухающий взрывной процесс, при $\mu = 50$ % скорость составляет 3.2 км/с. При $\mu = 68$ % эмульсионное ВВ плотностью 1.2 г/см³ детонирует со скоростью $D = 2.7 \div 3.9$ км/с при $d = 25 \div 46$ мм, в то время как критический диаметр $20 < d_{cr} \leq 25$ мм (см. рис. 1, кривая 5).

При введении 3 % алюминиевой пудры ПАП-2 критическая толщина возрастает до 5 мм при $D_{cr} = 2.53$ км/с (рис. 1, точки 6). При диаметре заряда $d \geq 20$ мм скорость детонации алюминизированного ЭмВВ плотностью $1.12 \div 1.13$ г/см³ практически совпадает со скоростью детонации исходного ЭмВВ. Возможно, при $D \geq 4.5$ км/с за счет увеличения температуры детонации алюминий частично вступает в экзотермическую реакцию во фронте детонационной волны. Другие инертные добавки при диаметре заряда 46 мм уменьшают скорость детонации на 1 км/с и более по сравнению с базовым ЭмВВ.

Эти данные показывают, что стеклянные микробаллоны являются более эффективным сенсбилизатором, чем газогенерирующая добавка нитрита натрия: при $d = 30$ мм газированное эмульсионное ВВ «Порэмит-М» с включениями алюминия имеет скорость детонации 3.8 км/с [21], а обсуждаемое алюминизированное ЭмВВ при том же самом диаметре — на 1 км/с больше и меньший критический диаметр, $d_{cr} \approx 10$ мм. Аналогичное заключение следует и из сравнения данных для ВВ без включений алюминия — базового ЭмВВ с микробаллонами МСВ и газированного ЭмВВ «Порэмит» [21].

Таким образом, ЭмВВ с порошковыми включениями из аммиачной селитры, пищевой соды, поваренной соли, алюминия или диоксида алюминия, которые увеличивают плотность

ВВ, при содержании сенсбилизатора 5 % имеют скорость детонации не менее 2.5 км/с, причем при увеличении диаметра заряда скорость детонации существенно, на $1 \div 2$ км/с, растет. Критический диаметр ЭмВВ с «тяжелыми» включениями увеличивается до $10 \div 25$ мм, при этом $D_{cr} \approx 2.5 \div 3.1$ км/с. Инертные добавки с максимальным акустическим импедансом — алюминий и диоксид алюминия — приводят к максимальной скорости детонации при одном и том же поперечном размере заряда. По-видимому, множественное взаимодействие ударной волны, ведущей детонацию, с акустически более «жесткими» включениями приводит к дополнительному разогреву эмульсионной матрицы, что способствует большей степени ее взрывного превращения и повышению скорости детонации относительно составов с менее плотными добавками.

Влияние включений, уменьшающих плотность ЭмВВ

Для понижения скорости детонации плотность ВВ уменьшалась за счет введения низкоплотной добавки. Для этого в эмульсию добавлялись микробаллоны МСВ в количестве m_{mb} сверх массы эмульсии m_{em} . При увеличении доли микробаллонов ($\mu = m_{mb}/m_{em}$) · 100 % до $50 \div 60$ % удается понизить плотность композиции до 0.5 г/см³ (рис. 2).

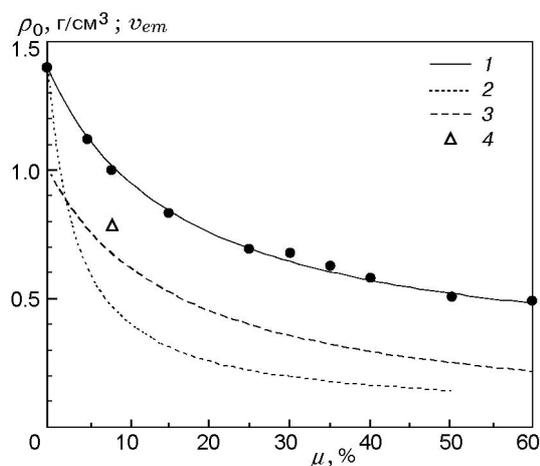


Рис. 2. Влияние массовой доли микробаллонов МСВ на плотность ЭмВВ при $\rho_{mb} = 0.15$ г/см³ (1) и 0.03 г/см³ (2) (3 — объемное содержание эмульсии v_{em} , 4 — микробаллоны 3М)

