

6. И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев.— В кн.: Первый Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву. М.: Наука, 1968.
7. У. И. Гольдшлегер, К. В. Прибыткова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1973, 9, 1, 119.
8. А. G. Merzhanov, A. E. Averson. Comb. Flame, 1971, 19, 1, 89.
9. Л. Г. Страковский, Е. И. Фролов. ФГВ, 1980, 16, 5, 140.
10. Л. Г. Страковский, П. И. Уляков, Е. И. Фролов. ФГВ, 1980, 16, 6, 59.
11. А. В. Бутенин, Б. Я. Коган. Квантовая электроника, 1971, 5, 143.
12. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплопередаче. Л.— М.: Госэнергоиздат, 1959.
13. А. А. Орлов, П. И. Уляков. ПМТФ, 1976, 1, 127.
14. Ф. И. Дубовицкий, Ю. И. Рубцов, Г. Б. Манелис. Изв. АН СССР. От. хим. наук, 1960, 10, 1763.

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВ ТНТ
И ГЕКСОГЕНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЛН СЖАТИЯ
АМПЛИТУДОЙ 0,15—1,0 ГПа**

*С. Г. Андреев, М. М. Бойко, В. В. Лазарев,
В. С. Соловьев, А. И. Чернов*

(Москва)

В последнее время в литературе появляется материал о влиянии начальной температуры заряда взрывчатого вещества на инициирование детонации ударными волнами (см., например [1]). Наблюдаемое в экспериментах увеличение чувствительности зарядов ВВ при повышении температуры обычно связывают с ростом скорости химической реакции в веществе. Однако, согласно современным представлениям, инициирование детонации — это многостадийный процесс, включающий образование очагов разогрева, их зажигание, распространение горения на окружающий объем и формирование детонационного комплекса [2]. Поэтому влияние температуры на конечный исход не позволяет определить ее роль на каждом из этапов, что затрудняет получение полной картины возбуждения и развития взрывчатого превращения в широком диапазоне внешних воздействий. В связи с этим представляет интерес выявление роли температурных воздействий при исследовании начального этапа процесса.

С этой целью проводили эксперименты по воздействию на заряды ТНТ и гексогена волн сжатия малой амплитуды, вызывающих их разложение. Заряды нагружали на установке, описанной в [3], по схеме «уходящей» детонационной волны импульсом давления, временной профиль которого близок к прямоугольному. В качестве нагружающего заряда использовали низкоплотные ВВ, варьируя плотностью которых создавали нагрузки в диапазоне 0,15—1,0 ГПа. В двух сериях опытов время действия нагрузки задавалось 50 и 100 мкс. Вследствие неидеальности возбуждения заданного уровня давления не превышало 10 мкс.

Исследовали литые заряды ТНТ со столбчатой структурой начальной плотностью 1,57 г/см³ и заряды прессованного гексогена (без флегматизирующих и растворяющих добавок) начальной плотностью 1,70 г/см³. Образцы исследуемых ВВ диаметром 20 и высотой 5—7 мм помещали в капсулы наружным диаметром 35 мм, отпрессованные из хлористого калия, способного выдерживать высокие температуры без разложения и имеющего ударную адиабату, близкую к адиабатам исследуемых ВВ. Использование образцов выбранной толщины позволяло получить достаточную воспроизводимость эффекта начального разложения образца и исключить развитие последующих стадий, связанных с интенсивными газодинамическими процессами. Требуемая начальная температура образцов достигалась предварительным термостатированием в течение трех часов капсул с образцами и контролировалась непосредственно перед

ВВ	$T_0, ^\circ\text{C}$	$p^*, \text{ГПа при } t^*, \text{ мкс}$	
		100	50
ТНТ	20	0,4—0,5	$>1,0$
	45	0,65—0,75	$>1,0$
	70	$>1,0$	$>1,0$
Гексоген	20	0,16	0,65
	130	$<0,16$	0,16

взрывом нагружающего заряда с помощью термопар, расположенных на поверхности образцов. Темп нагрева задавали достаточно малым с тем, чтобы в образце не возникали термические напряжения, приводящие к растрескиванию вещества.

