

4. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6.
5. J. E. Lindstrom. J. Appl. Phys., 1966, 37, 4873.
6. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, 1967.
7. S. J. Jacobs, T. P. Liddiard, B. E. Drimmer. 9-th Symposium (International) on Combustion. New York — London, Academic Press 1963, p. 517.
8. J. V. Ramsay and A. Popolato. 4-th Symposium (International) on Detonation. Washington, 1967, p. 233.
9. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Я. Апин. ФГВ, 1969, 5, 4.
10. D. Stirre, J. O. Jonson, J. Wacherle. J. Appl. Phys., 1970, 41, 9.
11. J. E. Lindstrom. J. Appl. Phys., 1970, 41, 337.
12. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин. ФГВ, 1971, 7, 1.
13. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ПТЭ, 1963, 1.
14. В. А. Летягин, В. С. Соловьев, М. М. Бойко, О. А. Кузнецов. III всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черногловка, 1971.
15. М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер. Методика рационального планирования экспериментов. М., «Наука», 1970.
16. А. В. Иванов, Г. К. Круг. Сб. «Экспериментально-статистические методы получения математического описания и оптимизации сложных технологических процессов». Вып. 2. М., НИИТЭХИМ, 1964.
17. H. Vermer, J. M. Lezand and I. Chevalier. In Behavior of Dense Media under High Dynamic Pressure Gordon and Beach. N. Y., 1968, p. 51.
18. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
19. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Тезисы I-го всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М., «Наука», 1968.

УДК 662.215.1

## ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ ВВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРОЙ

*М. А. Мельников, В. В. Никитин*  
(Томск)

Значительное влияние на чувствительность ВВ оказывает введение различного рода добавок, в зависимости от характера которых чувствительность ВВ к некоторым видам воздействия может измениться.

Известно [1—5], что присутствие небольших количеств инертных примесей, обладающих высокой температурой плавления и большой твердостью (стекло, корунд и др.), повышают чувствительность ВВ к удару, трению и, наоборот, добавки с низкой температурой плавления и большой пластичностью (воск, парафин и др.) снижают чувствительность этих же ВВ к тем же воздействиям. Не является в этом отношении исключением и влияние добавок на чувствительность ВВ, инициируемых электрическим разрядом. Однако до настоящего времени систематических исследований по влиянию добавок на чувствительность ВВ к электрическому разряду не проводилось.

Для выяснения механизма инициирования детонации электрическим разрядом представляют интерес исследования по влиянию добавок на чувствительность ВВ к разряду, чему и посвящена настоящая работа.

В работе [6] высказано предположение, что наиболее вероятным механизмом возбуждения детонации вторичных ВВ, инициируемых электрическим разрядом, является воспламенение частиц ВВ в результате термического действия плазмы разряда. Следовательно, в таком случае сенсбилизаторами должны быть такие вещества, которые могут воспламеняться в канале искрового разряда и сгорать с выделением

значительного количества тепла и повышением температуры горения. Реагирование металлических добавок в ударной волне от разряда менее вероятно из-за более низкой температуры и кратковременности ее действия по сравнению с плазмой разряда. Кроме того, добавки должны удовлетворять следующим требованиям: обладать высокой электропроводностью и достаточно малыми размерами частиц (порядка нескольких микрон). Это гарантирует протекание разрядного тока через них и быстрый нагрев до температуры испарения частиц. Такими добавками могут служить порошкообразные (мелкодисперсные) металлы: алюминий, магний, титан, цирконий, др. Они характеризуются высокой теплотой, температурой горения [7] и высокой электропроводностью.

Для экспериментальной проверки этого положения был выбран ряд добавок, отличающихся по физико-химическим и механическим свойствам.

Опыты проводились на гексогене с размером частиц 90—100 мк, плотностью 1,1 г/см<sup>3</sup> и аммоните 6ЖВ промышленной дисперсности плотностью 0,85 г/см<sup>3</sup>.