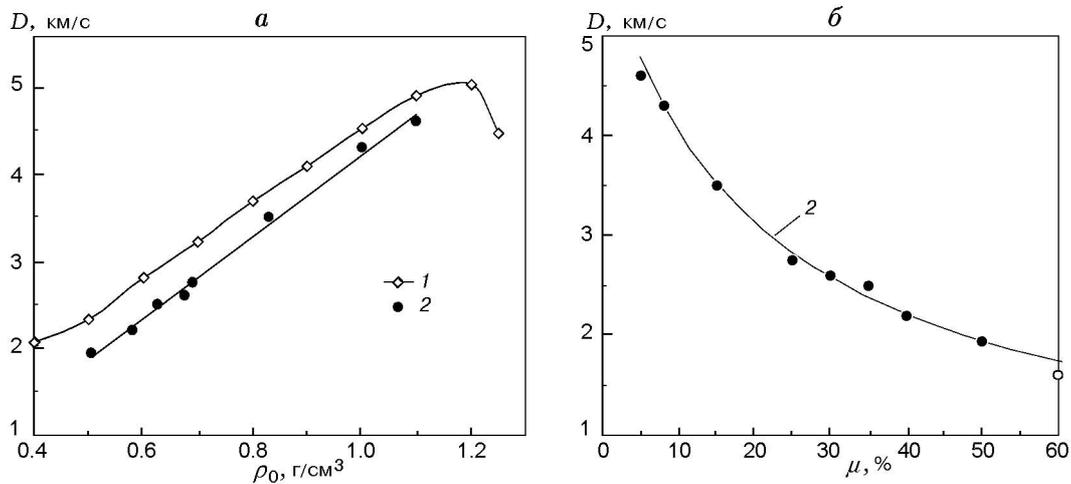


Рис. 3. Зависимость скорости детонации от плотности эмульсионных ВВ (а) и массовой доли включений (б):

микробаллоны: 1 — 3М, $d = 30$ мм [1], 2 — МСВ, $d = 20$ мм

Нетрудно показать, что зависимость плотности композиции ρ_0 от параметра μ определяется уравнением

$$\rho_0 = \rho_e \frac{1 + \mu}{1 + \mu R}, \quad (1)$$

где $R = \rho_e / \rho_{mb}^*$, ρ_{mb}^* — неизвестная «истинная» плотность микросфер. Коэффициент R находился из условия описания экспериментальных данных $\rho_0 = f(\mu)$ уравнением (1) (кривая 1 на рис. 2). Для микробаллонов МСВ $R = 6.17 \pm 0.25$, т. е. $\rho_{mb}^* = 0.23 \pm 0.01$ г/см³, что согласуется с оценкой $\rho_{mb}^* \approx \rho_{mb}/k \approx 0.23 \div 0.24$ г/см³ при коэффициенте упаковки $k = 0.62$, соответствующем плотной укладке микросфер одинакового размера.

Отметим, что при использовании более легких полимерных микробаллонов насыпной плотностью 0.03 г/см³ та же плотность ЭМВВ, что и при введении стеклянных микробаллонов, например 0.5 г/см³, достигается при существенно меньшем содержании включений — $\mu \approx 7\%$ (кривая 2 на рис. 2). Эмульсионное ВВ с полимерными микробаллонами может быть значительно дешевле, что важно при его практическом использовании.

Часть объема ЭМВВ, равная v_{mb} , заполнена инертным веществом — полыми микросферами. Оставшаяся часть v_{em} заполнена активным веществом — эмульсионной матрицей:

$$v_{em} = 1 - v_{mb} = 1/(1 + \mu R). \quad (2)$$

Предположим, что размер всех микросфер одинаков. Тогда при наиболее плотной упаковке они занимают объем $v_{mb} \approx 62\%$. При этом объем эмульсии $v_{em} \approx 38\%$. Это значение достигается при $\mu \approx 27\%$ для микробаллонов МСВ. Но за счет того, что существует распределение микробаллонов по размеру от 20 до 100 мкм [18], их массовую долю удастся увеличить до $50 \div 60\%$.

