

смоченной топливом, связаны между собой и зависят от физико-химических свойств фаз гетерогенной системы, начальных условий, структуры детонационной волны и характерного размера трубы. Поэтому, например, пределы распространения детонации по толщине пленки могут оказаться и больше, и меньше пределов возникновения по толщине пленки.

Поступила в редакцию
22/XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, 162, 1.
2. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 175, 1.
3. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 1.
4. К. Регланд, Я. Николс. РТК, 1969, 7, 5.
5. И. Н. Зверев, В. М. Гендугов, Н. И. Зверев. ФГВ, 1975, 11, 6.
6. Г. Маирлс.— В сб.: Ударные трубы. М., ИЛ, 1962.
7. В. М. Гендугов. ФГВ, 1978, 14, 1.
8. В. М. Гендугов, И. Н. Зверев. Вестн. МГУ. Мат. и мех., 1973, 1.
9. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М., «Наука», 1971.
10. В. М. Гендугов, Л. Г. Ильясова. ФГВ, 1976, 12, 1.
11. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ПМТФ, 1975, 4.
12. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ФГВ, 1977, 13, 5.

ОБРАЗОВАНИЕ ОЧАГОВ В ТРОТИЛЕ И ТЕТРИЛЕ ПРИ СЛАБОМ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

С. Г. Андреев, М. М. Бойко, И. Ф. Кобылкин, В. С. Соловьев
(Москва)

Поведение ВВ при нагружении слабыми ударными волнами изучено сравнительно мало. Это, отчасти, обусловлено трудностью получения контролируемых профилей нагрузок в диапазоне $1 \div 10$ кбар большой длительности. Такая интенсивность ударной волны недостаточна для инициирования нормальной детонации в большинстве бризантных ВВ, поэтому возникающая химическая реакция протекает в форме горения или в форме низкоскоростного режима. Более полное представление об этих взрывчатых превращениях можно получить, исследуя сохраненные образцы после нагружения.

Методы сохранения образцов, применяемые в [1, 2], имеют определенные недостатки. Так, взрывчатое вещество, заключенное в прочную капсулу, нагружается сложным образом и при малых давлениях трудно определить параметры нагружения. Нагружение образцов ВВ в бассейне с водой [1] вообще не позволяет сохранять образцы ВВ.

В настоящей работе описывается схема, позволяющая исключить отмеченные недостатки и получать «сохраненные» образцы ВВ после нагружения их ударной волной требуемого профиля, близкого к прямоугольному. Приводятся результаты по нагружению образцов ВВ из ТНТ и тетрила. Использовался литой ТНТ со столбчатой структурой с продольным размером зерен $3 \div 5$ мм и поперечным размером $200 \div 400$ мкм, плотность заряда составляла $1,59$ г/см³. Прессованные шашки из ТНТ и тетрила имели плотность $1,58$ и $1,60$ г/см³ и средний размер зерен $20 \div 200$ и $50 \div 600$ мкм соответственно.

Образец ВВ (диаметр — 15, высота — 10 мм) помещался в инертную среду, сжимаемость которой близка к сжимаемости ВВ. Инертная среда, воспринимающая ударную нагрузку, заключалась в жесткую трубу, чем достигалось практически плоскосимметричное течение (рис.

1, а). В качестве инертной среды использовалась главным образом смесь поваренной соли с парафином.

При давлениях $1 \div 10$ кбар затруднительно точно подобрать состав смеси для полной имитации сжимаемости и прочности ВВ. Состав смеси определяется приближенно из условия: расхождение ударных адиабат в $p-u$ -координатах не должно превышать 5%. Расчет велся согласно [4].

Если ВВ помещено в воду, то из-за обратного выплеска и фильтрации воды происходит разрушение образца ВВ и для его сохранения нужно применять металлические капсулы.

Исследуемое ВВ помещалось по оси инертной среды ($d_{ВВ} \leq 0,5d_{ин}$), чтобы исключить деформации ВВ за счет трения среды о стенки трубы. Кроме того, ВВ заглублялось от поверхности приложения нагрузки на 15 мм, так как продукты детонации применяемого взрывного устройства инфильтруют на глубину до 5 мм.

