

ВЛИЯНИЕ ФЛЕГМАТИЗАТОРА НА ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ВЗРЫВА ВВ ПРИ УДАРЕ

И. А. Карпунин, В. К. Боболев
(Москва)

Для уменьшения чувствительности ВВ к механическим воздействиям можно воспользоваться различными способами флегматизации [1, 2]. В настоящей работе остановимся на обсуждении наиболее распространенного способа снижения чувствительности ВВ при введении в его массу небольших количеств инертных пластичных добавок — флегматизаторов. Обычно для этой цели выбирают углеводороды (парафин, церезин и др.), хлорсодержащие органические соединения (гловакс, совол), графит и ряд других веществ.

Несмотря на широкое практическое использование указанного метода, физические основы флегматизации еще не получили необходимого развития. Существующие в работах по флегматизации представления о роли флегматизатора при механических воздействиях в основных своих чертах являются интерпретацией известных положений теории граничного трения и смазки. Поэтому целесообразно провести экспериментальное изучение физико-механических свойств таких систем при внешнем воздействии на них и проанализировать полученные результаты с точки зрения этой теории.

В работе исследовалось поведение флегматизированного октогена и тексогена различной дисперсности при ударе на копре. В качестве флегматизаторов были использованы парафин, оксизин, стеарин, пчелиный воск и др. Флегматизатор наносили на кристаллы ВВ либо из раствора авиационного бензина легкокипящей фракции, либо эмульсионным способом.

Механические свойства флегматизированных составов изучались по диаграммам напряжение — деформация ($\sigma - \epsilon$) и по зависимостям прочностных характеристик ВВ от процентного содержания флегматизатора. Диаграммы $\sigma - \epsilon$ можно построить из осциллограмм давления при ударе, запись которых осуществляется тензодатчиком [3]. Используя закон сохранения импульса при ударе, рассчитываем функцию скорости движения груза от времени и далее графическим интегрированием этой функции определяем изменение толщины слоя ВВ $\Delta h(t)$ в процессе ударного сжатия до момента прочностного разрушения образца. Построенные таким образом на рис. 1 диаграммы $\sigma - \epsilon$ для чистого и флегматизированного парафином тексогена отражают различие их механических свойств. По сравнению с чистым тексогеном флегматизированный состав обнаруживает отчетливо выраженные пластические свойства до

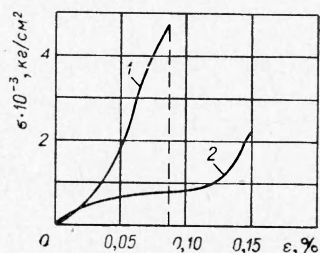


Рис. 1. Диаграмма $\sigma - \epsilon$ для чистого 1 и флегматизированного 2 октогена.

наступления прочностного разрушения, которое происходит при значительно меньшем напряжении. Изменение прочности флегматизированных составов в зависимости от содержания добавки можно проследить по результатам измерений, которые приведены в табл. 1.

По мере увеличения процентного содержания флегматизатора в смеси $\sigma_{пр}$ составов резко уменьшается. Одновременно с этим наблю-

Таблица 1
Свойства флегматизированных ВВ

Состав, %	Предел прочности $\sigma_{пр}$, кг/см ²	$\bar{P}_{кр} \times 10^{-3}$, кг/см ²
Гексоген	820	7,0
Гексоген+парафин 97/3	470	7,0
Гексоген+парафин 95/5	370	7,0
Гексоген+парафин 90/10	290	7,0
Гексоген+парафин 80/20	150	—
Октоген	1250	6,2
Октоген+оксизин 97/3	540	6,8
Октоген+оксизин 95/5	460	6,4
Октоген+оксизин 90/10	380	7,4

дается и усиление пластических свойств всей взрывчатой системы в целом, что служит характерной особенностью флегматизированных составов. На первый взгляд может показаться, что увеличение пластичности составов ВВ должно способствовать возбуждению взрывов при ударе за счет усиления тепловыделения при пластической деформации. Однако на опыте наблюдаем обратную картину. Это кажущееся проти-