В первой серии опытов использовались токопроводящие добавки: порошкообразные металлы (Al, Mg, Ti, Zr, бронза) и графит, во второй — инертные непроводящие добавки: тальк, окислы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO, толченое стекло. Инициирование зарядов осуществлялось в контуре с параметрами: C<sub>r</sub> = 0,01 мкф, L = 0,95 мкгн. Оценка минимальной энергии инициирования производилась по выделившейся в канале разряда энергии.

В таблице приведены экспериментальные результаты по влиянию добавок на минимальную энергию инициирования гексогена W<sub>min</sub> при содержании одной из указанных добавок в количестве 1 вес. %.

Добавка	Средний размер частиц, мк	Уд. вес, г/см <sup>3</sup>	Теплофизические параметры			Удельная теплота, ккал/г		W <sub>min</sub> , Дж
			T, мл, °C	C, кал/г·град	λ, кал/см·сек·град	сгорания Q <sub>г</sub>	испарения q <sub>и</sub>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	3,96	2050	0,24	—	—	—	0,58
MgO	70	3,6	2800	0,23	—	—	—	0,56
Стекло	120	2,4	800	0,2	0,0027	—	—	0,64
Тальк	10	2,7	1400	0,2	0,002	—	—	2,05
Бронза	30	8,0	900	0,091	0,153	—	—	1,2
Графит	150	2,25	3600	0,16	0,012	8,15	14,3	0,6
Алюминий (пудра ПП-4)	10	2,67	660	0,217	0,504	7,2	2,58	0,18
Магний	100	1,74	651	0,247	0,38	5,93	1,25	0,225
Титан	35	4,54	1660	0,142	0,036	4,55	2,35	0,19
Цирконий	5	6,5	1860	0,067	0,05	2,84	1,55	0,21
Гексоген чистый	90-100	1,80	203,5	0,3	—	1,3	—	0,5

Из таблицы следует, что W<sub>min</sub> снижается только при введении горючих металлических добавок: Al, Mg, Ti, Zr, т. е. веществ, выделяющих энергию при окислении. Все остальные добавки понижают чувствительность ВВ к электрическому разряду. Причем флегматизирующий эффект инертной добавки в основном определяется размерами частиц, а не ее теплофизическими параметрами. Так, тальк, имеющий самые мелкие частицы (~10 мк), наиболее сильно снижает чувствительность ВВ. Стекло, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO, размеры частиц которых примерно одинаковы и сравнимы с размерами частиц ВВ, практически одинаково влияют на W<sub>min</sub>.

На рисунке приведены графики, иллюстрирующие влияние процентного содержания некоторых добавок на  $W_{\min}$  гексогена. С увеличением содержания графита (кривая 2), бронзы (кривая 3) и талька (кривая 4) энергия инициирования ВВ повышается, при этом наиболее быстрый рост  $W_{\min}$  наблюдается при введении талька.

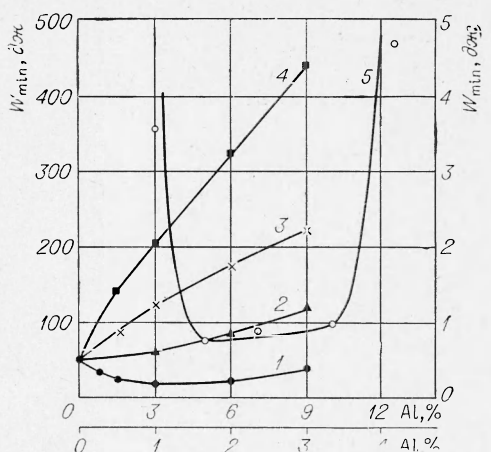
При использовании в качестве добавки алюминиевой пудры (кривые 1 и 5) зависимость  $W_{\min}$  от процентного содержания добавки имеет вид кривой с явно выраженным оптимальным содержанием алюминия в ВВ, при котором  $W_{\min}$  имеет наименьшее значение.

Снижение минимальной энергии инициирования ВВ за счет введения добавок некоторых металлов: Al, Mg, Ti, Zr нельзя объяснить тем, что при пробое смеси ВВ происходит воспламенение частиц ВВ расплавленными частицами металлических добавок, нагретых до температуры испарения. В противном случае при добавке бронзы должен был бы наблюдаться больший сенсibiliзирующий эффект, чем при Ti и Zr, так как последние имеют более высокие значения температуры и теплоты испарения, чем бронза. Однако эксперимент не подтверждает этого.