Объемная доля эмульсии v_{em} , рассчитанная по (2), уменьшается почти в 5 раз при $\mu = 60\%$ (кривая 3 на рис. 2). Соответственно скорость детонации $D \sim \sqrt{q} \sim \sqrt{v_{em}}$, пропорциональная квадратному корню из удельного выделения энергии q , должна уменьшаться в $\sqrt{5} \approx 2.2$ раза, т. е. возможно получение скоростей около 2 км/с и даже меньше, так как детонационная волна теряет энергию на вовлечение в движение и прогрев материала инертной добавки [10]. Результаты экспериментов подтверждают эту оценку.

В диапазоне плотностей ЭМВВ $\rho_0 = 0.5 \div 1.1$ г/см³ скорость детонации цилиндрического заряда практически линейно уменьшается с плотностью ВВ (рис. 3,а). Наши результаты согласуются с данными, приведенными в [1], с учетом различия в насыпной плотности сенсибилизирующих включений (микробаллонов 3М ($\rho_{mb} < 0.12$ г/см³) и МСВ), в составе эмульсионной матрицы и в диаметрах заряда. При $\mu > 20 \div 25\%$ скорость детонации менее 3 км/с (рис. 3,б), при $\mu = 60\%$ наблюдается слабо затухающий взрывной процесс со скоростью

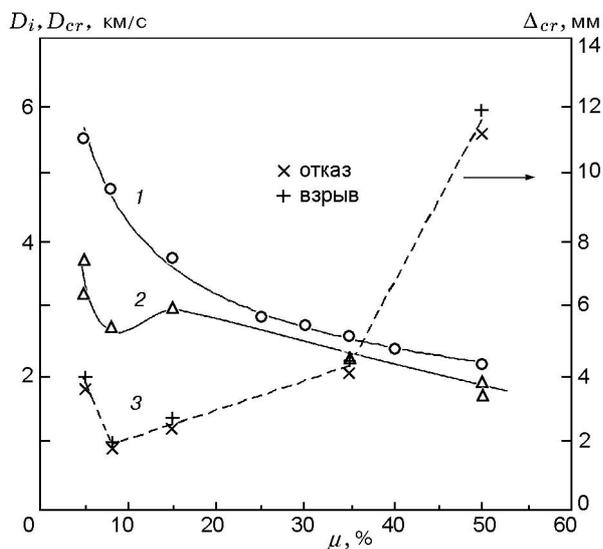


Рис. 4. Зависимость идеальной скорости детонации D_i (1), критической скорости детонации D_{cr} (2) и критической толщины Δ_{cr} (3) эмульсионного ВВ от массовой доли микробаллонов МСВ

1.5 ÷ 1.7 км/с. Зависимость скорости детонации от массовой доли включений описывается степенной зависимостью $D = D_e(1 + R\mu)^{-\alpha}$, следующей из вышеприведенного анализа. Из элементарного рассмотрения следует $\alpha = 0.5$, из анализа экспериментальных данных — $\alpha = 0.76 \pm 0.02$ (кривая 2 на рис. 3, б), что, безусловно, связано с упомянутыми выше дополнительными потерями энергии во фронте детонационной волны. Значение $D_e = 5.74 \pm 0.4$ км/с есть формальная оценка скорости детонации эмульсионной матрицы, в случае если матрица могла детонировать без сенсibilизатора (при $\mu = 0$).

Экспериментальные результаты $D = f(\mu, d)$ аппроксимировались уравнением [22]

$$D(d) = D_i(1 - A_R/d), \quad (3)$$

где D_i — скорость детонации при бесконечном диаметре, A_R — параметр, пропорциональный ширине зоны реакции. Уравнение (3) использовано для построения аппроксимирующих кривых на рис. 1 и 5. На рис. 4 приведена зависимость D_i от массовой доли микробаллонов (кривая 1). При увеличении μ скорость детонации D_i монотонно уменьшается вплоть до срыва детонации, а параметр A_R достигает минимума 0.6 ÷ 0.7 мм при $\mu = 25 \div 35$ %. Качественное поведение параметра A_R аналогично