воречие объясняется различным распределением пластической деформации при ударе в чистом и флегматизированном ВВ, что обусловлено специфическими свойствами флегматизатора, основным из которых является существование у этих веществ малого предельного напряжения на сдвиг θ . Так, предельное напряжение на сдвиг парафина $\theta = 3-4$ кг/см² [4], пальметиновой кислоты — 4 кг/см² [5], стеарина — 5,7 кг/см² [6]. Поскольку характер граничного трения определяется прежде всего прочностью на сдвиг слабого материала фрикционной пары, то нанесение на поверхность кристаллов ВВ тонкого слоя флегматизатора с низким сопротивлением на сдвиг означает, согласно теории смазки, перенос зоны пластического сдвигообразования из поверхностных слоев кристаллов ВВ в слой флегматизатора. Отмеченный характер деформации проявляется не всегда. Экспериментально установлено [4, 7], что граничные слои смазок, к разряду которых относятся и флегматизаторы, в одинаковых условиях внешнего воздействия при различной их толщине обладают различными механическими свойствами: чем меньше слой смазки, тем выше его упругость и ниже пластичность. Это связано с тем, что предельное напряжение на сдвиг слоев смазки не является величиной постоянной. По мере удаления от твердых поверхностей и увеличения толщины слоя смазки предельное напряжение на сдвиг уменьшается по экспоненциальному закону, стремясь в пределе к прочности на сдвиг самого материала смазки θ .

Сравнение приведенных результатов исследования действия смазки при трении металлов и результатов нашей работы, относящихся к изучению влияния флегматизаторов на механические свойства взрывчатых систем, указывает на несомненное феноменологическое сходство изучаемых явлений и позволяет сделать некоторые выводы.

С увеличением процентного содержания флегматизатора во взрывчатой системе толщина его прослоек между кристаллами твердого ВВ возрастает. Так как прочность на сдвиг флегматизатора сильно зависит от толщины граничного слоя, то естественно, что его пластические свойства в большей степени проявляются в толстых слоях (или при неиз-

менном размере кристаллов ВВ при большей концентрации флегматизатора). Если теперь учесть, что предельное напряжение на сдвиг убывает в направлении по нормали от твердых поверхностей, то наименьшим сопротивлением пластическому сдвигу должны обладать те участки граничного слоя флегматизатора, которые дальше всего удалены от окружающих кристаллов ВВ. Поэтому пластическому течению в первую очередь подвергаются осевые части граничных слоев флегматизатора. Следовательно, если в чистом ВВ пластическая деформация происходит в самом веществе, то во флегматизированном ВВ — главным образом в прослойках флегматизатора, при условии, что последний равномерно нанесен на кристаллы ВВ. При этом прослойки служат основным источником тепловыделения, за счет которого и создается нагрев самого ВВ при ударе. (Отметим попутно, что из сравнения хода и расположения кривых сжатия при ударе для чистого и флегматизированного ВВ подобный вывод был сделан в работе [8].) Однако нагрев флегматизированного ВВ будет меньшим, чем нагрев в чистом ВВ, так как тепловыделение при пластической деформации приведет прежде всего к плавлению флегматизатора, температура плавления которого, как правило, не превышает нескольких десятков градусов. Подъем температуры плавления за счет приложения давления всестороннего сжатия также будет невелик в силу малой прочности флегматизированного ВВ. В связи с этим достижение критических температур локальных разогревов во флегматизированном ВВ менее вероятно. Необходимым доказательством этого предположения могло бы служить исследование характера зависимости критического напряжения $p_{кр}$ (удельное давление всестороннего сжатия, при котором в ВВ образуются очаги с температурой $T_{кр}$, необходимой для возбуждения взрыва [9]) флегматизированных составов от концентрации добавки в широком диапазоне процентных соотношений. В условиях наших опытов значение $p_{кр}$ удастся измерить только при малом содержании флегматизатора (~ до 10%) ввиду очень слабой прочности этих составов. Можно лишь сказать, что $p_{кр}$ смеси гексоген+парафин 80/20 уже превосходит $p_{кр}$ ТНТ $\sim 12 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ [9], так как даже при этих напряжениях зарегистрировать взрыв не удастся. Об этом же свидетельствует и некоторое повышение $p_{кр}$ состава октоген+оксизин 90/10 (см. табл. 1). Следует отметить, что, по нашим наблюдениям, повышение $p_{кр}$ состава с увеличением процентного содержания инертной добавки вообще характерно для систем ВВ+инертная добавка, если частицы последней не участвуют непосредственно в образовании горячих очагов при ударе, т. е. не проявляют сенсебилизирующего действия. Повышение $p_{кр}$ взрывчатой системы свидетельствует об ухудшении условий возбуждения взрыва.