Эффекты нагружения зависят от способа изготовления образцов. Применялись два способа. Первый: образец ВВ с риской для удаления воздуха на плотной посадке вставлялся заподлицо в подложку, отпрессованную из смеси NaCl + парафин в соотношении $\sim 8:1$. Затем подложка приклеивалась к поверхности прессованной шашки из инертной смеси того же состава (рис. 1, б). Второй: образец — подложка с вставленным в нее ВВ спрессовывался в монолитный блок с инертной средой при давлении и температуре смеси, обеспечивающих сохранность структуры спрессованного ВВ (рис. 1, в). Блок инерта с ВВ плотно вставлялся в толстостенную стальную трубу. Наличие пористого наполнителя в трубе и в расширительной камере приводит к тому, что блок с исследуемым ВВ тормозится, не испытывая радиальных деформаций, и не выбрасывается из трубы даже в случае частичных реакции в ВВ.

В качестве нагружающего заряда использовалась смесь гексогена с мипорой [5], заключенная в стальную трубу. Применяемая система инициирования взрывчатой смеси позволяет получить фронт детонационной волны, распространяющийся от нагружаемой инертной среды [6].

В описываемом случае для решения задачи [6] нужно учитывать сжимаемость нагружаемой среды

и реальные детонационные характеристики взрывчатой смеси [5]. Получаемый профиль давления в среде близок к прямоугольному. Так, на рис. 2 представлены расчетный и экспериментально измеренный профили массовой скорости в среде, из которых следует, что через 10 мкс после прихода ударной волны расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 5%. Спад массовой скорости на расчетной кривой обусловлен приходом волны разгрузки с открытого торца нагружающего заряда. Время воздействия t на ВВ управлялось длиной заряда l , а величина давления p — плотностью заряда ρ . Давление и время определяются по зависимостям: $p = \theta \rho^v$, $t = (a + b \cdot \rho) / (c + d \cdot \rho) \cdot l$.

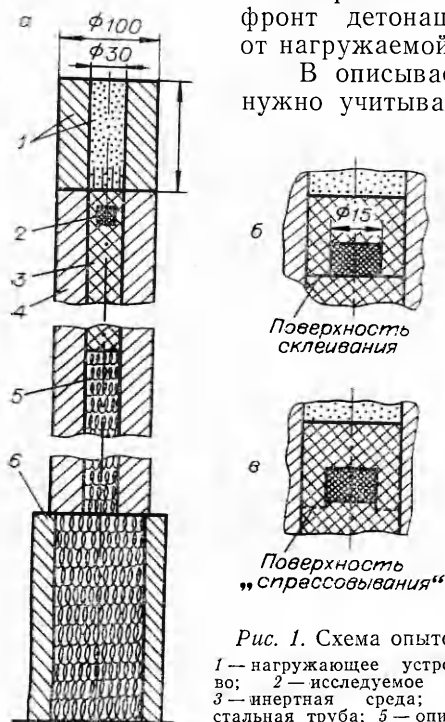
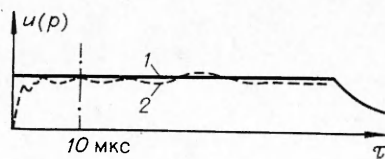


Рис. 1. Схема опытов.
1 — нагружающее устройство; 2 — исследуемое ВВ; 3 — инертная среда; 4 — стальная труба; 5 — опилки; 6 — расширительная камера.

Рис. 2. Профиль нагрузок на ВВ.
1 — расчет; 2 — эксперимент.



Постоянные ν , θ , a , b , c , d определяются детонационными характеристиками смеси и сжимаемостью среды. В настоящих опытах: $\nu = 2$, $\theta = 3000\text{--}4000$ кг/(с² · м), $a = 3,100$; $b = 1,1 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, $c = 1500$ м/с, $d = 4,1$ м⁴/(кг · с). При плотности нагружающего заряда $\rho = 0,4$ г/см³ давление в исследуемом образце составляло 4,8—6,4 кбар, при $\rho = 0,5$ г/см³ — 7,5—10 кбар.

При первом способе установки тетрила наблюдается глубокое разложение шашки даже при $\rho = 0,4$ г/см³ и $t = 40$ мкс. Причем наблюдается обратный выброс дна и дробление инертной среды. При втором способе установки образца ВВ исключаются неконтролируемые деформации ВВ за счет неполного прилегания образца ВВ к подложке и разложение ВВ имеет менее глубокий характер.