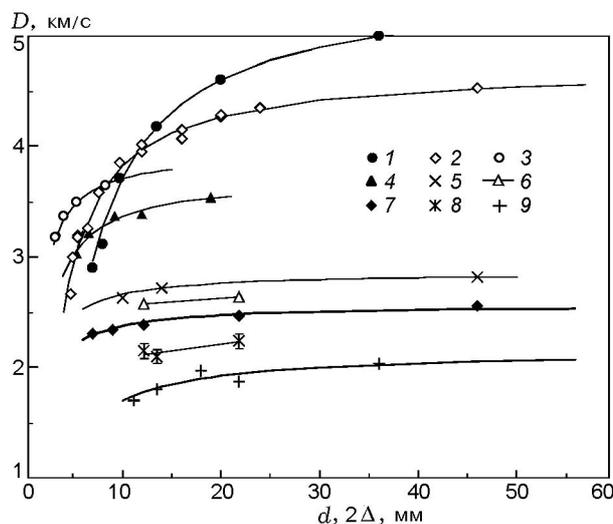


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от поперечного размера заряда эмульсионных ВВ: массовая доля МСВ, %: 1 — 5, 2 — 8, 3 — 8 % ЗМ, 4 — 15, 5 — 25, 6 — 30, 7 — 35, 8 — 40, 9 — 50

наблюдаемой зависимости критической толщины ЭмВВ от объемной доли микробаллонов ЗМ в клин-тесте [16].

На рис. 5 приведены наши данные по скорости детонации для эмульсионного ВВ с микробаллонами МСВ при различных значениях μ в зависимости от поперечного размера — диаметра цилиндрического заряда или толщины плоского слоя. По оси абсцисс — диаметр цилиндрического заряда или удвоенная толщина плоского заряда ВВ. В этих координатах возможно сопоставление результатов для цилиндрических и плоских зарядов*.

При увеличении концентрации полых микросфер МСВ более 15 % наблюдается слабая зависимость скорости детонации ЭмВВ от поперечного размера заряда по сравнению с данными при $\mu = 5$ %, что связано, возможно, с более полной реакцией за фронтом волны за счет значительного увеличения числа «горячих точек».

Для оценки влияния насыпной плотности микробаллонов были поставлены эксперименты с плоскими зарядами, содержащими импортные стеклянные микробаллоны ЗМ фракции К1, плотностью $\rho_{mb} \leq 0.1$ г/см³ при $\mu = 8$ %. Плотность соответствующего ЭмВВ со-

*В соответствии с теорией слабо искривленного фронта [23] для цилиндрических и плоских зарядов ВВ должны выполняться соотношения $D(d) = D(2\Delta)$ и $\Delta_{cr} \approx d_{cr}/2$.

ставила 0.79 г/см^3 (см. рис. 1, точки 4), $D_{cr} = 3.2 \text{ км/с}$. Для более легкого сенсibilизатора ЗМ число «горячих точек» увеличивается в ≈ 3 раза и критическая толщина уменьшается до 1.7 мм (рис. 5), что меньше значения $\Delta_{cr} \approx 4 \text{ мм}$ для ЭМВВ при $\mu = 5 \%$ МСВ. Таким образом, применение более легких полых микросфер ЗМ вместо микробаллонов МСВ существенно повышает детонационную способность ЭМВВ.

Для более детального исследования зависимости $D(d)$ были выбраны ЭМВВ при $\mu = 35$ и 50% .

Плотность ЭМВВ при $\mu = 35 \%$ составляет $0.61 \div 0.62 \text{ г/см}^3$. При изменении поперечного размера заряда от минимального $\Delta = 3.5 \text{ мм}$ до максимального $d = 46 \text{ мм}$ скорость детонации изменяется от 2.3 до 2.56 км/с . Зависимость $D(d, 2\Delta)$ описывается уравнением (3) при $D_i = 2.59 \pm 0.02 \text{ км/с}$, $A_R = 0.85 \pm 0.1 \text{ мм}$ (кривая, аппроксимирующая точки 7 на рис. 5). Для плоского слоя критическая толщина композиции составляет $2.6 < \Delta_{cr} \leq 3.5 \text{ мм}$. Критический диаметр $5 < d_{cr} \leq 9 \text{ мм}$.