Помимо указанных особенностей действия флегматизаторов на чувствительность ВВ к удару наиболее важным их свойством является способность резко ухудшать условия распространения взрывчатого превращения от горячих очагов, образующихся при внешнем механическом воздействии. Разберем более подробно этот вопрос.

Допустим, что при ударе на какой-либо частице ВВ возник очаг критической температуры. В случае чистого ВВ это приведет к распространению взрыва на окружающие частицы ВВ. Во флегматизированном ВВ указанная частица отделена от других прослойками флегматизатора и для взрыва соседних частиц тепло от источника должно передаваться через прослойки флегматизаторов. Естественно,

что при этом условия теплоспередачи зависят от тепловой релаксации прослойки. Из соотношения [10]

$$\Delta l \approx \sqrt{\chi \tau} \quad (1)$$

видно, что толщина слоя флегматизатора Δl , прилегающего к горячему очагу, на которой будет заметно изменяться температура за время удара τ , становится тем меньше, чем меньше коэффициент температуропроводности флегматизатора χ . При $l > \Delta l$ перенос тепла через прослойки очень мал (при условии, что температура самой прослойки меньше температуры горячего очага) и поэтому следует ожидать затухания очага. Изменяя дисперсность ВВ и процент вводимой добавки, можно в значительной степени варьировать толщину прослойки, и при известных физических параметрах флегматизатора задать ее больше Δl и таким образом проверить высказанное выше предположение. С этой целью были поставлены опыты по изучению вероятности возбуждения и распространения взрыва на смесях гексогена различной дисперсности с парафином, оксизином, стеарином и пчелиным воском. При проведении этих опытов был использован «газовый» приборчик, предложенный в работе [11]. Принцип действия этого прибора состоит в том, что во время удара по навеске ВВ газообразные продукты разложения образуют перепад уровней жидкости в манометре, соединенном с приборчиком, фиксируя который можно определить объем выделившихся газов ΔV . Если построить затем зависимость

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta N}{N} \left(\frac{\Delta V}{V_{\max}} \right),$$

где $\frac{\Delta N}{N}$ — число опытов, в которых выделившийся объем газов находится в интервале $[V + \Delta V]$; а $V_{\max}$ — объем газов, образующихся при взрывчатом разложении всей навески, то получится картина, представленная на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что эта зависимость имеет два разграниченных, отчетливо выраженных максимума. Первый из них дает распределение вероятности возбуждения затухающих очагов, что сопровождается малым выделением газов, а второй максимум представляет собой распределение вероятности распространения очага на остальную часть заряда с выделением большого количества газообразных продуктов разложения. В работе [12] вероятность взрыва при ударе определяется как произведение двух вероятностей: возбуждения очага W_0 и его распространения W_1 ,

$$W = W_0 W_1. \quad (2)$$

Если в N опытах мы имеем N_0 случаев зарождения очагов, а в N_* случаях — взрывы, тогда вероятность возбуждения очагов можно выразить как

$$W_0 = \frac{N_0 + N_*}{N}, \quad (3)$$

а вероятность распространения

$$W_1 = \frac{N_*}{N_0 + N_*}. \quad (4)$$

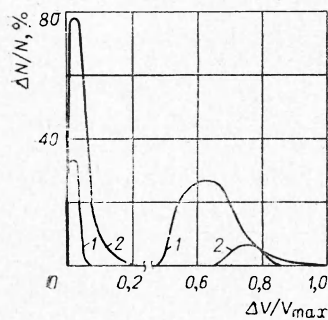


Рис. 2. Кривые распределения вероятностей возбуждения и распространения взрыва при ударе для чистого 1 и флегматизированного 2 гексогена.

Из совместного рассмотрения распределений вероятности возбуждения и распространения очага в чистом и флегматизированном ВВ (см. рис. 2) можно заметить, что при одинаковом количестве опытов происходит перераспределение обеих вероятностей. Увеличение и «размазывание» первого максимума и уменьшение второго у флегматизированного ВВ указывает на то, что флегматизатор уменьшает вероятность распространения очага. При увеличении размера прослойки флегматизатора за счет большего содержания его в смеси при неизменной дисперсности ВВ или за счет укрупнения размера частиц ВВ при неизменном количестве флегматизатора второй максимум уменьшается и при некоторой величине прослойки пропадает. Условием отсутствия второго максимума, согласно изложенным выше соображениям, должно быть превышение толщины прослойки флегматизатора расчетной величины Δl . Так, для парафина, коэффициент температуропроводности которого $\chi = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{сек}$, при временах удара $\tau = 300\text{—}500 \text{ мксек}$ величина Δl составляет приблизительно $5\text{—}7 \text{ мк}$. Помещенные в табл. 2 результаты опытов по изучению вероятностей возбуждения и распространения очагов для гексогена различной дисперсности, флегматизированного парафином, показывают, что второй максимум на зависимости $\frac{\Delta N}{N} \left(\frac{\Delta V}{V_{\max}} \right)$ отсутствует на смесях, где толщина прослойки превышает рассчитанное по (1) значение Δl для парафина.