При втором способе установки ВВ в монолите инертной среды при $\rho = 0,5$ г/см³ и $t = 100$ мкс наблюдается глубокое разложение тетрила, однако часть шашки ВВ остается, а остальная сгоревшая перфорировует инертную среду (рис. 3, а). Дно и стенки кратера усыпаны бурым недогоревшим конгломератом тетрила (размер зерна $\delta \sim 1\text{--}2$ мм). Оставшаяся часть шашки пронизана трещинами со следами реакции. В обоих случаях за счет неплотности прилегания ВВ к среде или среды к стенке трубы перемещения внутри ВВ вследствие макродеформаций образца соизмеримы с перемещениями ВВ на микроудельностях.

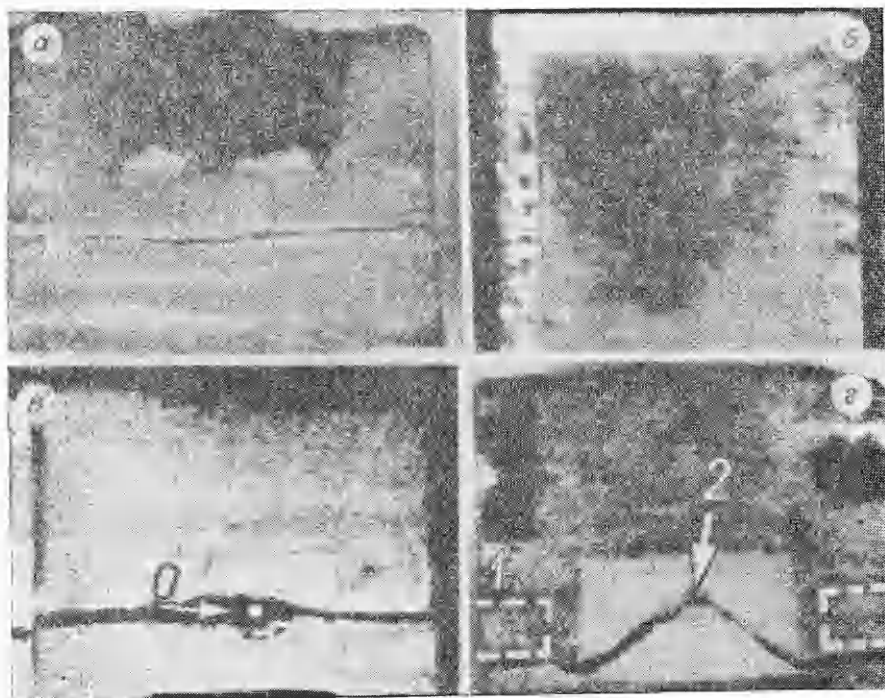


Рис. 3. Типы разложения ВВ.

0 — исходное положение поры; 1 — исходное положение проточки; 2 — начало очага разложения.

На продольных и поперечных срезах шашек ТНТ устойчиво воспроизводятся очаги реакции, предшествующие взрыву ВВ. Для ТНТ они обнаруживаются при первом способе установки для $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$ и $t = 40 \text{ мкс}$ лишь при дефектах в структуре отливки. Во втором случае очаги наблюдаются при $\rho > 0,5 \text{ г/см}^3$ и $t \geq 100 \text{ мкс}$, если монолит с ВВ неплотно прилегает к подпирающей его инертной среде.

Для шашек ТНТ высокой однородности (прессованных или литых) в сохранных образцах очаги представляют собой зачерненные трещины, расположенные перпендикулярно оси заряда. Площадь зачерненной единичной трещины может достигать величины поперечного сечения шашки, а толщина черной зоны имеет порядок $0,01\text{--}0,1 \text{ мм}$. При вскрытии шашки появляется характерный для продуктов разложения ТНТ запах.

При увеличении времени действия нагрузки трещина представляет из себя сильно изломанную поверхность, появляются трещины и в продольном направлении. Особенно заметна эта тенденция в случае глубокого разложения ВВ. Вероятно, эти черные трещины появляются вследствие «замораживания» очага реакции ВВ. Причина может быть в том, что разложение ВВ не идет с достаточным для самоподдержания тепловыделением в твердой фазе и требуется догорание в газовой фазе, а условия для догорания ликвидируются сбросом давления, либо в том, что разложение в твердой фазе идет довольно медленно (сильно вырожденное) и возможно замораживание процесса образования очага.

