

Рис. 2. Тип промежуточного циклического комплекса.

Остановимся, наконец, на взаимосвязи между очень низкой чувствительностью ТАТБ и самоингибированием процесса горения. Известно, что для тринитросоединений введение в бензольное кольцо аминогруппы приводит к весьма значительному снижению чувствительности, при этом она падает с увеличением числа  $\text{NH}_2$ -групп [11]. Уменьшение чувствительности наблюдалось при добавлении восстановителей к смесевым взрывчатым составам [5] и было объяснено ингибирующим действием добавки на процесс возбуждения взрыва при ударе. Аналогичным образом можно объяснить и низкую чувствительность ТАТБ, содержащего ингибитор в самой молекуле.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cady H. H., Larson A. C. // *Acta Crystallogr.*— 1965.— 18, N 3.— P. 485.
2. Jackson R. K., Green L. G., Barlet R. H. et al. Initiation and detonation characteristics of TATB // *Proc. Sixth Symp. (Int.) on Detonation*, Aug. 24—27, White Oak, 1976.— P. 755—765.
3. Шарнин Г. П., Мойсак И. Е., Смирнов С. П. // *Тр. КХТИ.*— 1960.— 3.— С. 39.
4. Olinger V., Cady H. The Hydrostatic compression of explosives and detonation products to 10 GPa (100 kbars) and their calculated shock compression: results for PETN, TATB,  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  // *Ibid.*
5. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1976.
6. Глазкова А. П. О возможности уменьшения скорости горения ВВ добавками восстановителей // *Докл. АН СССР.*— 1968.— 181.— С. 383—384.
7. Глазкова А. П., Терешкин И. А. О зависимости скорости горения взрывчатых веществ от давления // *ЖФХ.*— 1961.— 35, № 7.— С. 1622—1628.
8. Кондриков Б. Н., Райкова В. М., Самсонов Б. С. О кинетике реакций горения нитросоединений при высоком давлении // *ФГВ.*— 1973.— 9, № 1.— С. 84.
9. Максимов Ю. Я. // *ЖФХ.*— 1969.— 43.— С. 725.
10. Сапранович В. Ф., Максимов Ю. Я., Маркелова М. Е. Исследование состава газообразных продуктов термического распада жидкого 2,4,6-тринитротолуола // *Тр. МХТИ им. Д. И. Менделеева. Физическая химия и электрохимия.*— Вып. LXXV.— М., 1973.— С. 147—150.
11. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ.— М.: Оборонгиз, 1960.— С. 301.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/IV 1992

УДК 662.215.1 + 534.6

И. В. Кондаков, В. В. Шапошников, Б. Г. Лобойко

### ПРОЯВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОСПЛАМЕНЕНИИ И ГОРЕНИИ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Зарегистрированы сигналы акустической эмиссии при исследовании процессов воспламенения и горения взрывчатых материалов, которые могут быть использованы для идентификации протекающих в них процессов.

При больших градиентах температур многие материалы, в том числе и взрывчатые, подвержены разрушению. Такие условия реализуются, в частности, при воспламенении и горении ВМ.

© И. В. Кондаков, В. В. Шапошников, Б. Г. Лобойко, 1992.

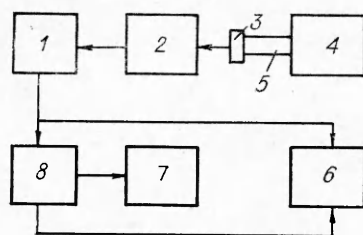


Рис. 1. Структурная схема регистрации сигналов АЭ.

1 — приемник АЭ; 2 — усилитель АЭ;  
3 — датчик; 4 — объект испытаний;  
5 — звукопровод; 6 — осциллограф;  
7 — блок записи; 8 — пересчетный прибор.

Экспериментальные исследования, проведенные различными авторами по определению температуры воспламенения, режимов горения и перехода горения во взрыв, показали, что этим процессам сопутствуют термическое разложение, газификация, диспергирование поверхностного слоя, а перед возникновением взрыва развивается конвективное горение в порах и трещинах. На необходимость существования стадии разрушения в начальном периоде перехода конвективного горения во взрыв указывается и в работе [1], где исследовались высокоэнергетические топлива.

Изучая воспламенение высокоплотных образцов ВМ при локальном нагревании от накаленной проволочки, авторы выявили две формы их возгорания: «мягкое» воспламенение и вспышка. Если «мягкое» воспламенение происходит без заметных разрушений образца, то вспышка, в зависимости от ее интенсивности, сопровождается появлением трещин или полным разрушением.

В ходе исследований указанных процессов и сопутствующих явлений, протекающих с различными скоростями, нужно измерять их параметры в широком диапазоне временных интервалов (от десятков секунд до микросекунд). В ряде случаев трудно (или невозможно) разместить измерительные преобразователи (датчики) в образце. Каждая из этих особенностей накладывает свои ограничения на выбор метода исследований. Поэтому использование новых, нестандартных методов, расширяющих объем получаемой информации, может быть полезным и для понимания механизма исследуемых процессов.