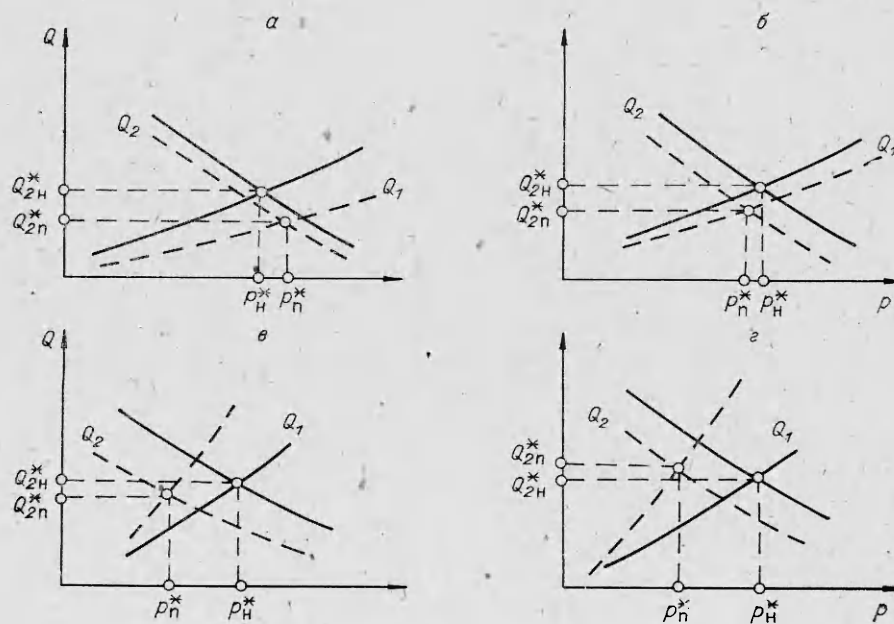
Визуальный осмотр нагретых образцов, а также микроструктурные исследования при 100-кратном

увеличении шлифов образцов после нагрева и охлаждения не выявили каких-либо необратимых изменений в их структуре. Следует отметить, что обнаружена релаксация структурных изменений, вызванных интенсивными напряжениями, которые возникают как при взрывном, так и при быстром термическом нагружении. В частности, «залечивание» микротрещин ТНТ в зависимости от их размеров происходит за время от нескольких суток до недель. Поэтому микроструктурные исследования образцов проводили непосредственно после их охлаждения (через 1 ч).

При воздействии на образцы давлением выше критического (p^*), принятого за критерий чувствительности, в образцах возникала химическая реакция, протекавшая в форме очагового горения [3]. При этом образец гексогена всегда сгорал полностью, а горение ТНТ затухало после прихода волны разгрузки. Результаты экспериментов, приведенные в таблице (t^* — время действия нагрузки p^*), свидетельствуют о том, что повышение температуры сверх нормальной (20°C) приводит к десенсибилизации зарядов ТНТ и сенсбилизации зарядов гексогена.

В контрольной серии экспериментов определялось p^* для образцов ТНТ и гексогена после их охлаждения от соответствующей температуры испытаний до начальной. Определенные величины p^* совпадают с критическими давлениями для образцов в исходном состоянии. Полученный результат подтверждает отсутствие влияния каких-либо факторов, необратимо влияющих на чувствительность образцов при их нагреве в описываемых условиях.

Наблюдаемое в экспериментах разложение ВВ будем рассматривать как очаговое горение, возникающее вследствие тепловыделения при те-



чении вещества. Под течением здесь подразумевается любое перемещение слоев ВВ относительно друг друга, независимо от конкретного механизма взаимодействия этих слоев. При малых давлениях наибольшие скорости течения и, следовательно, тепловыделение, приводящее к воспламенению очагов, наблюдаются в первую очередь в окрестности сжимающихся пор. Воспламенение будем рассматривать как процесс возбуждения интенсивной реакции (горения), способной распространяться за пределы очага разогрева. Исходя из этого, необходимым условием возникновения очага воспламенения является достижение давления p^* , при котором количество тепла Q_1 , генерируемого при сжатии поры, равно количеству теплоты энергии Q_2 , необходимой для воспламенения поверхности поры. Можно показать, что в общем случае зависимости Q_1 и Q_2 от давления имеют вид кривых, изображенных на рисунке (здесь сплошные линии соответствуют нормальной начальной температуре, а штриховые — повышенной).

Зависимость $Q_2(p)$ в простейшем случае может быть определена из условия достижения критического градиента температуры в конденсированной фазе на поверхности горения, на которой в течение задержки воспламенения поддерживается постоянная температура газификации T_k . При этом, согласно [4],

$$Q_2 = \frac{(T_k - T_0)^2 E}{2RT_k^2} \frac{c_p'}{c_p''} \frac{\lambda}{u(T_k)}, \quad (1)$$

где c_p' , c_p'' — теплоемкости вещества в газовой и конденсированной фазах соответственно; λ — коэффициент теплопроводности; R — универсальная газовая постоянная; T_0 — начальная температура вещества; E — энергия активации вещества; T_k — температура поверхности конденсированной фазы, принятая равной температуре кипения при данном давлении; T_g — температура горения при начальной температуре вещества T_k ; $u(T_g)$ — скорость горения вещества при T_g .

Для более строгого выполнения условия воспламенения требуется учет количества тепла, необходимого для разогрева поверхности ВВ до температуры T_k . Увеличение давления приводит к уменьшению величины Q_2 , поскольку возрастают T_k и u .