Рассмотрим характер черных трещин. Возможны два объяснения вида трещин:

1) вся поверхность трещины является источником тепла для образования горячей области;

2) горячая точка с достаточно глубоким разложением ВВ имеет малые размеры относительно размеров трещины и ее продукты разложения, проникая в трещину, обусловленную, например, прочностным разрушением, частично разлагают ее поверхность.

Опыты с литым ТНТ подтверждают возможность второго объяснения. За счет ухода за расплавом ТНТ в дюралюминиевой капсуле получалась зона с «дефектной» структурой, причем размер пор не превышал $10^{-1}\text{--}10^{-2} \text{ мм}$. После нагружения капсулы, помещенной в воду, зарядом с $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$ и $t = 20 \text{ мкс}$ «дефектная» зона состояла из скопления темных пятен — очагов размером $\sim 0,1 \text{ мм}$ (рис. 3, б). Продукты разложения ТНТ из этих очагов проникали в интеркристаллические трещины на глубину $\sim 1 \text{ мм}$. Особенно заметно это в районе перехода «дефектной» зоны в зону столбчатых кристаллов ТНТ. Сравнение микроструктур шлифов до нагружения (рис. 4, а) и после (рис. 4, б) говорит о том, что столбчатые зерна ТНТ после нагружения (и, вероятно, во время нагружения) пересекаются довольно густой сеткой поперечных микротрещин. Однако зона столбчатых зерен оказывается менее чувствительной по сравнению с «дефектной» зоной. Отсюда сделан вывод о возникновении реакции первоначально на поре. Получение и анализ шлифов ТНТ после схлопывания поры затруднителен, поэтому в первом приближении процессы на поре рассматривались на геометрической модели поры.

Искусственная пора. В шашке прессованного ТНТ высокой однородности высверливалось отверстие перпендикулярно оси трубы, отверстие в инертной среде заполнялось парафиновыми пробками для предотвращения прорыва продуктов детонации нагружающего заряда. Длина воздушного цилиндра в ВВ составляла 15 мм . При диаметре поры 1 мм после нагружения зарядом с $\rho = 0,33 \text{ г/см}^3$ и $t = 40\text{--}45 \text{ мкс}$ на срезе, перпендикулярном оси сверления поры, отчетливо видны следы разложения ТНТ (см. рис. 3, б). Видно, что основная масса почер-

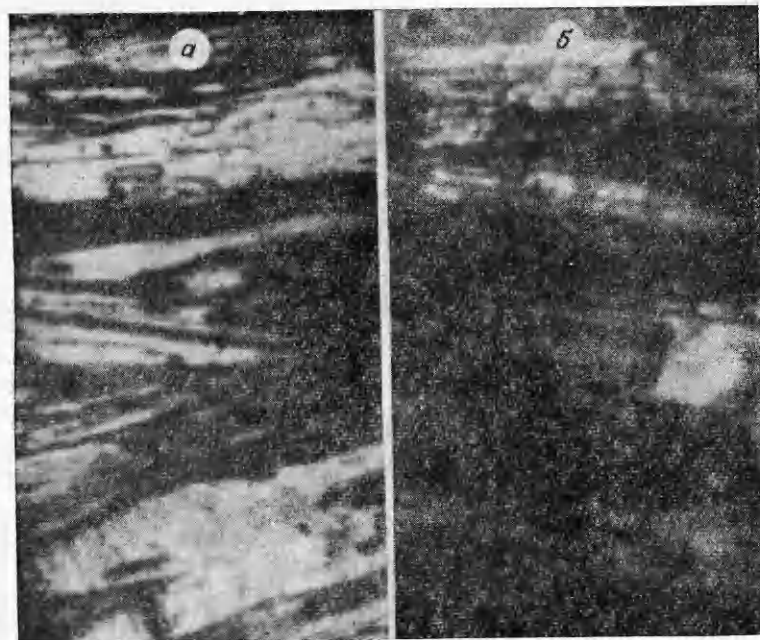


Рис. 4. Структура литого ТНТ до нагружения (а) и после нагружения волной 5 кбар (б).

невшего ТНТ расположена в плоскости, проходящей через пору и перпендикулярной оси трубы.