При воспламенении и горении ВМ следовало ожидать выделения акустической эмиссии (АЭ), которая обусловлена возникновением упругих волн звуковых и ультразвуковых частот при локальной перестройке структуры твердого тела в процессе его деформирования и разрушения, в фазовых превращениях, термическом разложении, газовыделении в твердом теле и т. п. [2, 3]. Заметим, что метод АЭ можно использовать для изучения процессов, скорость которых не превышает скорости звука в материале, т. е. до момента возникновения взрыва.

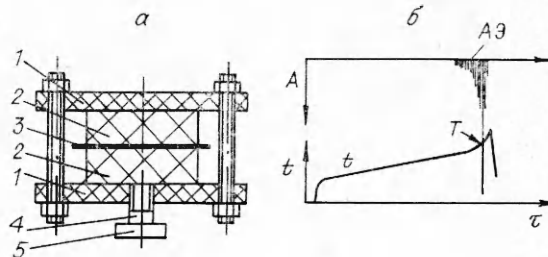
В работе метод АЭ применялся вместе с другими для исследования процессов воспламенения и горения ВМ (рис. 1). В качестве преобразователя сигналов АЭ служил датчик на основе пьезокерамики ЦТС-19 (диск диаметром  $5 \times 1$  мм), обладающий равномерной амплитудно-частотной характеристикой в полосе частот от 100 до 1100 кГц. Логарифмический усилитель имел полосу пропускания 220—1100 кГц, диапазон входных сигналов до 50 мВ, коэффициент усиления  $K_y = 2500$ . Приемник АЭ обеспечивал дополнительное усиление ( $K_n = 4$ ) и выделение низкочастотной огибающей сигналов АЭ.

С выхода приемника сигналы АЭ поступали на вход пересчетного устройства, работающего в режиме интенсиметра с многократным автоматическим выводом данных на блок записи, а также на шлейфовый осциллограф. Акустический контакт между источником сигналов АЭ (образцом ВМ) и датчиком осуществлялся через металлический звукопровод, а в местах зазоров сборки обеспечивался заполнением зазоров глицерином.

Исследования проводились на взрывчатой композиции с массовым содержанием  $\sim 90\%$  октогена,  $\sim 10\%$  полимерного связующего Витон А с высокой плотностью запрессовки ( $\rho \geq 0,95\rho_{\max}$ ). Температура воспла-

Рис. 2. Схема опыта (а) и регистрируемые сигналы (б) температуры и АЭ при воспламенении ВМ провололочкой.

1 — диск из стеклотекстолита; 2 — образец ВМ; 3 — нагреваемая провололочка; 4 — звукопровод; 5 — датчик АЭ ( $t$  — температура;  $T$  — температура воспламенения;  $\tau$  — время).



менения ВМ составляла 200—250 °С в зависимости от интенсивности нагревания. Конструктивные материалы, примененные в сборках, существенно превосходили взрывчатый материал по прочностным характеристикам, что исключало возможность появления АЭ от элементов сборки.

При исследовании воспламенения материала по методике локального разогрева от нагретой никелевой проволоочки, аналогичной [4], использовалась схема опыта, изображенная на рис. 2, а. Два образца диаметром 40 и высотой 10 и 20 мм, с размещенной между ними проволоочкой диаметром 0,25 мм, зажимались двумя дисками из стеклотекстолита. Проволочка нагревалась постоянным током, в момент достижения проволоочкой температуры воспламенения  $T$  происходила вспышка ВМ с последующими разрушением, разбросом образца и прекращением горения.

Анализ сигналов АЭ (рис. 2, б) показал, что в интервале времени, близком к моменту достижения проволоочкой температуры воспламенения, возникает акустическая эмиссия малого уровня амплитуд, но с большой интенсивностью счета (непрерывная АЭ), которая регистрируется до момента вспышки материала. Моменту вспышки материала соответствует дискретная АЭ с максимальной амплитудой (на входе усилителя  $A_{\max} = 500$  мкВ), превосходящей амплитуду сигналов непрерывной эмиссии в  $\sim 50$  раз.

Сигналы АЭ такого вида и уровня регистрировались при разрушении образцов статическими нагрузками, поэтому естественно предположить, что дискретная АЭ — результат микро- и макроразрушений образца. Появление непрерывной АЭ, вероятнее всего, обусловлено термическим разложением ВМ в области, прилегающей к проволоочке, и последующим газовойделением.