В табл. 2 звездочкой обозначены те размеры прослоек парафина, при которых не наблюдалось взрывов при ударе в серии из 50 опытов (газовый прибор, навеска 50 мг, вес груза 10 кг, высота падения груза 25 см). Расчет прослоек флегматизатора производился в предположении сферической формы частиц ВВ и отсутствия воздушных включений в заряде по формуле

$$l = r \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho_1 x_0}} - 1 \right), \quad (5)$$

где l — размер прослойки флегматизатора; r — размер частиц ВВ; ρ_0 и x_0 — плотность и процентное содержание ВВ в смеси; ρ_1 — плотность смеси ВВ + флегматизатор.

Как видно из таблицы, для каждого размера частиц ВВ существует критическая концентрация флегматизатора, выше которой зародившиеся при ударе горячие очаги затухают. Аналогичный вывод следует из рассмотрения зависимостей вероятности возбуждения и вероятности распространения взрыва от процентного содержания флегматизатора для смесей гексогена с различными добавками (табл. 3).

Можно заметить, что содержание в смеси 6—8% флегматизатора полностью подавляет распространение взрыва на весь заряд ВВ, тогда как возбуждение горячих очагов происходит приблизительно с той же вероятностью в более широком диапазоне концентраций флегматизатора. Возбуждение горячих очагов ударом становится крайне затрудни-

Таблица 2
Зависимость вероятности распространения взрыва от толщины прослоек флегматизатора в смесях гексоген + парафин

Содержание парафина, %	Размер частиц гексогена, мк					
	63	100	160	250	315	400
	Размер прослойки парафина, мк					
3	1,2	2	3,2	5,0	6,3*	8*
5	1,9	3	4,8	7,5	9,5*	12*
10	4,4*	7,0*	11,0*	17,5*	22,0*	28,0*

Таблица 3

Зависимость вероятности возбуждения W_0 и вероятности распространения взрыва W_1 от концентрации флегматизатора в смеси (50 опытов, газовый прибор)

Вещество	Содержание флегматизатора, %	W_0 , %	W_1 , %	Толщина прослойки флегматизатора, мк
Гексоген, фракции 160–250 мк	0	58	93	—
Гексоген + оксизин	1	34	65	1,6÷2,5
	3	42	52	3,2÷5,0
	5	52	2	4,8÷7,5
	6	48	0	6,4÷10,0
	7	34	0	7,8÷12,0
	8	30	0	8,2÷12,8
	10	24	0	11,0÷17,5
	11	20	0	12,8÷20,0
	13	0	0	14,4÷22,5
Гексоген + стеарин	1	52	77	1,6÷2,5
	3	40	65	3,2–5,0
	5	42	38	4,8–7,5
	6	38	32	6,4–10,0
	7	40	15	7,8–12,0
	8	14	0	8,2–12,8
	10	24	0	11,0–17,5
	11	8	0	12,8–20,0
	15	0	0	17,8–27,8
Гексоген + пчелиный воск	3	40	70	3,2–5,0
	5	36	44	4,8–7,5
	6	32	8	6,4–10,0
	7	18	0	7,8–12,0
	9	24	0	9,6–15,0
	10	16	0	11,0–17,5
Гексоген + парафин	3	52	30	3,2–5,0
	5	48	20	4,8–7,5
	7	32	2	7,8–12,0
	8	24	0	8,2–12,8
	10	20	0	11,0–17,5
	15	0	0	17,8–27,8

тельным при содержании более 10% флегматизатора в смеси, что согласуется с отмеченным выше фактом увеличения $p_{кр}$ у таких составов. Таким образом, опыты показывают, что флегматизатор действует как тепловой барьер, который препятствует передаче тепла от очага к соседним слоям ВВ и тормозит развитие взрыва. Этот вывод находится в полном согласии с результатами, полученными Линдером [13] при инициировании ударом флегматизированного тэна и β -октогена.