Можно также предположить, что сенсibiliзирующий эффект добавки обусловлен выделением в канале разряда тепла от сгорания частиц добавки. Приведенные экспериментальные данные по добавке Al, Mg, Ti и Zr не противоречат этому, однако графит, характеризующийся самой высокой теплотой сгорания из всех используемых добавок, не снижает  $W_{\min}$ , а наоборот, повышает. Так, с увеличением графита в ВВ до 3%  $W_{\min}$  возрастает в 3 раза по сравнению с  $W_{\min}$  для чистого гексогена. Следует иметь в виду, что для воспламенения частиц графита в канале разряда требуется значительная энергия. Поэтому можно полагать, что если частицы графита и воспламеняются в канале разряда, то тепловой эффект от их сгорания за время индукционного периода очень мал, так как скорость горения в этих условиях чрезвычайно мала. Следовательно, графит, обладающий хорошей электропроводностью, только забирает большую часть тепловой энергии разряда и действует как флегматизатор.

Так что высокая электропроводность и большая теплота сгорания добавки являются необходимым, но недостаточным условием для проявления их сенсibiliзирующего действия на чувствительность вторичных ВВ к электрической искре.

Объяснение этому факту следует, по-видимому, искать в поведении добавок в первоначальном очаге инициирования. Сенсibiliзирующий эффект Al, Mg, Ti и Zr может быть объяснен, очевидно, возможностью испарения частиц добавки в канале разряда с последующим их окислением продуктами разложения ВВ в течение индукционного периода [6], т. е. времени от начала пробоя до возникновения детонации ВВ. Энергетический вклад добавки будет определяться разностью теплот сгорания и испарения добавки в канале разряда. В соответствии с этим можно предположить следующий механизм реакции взрывчатого разложения смеси ВВ с добавкой по следующей схеме.



При электрическом пробое взрывчатой смеси электрический разряд вследствие избирательного характера проходит по включениям, обладающими высокой электропроводностью, т. е. по частицам добавки. Часть тепловой энергии, выделяющейся в канале разряда от генератора, будет израсходована на нагрев и испарение проводящих включений (добавок), а часть на разложение ВВ. Нагревание частиц добавки до парообразного состояния вполне осуществимо, так как масса нагреваемых в канале частиц добавки мала, а температура их испарения много ниже температуры канала разряда.

Зная распределение температуры, можно оценить ту долю энергии, которая приходится на нагрев алюминиевой пудры и на разложение ВВ. Будем считать выделение энергии в искре мгновенным, тогда задачу о распределении температуры в смесевом ВВ можно рассматривать с помощью мгновенных источников [9]. Распределение температуры в веществе является решением дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \bar{a} \left( \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (\tau > 0) \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$t(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad t(0, \tau) \neq \infty \quad \text{при } \tau > 0. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов начальную температуру окружающей среды принимают равной нулю, тогда  $t(r, \tau) = 0$ . Полагаем:

$$t(r, \tau) = U(r, \tau) + V(r, \tau). \quad (3)$$

Тогда:

$$U(r, \tau) = \frac{b}{4\pi a \tau} \exp \left[ -\frac{r^2 + r_1^2}{4a\tau} \right] I_0 \left( \frac{rr_1}{2a\tau} \right). \quad (4)$$

Изображение этой функции находим по таблице изображений:

$$U_L(r, s) = \frac{b}{2\pi a} I_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r_1 \right) K_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) \quad \text{при } r > r_1, \quad (5)$$

где  $r_1$  — радиус канала искры.