При увеличении времени действия до $t = 100\text{--}120$ мкс происходит разрыв всего столба среды по плоскости, проходящей через пору, и два образовавшихся блока раздвигаются продуктами разложения ТНТ на расстояние до 50 мм (см. рис. 3, в). При этом трещины значительно разгораются и появляются трещины, ориентированные вдоль оси трубы.

Если воздушную полость изолировать от ТНТ слоем парафина толщиной 0,5—1 мм, то после нагружения зарядом с $\rho = 0,4$ г/см³ и $t = 40$ мкс на срезе ТНТ не обнаруживается очагов почернения и удастся рассмотреть зону ТНТ, проходящую через полость, которая в предыдущих опытах выгорала. Эта зона образована множеством трещин, вытянутых поперек оси трубы; трещины заполнены пылью ТНТ и разделены друг от друга монолитами ТНТ размером $\sim 0,3$ мм. Слои, прилегающие к парафиновой изоляции, мелкодиспергированы.

Сравнение опытов с прессованным ТНТ с порой и опытов с возбуждением очагов в «дефектной» зоне литого ТНТ показывает, что поперечные макротрещины не являются достаточно мощными источниками тепла для их почернения (разложения), а разложение ТНТ начинается в слое толщиной не более 0,5 мм, прилегающем к воздушной полости. Очаг может возникнуть от нагрева поверхности поры адиабатически сжатым воздухом, от течения указанного граничного слоя толщиной не более 0,5 мм внутрь поры, а также от воспламенения мелкодисперсной пыли ТНТ, влетающей в адиабатически сжатую воздушную полость с поверхностного слоя.

Таким образом, трещина со следами разложения может быть вызвана неоднородностями структуры без видимых макродеформаций образца. Очаг образуется за ударной волной и визуализируется трещиной. В этом случае макродеформации, сопровождающиеся растрескиванием образца, способствуют распространению взрывного горения. Однако опыты с локализацией деформаций показывают, что очаги

разложения появляются в первую очередь в зоне трещинообразований, вызванной интенсивными деформациями. Локализация деформаций достигалась проточкой по периметру инертной среды (см. рис. 3, *г*) и деформация напоминает течение ВВ в копровых испытаниях с той разницей, что отсутствуют реверберации волн между наковальнями.

Отливка ТНТ с дефектной зоной без локализованной деформации (без проточки) не обнаруживает очагов при нагружении зарядом с $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$, $t = 30 \text{ мкс}$. Та же отливка при том же нагружающем заряде образует очаг разложения, если создать локальную деформацию аналогично рис. 3, *г*.

Шашка прессованного ТНТ высокой однородности не образует очагов разложения при нагружающем заряде с $\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$, $t = 100 \text{ мкс}$, если отсутствуют макродеформации (нет проточки), но образует очаги в зоне локальной деформации при заряде $\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$, $t = 100 \text{ мкс}$, если имеется наружная проточка. При меньшей нагрузке ($\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$, $t = 100 \text{ мкс}$) наблюдается такой же конус скольжения ТНТ при разрушении шашки, как и при $\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$, но отсутствуют следы разложения. Картина разрушения, таким образом, статическая: после прохождения указанной волны по плоскостям наибольших касательных напряжений начинается скольжение ВВ — образуется трещина конической формы. Разложение ТНТ началось в зоне, прилегающей к вершине конуса сложения. Наблюдаемый эффект можно объяснить тем, что дефекты (поры) в ВВ начинают «работать» не только в результате внезапного сжатия за ударной волной, но и в зоне интенсивных течений вблизи трещин, особенно на их вершине, причем более крупные поры «дефектной» зоны литого ТНТ остаются более чувствительными.

Авторы выражают благодарность А. В. Левантовскому за помощь в проведении экспериментальных исследований нагружающей способности низкоплотного заряда.

*Поступила в редакцию
11/VIII 1978*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1968, 3, 2.
2. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1968, 4, 3.
3. С. Г. Андреев, М. М. Бойко и др. Пятый Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. Черноголовка, 1977.
4. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников. — В сб.: Взрывное дело, № 68/22. М., «Недра», 1970.
по горению и взрыву. М., «Наука», 1977 г.
5. В. С. Соловьев, С. Г. Андреев и др. Материалы III Всесоюзного симпозиума
6. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.