Плотность ЭМВВ при $\mu = 50 \%$ составляет $0.5 \div 0.51 \text{ г/см}^3$. В опытах с этим ЭМВВ в цилиндрической геометрии при всех диаметрах использовались трубки из винипласта. Скорость детонации изменяется от 1.8 до 2.06 км/с при изменении поперечного размера заряда от $\Delta = 12 \text{ мм}$ до $d = 46 \text{ мм}$ (кривая 9, рис. 5). Зависимость $D(d)$ описывается уравнением (3) при $D_i = 2.18 \pm 0.08 \text{ км/с}$, $A_R = 2.36 \pm 0.71 \text{ мм}$. Критическая толщина плоского слоя $11 < \Delta_{cr} \leq 12 \text{ мм}$, критический диаметр $9.5 < d_{cr} \leq 13.5 \text{ мм}$. Эта композиция соответствует, по-видимому, минимальной скорости детонации, которую можно получить, используя эмульсию указанного состава. Увеличение количества сенсibilизатора приводит к ухудшению физической однородности ЭМВВ, к увеличению разброса данных и погрешностей оценки параметров в уравнении (3) при $\mu = 50 \%$.

Отметим, что при увеличении степени неоднородности ЭМВВ за счет введения большого количества микробаллонов отношение d_{cr}/Δ_{cr} уменьшается: при $\mu = 8 \%$ оно равно 2.4 [18], при $\mu = 50 \%$ — около 1.13 . Этот результат представляется достаточно неожиданным, так как для многих ВВ это отношение находится в диапазоне $2 \div 4$ [17, 18, 24]. По-видимому, для высокогетерогенных ЭМВВ

условия справедливости теории [23], в частности допущение малой кривизны детонационного фронта, не выполняются.

На рис. 4 приведены также зависимости критической скорости детонации (кривая 2) и критической толщины плоского слоя ЭМВВ (кривая 3) от массовой доли микробаллонов. При $\mu \approx 8 \%$ реализуется минимальная критическая толщина $\Delta_{cr} = 2 \text{ мм}$ [18]. При уменьшении μ до 5% критическая толщина увеличивается до 4 мм . При увеличении μ до 50% критическая толщина возрастает до 12 мм . Подобное поведение критической толщины ЭМВВ в зависимости от количества микробаллонов вполне понятно: без сенсibilизатора эмульсия не взрывается, а при большом количестве инертных включений доля взрывчатого компонента, эмульсии, существенно уменьшается.

Степень полноты взрыва, которая обычно характеризуется величиной $\eta = D_{cr}/D_i$, существенно растет при увеличении доли включений μ : $\eta \approx 0.5$ при $\mu = 5 \%$, $\eta \approx 0.9$ при $\mu = 25 \div 50 \%$, т. е. для низкоплотных ЭМВВ отношение D_{cr}/D_i близко к значениям, характерным для мощных индивидуальных ВВ. При большом количестве включений во взрывчатой композиции при детонации существенно увеличивается число активных «горячих точек». Дополнительно фрагменты из стекла за фронтом детонации могут играть роль своеобразной тяжелой оболочки для микрочастиц эмульсии. Оба фактора способствуют увеличению степени полноты взрыва, что и находит выражение в более пологих зависимостях $D = f(d)$.

При массовой доле микробаллонов МСВ $25 \div 50 \%$ скорость детонации ЭМВВ уменьшается до $1.8 \div 2.8 \text{ км/с}$ при критической толщине от 12 до $2 \div 4 \text{ мм}$ (см. рис. 4). Этот диапазон скоростей наиболее удобен для сварки взрывом большинства металлов в параллельной схеме. Таким образом, низкоплотные эмульсионные ВВ при $\mu \geq 20 \div 25 \%$:

- позволяют получать скорость детонации в диапазоне $2 \div 3 \text{ км/с}$;
- характеризуются слабой зависимостью скорости детонации от диаметра заряда ВВ: изменение скорости детонации не превышает 300 м/с при увеличении диаметра заряда от критических значений до 50 мм . Для сравнения: для российской реализации Semtex S35 эта разница достигает $300 \div 500 \text{ м/с}$ [25], а для аммиачно-селитренных ВВ — $700 \div 1000 \text{ м/с}$ [13];

- имеют существенно меньшую критическую толщину, чем многие другие ВВ, применяемые при сварке взрывом.