При обосновании возрастания Q_1 от давления ограничимся рассмотрением двух наиболее часто используемых в литературе механизмов разогрева — «вязкостного» и «прочностного», как наиболее приемлемых для анализа наших экспериментов. В случае «вязкостного» разогрева увеличение тепловыделения Q_1 от диссипации энергии внешнего воздействия с ростом давления динамического сжатия связано с ускорением относительного течения слоев ВВ при сжатии поры, а также с ростом вязкости вещества. В случае «прочностного» механизма разогрева (например, разогрев за счет сухого трения или пластического деформирования) возрастание Q_1 возможно вследствие повышения динамического предела текучести [5].

Пересечение кривых $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$ определяет критическое значение p^* , необходимое для воспламенения очага разогрева. Такой подход к определению является развитием метода, использованного в [6].

Изложенные выше представления позволяют проанализировать влияние начальной температуры на условия воспламенения. Обозначим индексами и значения величин, соответствующих нормальной начальной температуре, индексом n — повышенной. Количество тепла, необходимое для воспламенения поверхности ВВ при увеличении начальной температуры, согласно (1), уменьшается, что приводит к смещению кривой Q_{2n} вниз относительно Q_{2n} (см. рисунок). На Q_1 в очагах при неоднородной деформации поликристаллической структуры повышение температуры может влиять двояким образом: с одной стороны, разупрочнение и падение вязкости способствуют уменьшению тепловыделения, а с другой, эти же факторы могут привести к росту скорости течения, что вызовет повышение Q_1 . Поэтому увеличение T_0 может привести как к уменьшению

тепловыделения (смещение кривых Q_1 вниз), так и к его росту (смещение кривых Q_1 вверх).

В соответствии с отмеченным влиянием начальной температуры на величины Q_1 и Q_2 возможно как понижение чувствительности зарядов ВВ к воспламенению при динамических нагрузках, $p_{п}^* > p_{п}^*$ (см. рисунок, а), так и повышение чувствительности $p_{п}^* < p_{п}^*$ (см. рис. б — г). При этом сенсбилизация (уменьшение p^*) с ростом T_0 может наблюдаться как при повышении тепловыделения Q_1 (см. рисунок, г), так и при понижении Q_1 , но соответствующем повышении воспламеняемости ВВ.

В работе по расчетной зависимости $Q_2(p, T_0)$, построенной по формуле (1), и зависимостям температуры кипения от давления, приведенных в [7], и скорости горения от начальной температуры и давления [8], а также по экспериментальным значениям критических давлений $p_{п}^*$ и $p_{п}^*$, полученных в данных экспериментах, определялись величины тепловыделения Q_2 , необходимые для воспламенения. В случае ТНТ увеличение начальной температуры от 20 до 70°C приводит к возрастанию критического давления инициирования (воспламенения) от 0,4—0,5 ГПа до давления свыше 1,0 ГПа, чему соответствует уменьшение $Q_{2п}$ с 700 до 300 Дж/м². Этот результат соответствует рисунку, а, когда определяющим фактором снижения чувствительности ВВ является уменьшение прочностных или вязкостных характеристик, не компенсируемое повышением скорости течения ВВ. Аналогичные оценки для гексогена показывают, что увеличение начальной температуры, вызывающее, согласно экспериментальным данным, уменьшение критического давления, должно соответствовать повышению тепловыделения. Этому результату соответствует рисунок, г, когда возможность повышения Q_1 объясняется повышением скорости течения вещества при сжатии поры вследствие температурного «разупрочнения» вещества. Это явление, вероятно, аналогично увеличению чувствительности зарядов ВВ при повышении их «текучести» в результате введения в заряд соответствующих добавок, обнаруженному и объясненному при копровых испытаниях [9].

Предложенная интерпретация результатов не исключает сенсбилизующего влияния увеличения размеров пор при равновесном нагреве. Однако данный эффект не является определяющим, поскольку он полностью подавлен у ТНТ и, вероятно, незначителен у гексогена в силу малости приращения объема пор, связанного с величиной энергии, диссипируемой в очаге разогрева.

*Поступила в редакцию 27/XII 1983,
после доработки — 5/III 1984*

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Roth. 5-th Symp. (Intern.) on Detonation. Pasadena, California, 1970.
2. В. С. Соловьев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
3. С. Г. Андреев, М. М. Бойко, И. Ф. Кобылкин и др. ФГВ, 1979, 15, 6.
4. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 11, 159.
5. Ю. В. Батюков, С. А. Новиков, И. Д. Фишман. ФГВ, 1983, 19, 3, 120.
6. И. С. Клочков.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
7. К. К. Андреев, Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
8. К. К. Андреев, М. С. Плясунов.— В кн.: Теория взрывчатых веществ. Вып. 53. М.: Высшая школа, 1967.
9. Н. А. Холево. Чувствительность взрывчатых веществ к удару. М.: Машиностроение, 1974.