Приведенные выше экспериментальные данные характеризуют влияние флегматизатора на условия распространения очага в пределах зоны удара. Однако можно показать, что подобное же действие флегматизатор оказывает не только на начальной, но и на последующих стадиях развития взрыва.

Известно, что одним из этапов развития химической реакции от горячих точек является процесс горения с резко возрастающей скоро-

стью и последующим переходом горения в детонацию [14, 15]. Влияние флегматизатора на этой стадии развития взрыва было исследовано нами совместно с С. В. Чуйко на смесях гексогена с парафином в условиях нарастающего давления [16]. Как показали эти исследования, основной эффект введения флегматизатора состоит в том, что не влияя на последовательность развития процесса, флегматизатор устраняет взрывы, наблюдаемые в чистом ВВ, сводя процесс срыва нормального горения к ускоренному выгоранию оставшейся части заряда без каких-либо признаков механического разрушения оболочки. По нашему мнению, это связано с тем, что при прорыве продуктов горения по порам внутрь заряда флегматизатор здесь, как и раньше, играет роль теплового барьера. Отбирая на себя значительную часть тепла газов, он не позволяет им воспламенить соседние слои ВВ.

Срыв нормального режима горения часто сопровождается переходом в детонацию с малой скоростью распространения [14]. Представления, развитые в настоящее время относительно механизма детонации с малой скоростью для твердых ВВ, предполагают инициирование химической реакции с поверхности кристаллов ВВ [17]. В связи с этим наличие слоя флегматизатора на поверхности частиц ВВ должно существенно затруднять распространение химической реакции в глубь частиц ВВ и тем самым снижать скорость детонации или даже приводить к предотвращению этого режима. Именно такой эффект флегматизатора наблюдался в работах [13, 18].

Все эти факты указывают на то, что затруднение процесса распространения на любой стадии развития взрыва является характерной особенностью действия флегматизатора и служит, по-видимому, главной причиной значительного понижения чувствительности флегматизированных ВВ к механическим воздействиям, в том числе и к удару.

ВЫВОДЫ

1. Присутствие флегматизатора во взрывчатой системе приводит к сильному изменению ее механических свойств (уменьшение прочности, усиление пластичности).

2. В процессе внешнего воздействия на заряд ВВ флегматизатор воспринимает на себя основную часть пластической деформации и связанного с ней тепловыделения, что затрудняет условия инициирования ВВ.

3. Флегматизатор выполняет роль теплового барьера, тем самым препятствуя процессу распространения на любой стадии развития взрыва при ударе.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Л. Г. Болховитинову за полезные советы при обработке экспериментальных данных.

*Поступила в редакцию
5/IV 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Боболев, И. А. Карпукhin. Докл. АН СССР, 1963, 151, 1.
2. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, И. А. Карпукhin. Сб. «Взрывное дело», 52/9, Госгортехиздат, 1963.
3. Л. Г. Болховитинов. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, М., 1966.

4. В. М. Корбут. Докл. АН СССР, 1959, **124**, 1, 72.
 5. И. С. Аветисян, Г. И. Епифанов. Докл. АН СССР, 1959, **128**, 5, 973.
 6. А. С. Ахматов. Тр. II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, т. 3, 1949.
 7. Г. М. Бартенев, В. А. Лепетов, В. И. Новиков. Докл. АН СССР, 1954, **93**, 15.
 8. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1961, **138**, 4.
 9. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. Сб. «Взрывное дело», № 63/20. «Недра», 1967.
 10. Л. Д. Ландау, Е. Г. Лифшиц. Механика сплошных сред. Физматгиз, 1954.
 11. К. К. Андреев, Ю. А. Терехилина. Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., Оборонгиз, 1963.
 12. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, З. И. Ратнер. Докл. АН СССР, 1945, **50**, 303.
 13. P. W. Linder. Trans. Far. Soc., 1961, **53**, 6.
 14. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых веществах. ИЛ, 1955.
 15. А. Масек. J. Chem. Phys., 1959, **31**, 1962.
 16. В. К. Боболев, И. А. Карпухин, С. В. Чуйко. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, **1**, 44.
 17. А. Я. Апин, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1947, **241**, 58.
 18. А. В. Дубовик. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, М., 1966.
-