Возможные приложения низкоплотных ЭмВВ

Детонационное давление для низкоплотных ЭмВВ невелико: оценка по формуле $p_D \approx \rho_0 D^2 / (n + 1)$ при $D \leq 3$ км/с и показателе политропы продуктов взрыва $n \approx 2.4^*$ дает $6 \div 16$ кбар**, что достаточно для взрывного ускорения тонких металлических пластин и оболочек до скоростей, необходимых в ряде приложений. Приведем результаты, иллюстрирующие возможность применения низкоскоростных эмульсионных ВВ для плакирования металлов фольгами без буферного слоя — ослабителя ударных волн — и для сварки труб с трубными досками в параллельной схеме сварки взрывом.

В первом примере использовались плоские заряды ЭмВВ толщиной $3 \div 12$ мм, со скоростью детонации $2.0 \div 3$ км/с, плотностью $0.5 \div 1$ г/см³. ЭмВВ наносилось прямо на фольгу из молибдена, меди, бронзы, нержавеющей стали, титана или дюралюминия толщиной $0.1 \div 1$ мм. В качестве основания использовались пластинки из стали или меди с поперечными размерами 300×60 мм, толщиной 4 и 10 мм. Величина зазора между фольгой и основанием примерно равна толщине металлической пластинки, но не менее 100 мкм. Примеры плакирования приведены на рис. 6: сверху — плакирующий слой, снизу — основание. Коэффициент нагрузки r , равный отношению массы ЭмВВ к массе металлической фольги, составлял $0.7 \div 6$. Во всех случаях наблюдались волновой шов и качественная сварка взрывом без видимых нарушений целостности и отслоений фольги по всей поверхности плакируемой пластины. При толщине фольги не больше 400 мкм масса ЭмВВ на единицу площади составляла $\approx 0.2 \div 0.4$ г/см².

Во втором примере трубка из нержавеющей стали была приварена к трубной втулке из углеродистой стали (рис. 7, а) по параллельной схеме сварки взрывом труб с трубной доской, предложенной в [27]. Внутренний диаметр

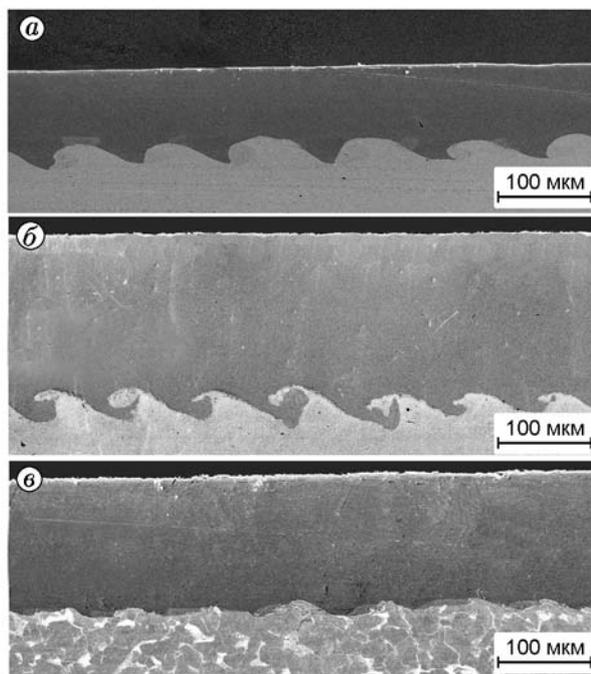


Рис. 6. Примеры взрывного плакирования стальных пластин металлическими фольгами при помощи эмульсионных ВВ со скоростью детонации менее 3 км/с:

а — титан (100 мкм)/нержавеющая сталь; б — молибден (0.2 мм)/сталь; в — дюралюминий (200 мкм)/сталь

трубки 11 мм, толщина стенки 0.75 мм. Величина искусственного зазора между трубкой и втулкой равна толщине стенки трубки. Использовался цилиндрический патрон из ЭмВВ при $\mu = 20$ %, заглубленный в трубку на длину $l = 20$ мм; плотность ЭмВВ 0.75 г/см³, скорость детонации ≈ 3 км/с; коэффициент нагрузки $r = 0.32$. Заряд инициировался стандартным детонирующим шнуром ДШВ диаметром 5 мм. На начальном участке длиной около 3 мм наблюдается развитие волнообразования, далее на длине $\approx l$ — волновой шов (рис. 7, в), обеспечивающий прочное герметичное соединение трубки с втулкой. В конце заряда ЭмВВ волнообразование прекращается (рис. 7, б).