Проявление акустической эмиссии при воспламенении взрывчатых материалов в условиях одностороннего плоского нагревания исследовалось по схеме рис. 3, а. Образцы ВМ диаметром 60 и высотой 50 мм находились в корпусе оболочки из стали, изолированной от нагревателя прокладкой из асбеста. Нагревателем служил плоский медный диск толщиной 10 мм, подогреваемый электроплиткой. При достижении определенных температур появляются серии дискретных сигналов АЭ с амплитудами до 400 мкВ, а момент воспламенения сопровождается сигналами с амплитудами до  $A_{\max} = 600$  мкВ (рис. 3, б).

Полагаем, что серии дискретной АЭ до вспышки образца вызваны начавшимся термическим разложением ВМ и трещинообразованием из-за температурных градиентов. Акустическая эмиссия, сопровождающая вспышку, свидетельствует о макроразрушениях в образце ВМ.

Проведены эксперименты по регистрации сигналов АЭ при горении образца ВМ в оболочке и без нее. При горении ВМ в нормальных условиях без оболочки сигналы АЭ применяемой аппаратурой не регистрировались, что свидетельствует об отсутствии в этих условиях микро- и макроразрушений в образце. Возможно, для указанных условий следует использовать аппаратуру с полосой пропускания ниже 220 кГц.

В опытах два образца (рис. 4) ВМ диаметром 60 и высотой 50 мм заключались в стальную оболочку толщиной 5 мм. Оболочка имела отверстия в зоне горения для оттока газов. Вариации диаметра отверстия

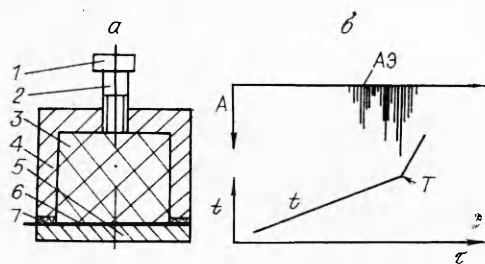


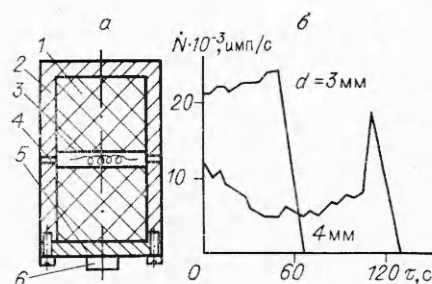
Рис. 3. Схема опыта (а) и регистрограммы (б) температуры и сигналов АЭ при нагревании ВМ.

1 — датчик АЭ; 2 — звукопровод; 3 — образец ВМ; 4 — оболочка из стали; 5 — нагреватель медный; 6 — термодатчик; 7 — прокладка из асбеста.

обеспечивали послойное горение материала с различной скоростью, зависящей от давления в зоне горения.

Взрывчатый материал воспламенялся нихромовым мостиком накалывания, размещенным в зазоре между образцами. Сигналы АЭ регистрировались датчиком, находящимся в акустическом контакте с оболочкой и ВМ. В данной постановке сигналы регистрировались с началом горения, причем интенсивность их и амплитуда тем выше, чем меньше отверстие для оттока газов (рис. 4, б). Средние амплитуды сигналов равны 220 и 120 мкВ для  $d = 3$  и 4 мм соответственно.

Рис. 4. Схема опыта (а) и регистрограммы интенсивности  $\dot{N}$  сигналов АЭ (б) при горении ВМ в оболочке с отверстиями разных диаметров  $d$ . 1 — образец ВМ; 2 — оболочка; 3 — мостик; 4 — отверстие; 5 — основание-звукопровод; 6 — датчик АЭ.



Отсутствие сигналов при горении материала без оболочки и наличие их для образца в оболочке позволяют заключить, что причина их возникновения состоит в истечении газов через отверстия в оболочке. Формально такое излучение не относится к АЭ, однако регистрируется аппаратурой АЭ и является косвенным параметром, характеризующим процессы горения. Параметры этих сигналов нестабильны и могут изменяться при переходных процессах, в частности увеличиваются в конце горения, когда его поверхность изменяется и послойный режим горения нарушается.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при нагревании и воспламенении ВМ регистрируются сигналы АЭ, которые могут быть использованы для идентификации процессов, протекающих в ВМ. Их можно использовать для определения времени горения, относительной его интенсивности, моментов нарушения целостности, моментов прекращения горения или возникновения взрывных процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бернекер Р. Р. Переход горения высокоэнергетических твердых ракетных топлив в детонацию // Аэрокосм. техника.— 1986.— № 6.— С. 127.
2. Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия.— М.: Изд-во стандартов, 1976.
3. Бакулин А. В. Акустическая эмиссия (АЭ) при физико-химических (ФХ) процессах // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: Сб. тез. I-й Всесоюз. конф.— Ростов н/Д.— 1984.— Ч. II.
4. Зарко В. Е., Хлевной С. С. Зажигание баллиститного пороха накальными проволоками // ФГВ.— 1968.— 4, № 2.— С. 158.

г. Челябинск

Поступила в редакцию 5/XII 1990,  
после доработки — 12/III 1992