Решение уравнения для изображения (5) при краевых условиях (2) можно записать в виде:

$$U_L(r, s) = A I_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right). \quad (6)$$

Постоянная  $A$  находится из (2), т. е. из условия  $T_L(r, s) = 0$ . Тогда решение для изображения  $T_L(r, s)$  примет вид:

$$T_L(r, s) = \frac{b I_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r_1 \right)}{2\pi a I_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot R \right)} \left[ I_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot R \right) K_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) - I_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) K_0 \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot R \right) \right]. \quad (7)$$

Применяя теорему разложения, находим решение для оригинала:

$$t(r, \tau) = \frac{b}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{I_1^2(\mu_n)} I_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) I_0 \left( \mu_n \frac{r_1}{R} \right) \exp(-\mu_n^2 F_0), \quad (8)$$

$\mu_n$  находятся как корни характеристического уравнения  $I_0(\mu_n) = 0$

$b = \int_0^{\infty} f(r_1) dr_1$ , где  $f(r_1)$  — энергия, выделившаяся в канале искры, в нашем случае степенная функция.

Коэффициент температуропроводности  $\bar{a}$  для ВВ с добавкой можно найти через стехиометрическое соотношение

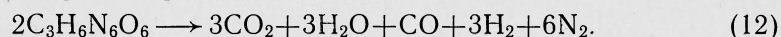
$$\bar{a} = \frac{a_{Al} \cdot m_{ВВ} + a_{ВВ} \cdot m_{Al}}{m_{ВВ} \cdot m_{Al}} (m_{ВВ} + m_{Al}). \quad (9)$$

Усреднив температуру методом графического интегрирования, а также используя известное выражение для ширины зоны химической реакции из [10], получим количество энергии, которое идет на разложение ВВ и на испарение алюминиевой пудры:

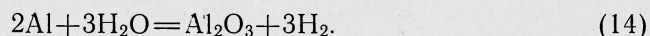
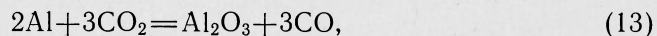
$$Q_{ВВ} = c_v^{ВВ} \cdot \bar{T} \cdot m_{ВВ}, \quad (10)$$

$$Q_{Al} = c_v^{Al} \cdot \bar{T} \cdot m_{Al}. \quad (11)$$

Разложение гексогена в первоначальном очаге сопровождается образованием кислородсодержащих соединений  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ :



Алюминий, испаряясь, вступает в реакцию окисления с этими соединениями



Сгорая алюминий образует окисел  $Al_2O_3$ , энергия образования которого равна  $393 \text{ ккал/моль}$  [8], что соответствует  $7,2 \text{ ккал}$  на  $1 \text{ г}$  алюминия.

Реакция окисления за счет  $CO$  затруднена и ее скорость мала, поэтому окисление алюминия происходит в основном за счет кислорода воды (пара) и углекислого газа [11]. Газообразные продукты горения сильно нагреваются [12] и, проникая в глубь ВВ, легко его поджигают. Этим обеспечивается в первоначальном очаге такие условия, при которых становится возможным самоподдерживающийся режим химической реакции взрывчатого превращения ВВ, заканчивающийся стационарной детонацией.

Расчет показывает, что введение  $1\%$  алюминиевой пудры в гексоген уменьшает энергию возбуждения детонации в  $2,5$  раза. Из экспериментальных данных (см. рисунок) видно, что энергия инициирования чистого гексогена составляет  $0,5 \text{ дж}$ , с  $1\%$  алюминиевой пудры —  $0,18 \text{ дж}$ , т. е. энергия инициирования уменьшается в  $2,78$  раза. Ошибка в  $10\%$  связана, по-видимому, с различием развития искрового канала в чистом гексогене и в гексогене с алюминиевой пудрой.

С увеличением количества алюминия выше оптимального, необходимой для его испарения энергии становится недостаточно. Кроме того, с увеличением массы алюминия возрастают теплотери, а это также приводит к тому, что алюминий не сгорает полностью в зоне первоначального очага, и вследствие этого тепловой эффект реакции падает. Это и ведет к увеличению энергии генератора. При уменьшении процента содержания добавки (меньше оптимального значения) соответственно уменьшается и тепловыделение от ее сгорания в первоначальном очаге. Оптимальный процент добавки, соответствующий максимальному снижению энергии генератора, определяет ту минимально необходимую тепловую энергию, которая должна выделиться в канале