Недостатком разработанных низкоплотных ЭмВВ является их физическое состояние, напоминающее слегка подсохший пластилин (ввиду большого количества микробаллонов из стекла). Сегодня формование из них зарядов нужного профиля возможно только вручную, что ограничивает мелкомасштабными издели-

* Авторы признательны В. В. Паю и Г. Е. Кузьмину за оценку интегрального показателя политропы продуктов взрыва для эмульсионного ВВ при $\mu = 8$ % по методике [26].

** Аналогичная оценка для Semtex S25-S35 [7] дает $p_D \approx 7 \div 16$ кбар при $n \approx 3$ и $D = 1.7 \div 2.4$ км/с.

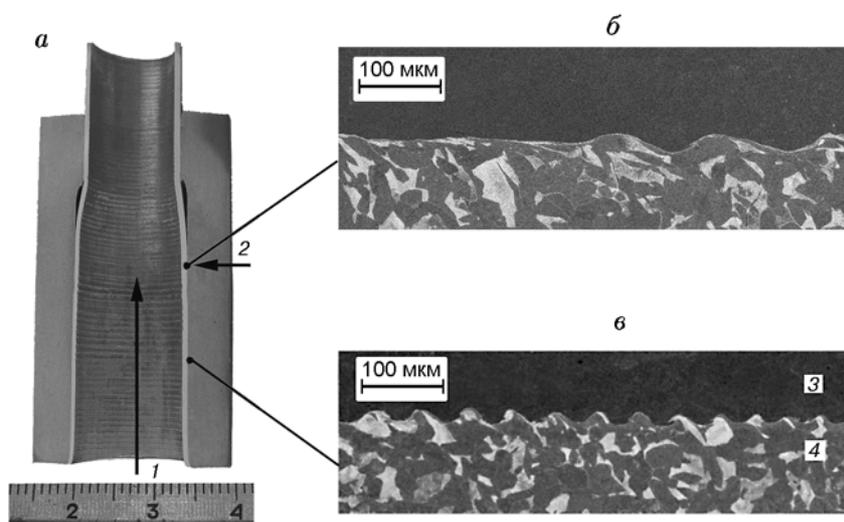


Рис. 7. Сварка взрывом металлической трубки со стальной втулкой:

a — разрез втулки после взрыва: 1 — направление детонации, 2 — конец заряда ЭмВВ;
б, в — микрошлифы из разных областей зоны соединения: 3 — нержавеющая сталь, 4 — сталь

ями применение этих ВВ для обработки материалов взрывом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны низкоскоростные эмульсионные ВВ со скоростью детонации $2 \div 3.5$ км/с, плотностью менее 1 г/см^3 и критической толщиной $2 \div 12$ мм. Эти композиции отличаются слабой зависимостью скорости детонации от диаметра цилиндрического или толщины плоского заряда ВВ. Особенностью этих ЭмВВ является большое количество в их составе полых микросфер из стекла.

Детонационные характеристики низкоплотных ЭмВВ позволяют использовать их в приложениях, где необходимо минимизировать взрывную нагрузку на обрабатываемые материалы. Приведены два примера использования низкоскоростных эмульсионных ВВ для сварки взрывом в параллельной схеме сварки: для плакирования металлов фольгами толщиной до 0.1 мм (без амортизирующего слоя — ослабителя ударной волны) и для сварки труб диаметром ≈ 10 мм с трубной втулкой.

Авторы признательны С. И. Рафейчику за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matsuzawa T., Murakado T., Aimoto H., Kitao S., Yoshida N. Method for explosive cladding // US Patent 4844321. 04.07.1989.
2. Masusi A., Kubota S., et al. Impact welding for urgent steel pipe repairs by emulsion explosives // Proc. 22nd Intern. Symp. on Shock Waves, London UK, 2000. — V. 1. — P. 565–570.
3. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980.
4. Crossland B., Williams P. E. G. An experimental investigation of velocity imparted to tube by an internal explosive charge // 4th Intern. Conf. of the Center for High Energy Forming. — Vail, Co., 1973. — P. 7.3.0–7.3.18.
5. Němeček J., Nykl F. Определение параметров и воздействия взрыва плоских зарядов ВВ при их детонации в замкнутой цилиндрической камере // Proc. 3rd Intern. Symp. «Explosive Working of Metals». — Mariánská Lázně, 1976. — V. 2. — P. 495–510.
6. Meinel M., Schwalbe M., Wolf H. Erfahrungen beim Explosivplattieren mit Pulverförmigen Ammonsalpeter Gesteinsprengstoffen // Ibid. — V. 5. — P. 524–535.
7. Hardening & Cladding Metals / Explosia a.s., Pardubice — Semtín, Czech Republic. http://www.explosia.cz/en/trhaviny/download/kat_list_hardening.pdf.
8. Boostering & Detonation / Mondial Defence Systems Ltd, UK. <http://www.mondial-defence.com>.

9. **Maranda A., Cudzilo S.** Explosive mixtures detonating at low velocity // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 2001. — V. 26. — P. 165–167.
10. **Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н.** Исследование детонации сильно разбавленных пористых ВВ. I. Влияние инертной добавки на параметры детонации // *Физика горения и взрыва*. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 92–101.
11. **Симонов В. А.** Области сварки взрывом. Основные параметры и критерии. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 1995. — С. 61.
12. **Бабков А. Д., Бесшапошников Ю. П., Кожевников В. Е., Чернухин В. И., Кузьмин С. В., Лысак В. И.** Комплексное исследование основных характеристик смесей аммонита 6ЖВ с кварцевым песком применительно к сварке взрывом // *Физика горения и взрыва*. — 1992. — Т. 28, № 2. — С. 107–108.
13. **Оголихин В. М., Яковлев И. В.** Применение игданита для сварки взрывом во взрывных камерах // *Изв. Волгоград. политехн. гос. унта*. — 2008. — № 3(41). — С. 105–110.
14. **Бесшапошников Ю. П., Кожевников В. Е., Степанов А. Б., Чернухин В. И.** Исследование характеристик аммиачной селитры и ее смесей с кварцевым песком применительно к сварке взрывом // *Физика горения и взрыва*. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 131–132.
15. **Wang Xuguang.** *Emulsion Explosives*. — Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
16. **Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fujiwara S., Kusakabe M., Shiino K.** Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // *Proc. 8th Symp. Intern. on Detonation*. — 1985. — P. 171–177.
17. **Petel O. E., Mack D., Higgins A. J., Turcotte R., Chan S. K.** Comparison of the detonation failure mechanism in homogeneous and heterogeneous explosives // *Proc. 13th Symp. Intern. on Detonation*. — 2006. — P. 2–11.
18. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Караханов С. М., Зыков В. В.** Критические диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества // *Физика горения и взрыва*. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 121–127.
19. **Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P. A.** Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // *Proc. 9th Symp. Intern. on Detonation*. — 1989. — P. 263–271.
20. **Lee J., Persson P. A.** Detonation behavior of emulsion explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 1990. — N 15. — P. 208–216.
21. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // *Труды междунар. конф. «V Харитоновские научные чтения»*. — Саров: ВНИИЭФ, 2003. — С. 288–297.
22. **Eyring H., Powell R. E., Duffey G. H., Parlin R. B.** The stability of detonation // *Chem. Rev.* — 1949. — V. 45, N 1. — P. 69–181.
23. **Bdzil J. B.** Steady-state two-dimensional detonation // *J. Fluid Mech.* — 1981. — V. 108. — P. 195–226.
24. **Физика взрыва** / С. Г. Андреев, А. В. Бабкин и др. / Под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1, п. 9.2.3.
25. **Andreevskikh L., Deribas A., Drennov O., Mikhailov A., Titova N., Fomicheva L.** New mix explosives for explosive welding // *Shock-Assisted Materials, Synthesis and Processing: Science, Innovations, and Industrial Implementation*. — М.: Torus Press, 2008. — P. 52.
26. **Кузьмин Г. Е., Мали В. И., Пай В. В.** О метании плоских пластин слоями конденсированных ВВ // *Физика горения и взрыва*. — 1973. — Т. 9, № 4. — С. 558–562.
27. **Crossland B., Bahrani A. S., Williams J. D., Shribman V.** Explosive welding of tubes to tubeplates // *Welding and Metal Fabrication*. — 1967. — V. 35, N 3. — P. 88–94.

Поступила в редакцию 1/XI 2008 г.