

13. Альперин В. И., Корольков П. В., Могавкин А. В. и др. Конструкционные стеклопластики.— М.: Химия, 1979.— 360 с.
14. Гуняев Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов.— М.: Химия, 1981.— 260 с.
15. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.— 704 с.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 3/IV 1991

УДК 662.215.2

Г. Д. Козак, Б. Н. Кондриков, В. Б. Обломский

## СПИНОВАЯ ВОЛНА И ЗАТУХАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВВ

Детонация нитрометана и раствора динитротолуола в бистринитроксиэтилнитраме при диаметре цилиндрического заряда, близком к критическому, изучалась с помощью скоростной фоторегистрации свечения боковой и торцевой поверхности цилиндра и фиксации поверхностных волн с применением пластин-свидетелей с воздушным промежутком. Обнаружено, что появление глубоких волн отсутствия реакции, ответственных за затухание детонации жидких ВВ, тесно связано с распространением по поверхности (или непосредственно под поверхностью) заряда спиновых детонационных волн. Спиновые волны, способствующие распространению нормальной детонации в слабогетерогенных литых зарядах из составов тротил — гексоген и тротил — тэн, в случае жидких ВВ, вероятно, ингибируют детонационный процесс, провоцируя возникновение глубоких волн отсутствия реакции. Показано, что скорость спиновой волны отвечает степени сжатия вещества в приповерхностном слое, рассчитанной по модели Дремина — Трофимова (быть может, лишь немного выше нее).

Механизм затухания детонации жидких ВВ в результате срыва реакции на краю заряда и распространения к его оси темной зоны — волны отсутствия реакции — предложен в [1]. Он подробно разработан гидродинамически [2, 3] и успешно использован для оценки кинетических характеристик реакции в темной зоне [4—6]. В работах [7, 8] вблизи детонационного предела обнаружено распространение поверхностных ДВ, перемещающихся по спирали со скоростью на 20—40 % выше обычной. В данной статье приведены результаты опытов, показывающие, что в случае жидких ВВ эти явления могут быть тесно связаны друг с другом.

Опыты проводили с нитрометаном и раствором динитротолуола (30 %) в биснитроксиэтилнитраме (смесь БД-70). Жидкость заливали в цилиндрический стаканчик диаметром  $d_3 = 14 \div 20$  мм, высотой  $h_3 = 5 \div 9$  см из калки в один слой, дном которого служила тонкая (1,4 мм) стеклянная пластинка. Стаканчик закрепляли вертикально над зеркалом, установленным под углом  $45^\circ$ . В качестве свидетеля поверхностных волн использовалась медная пластина толщиной 2 мм, находящаяся на расстоянии 5—7 мм от образующей цилиндра. Съемку проводили прибором ВФУ-1, наводка на резкость и съемка в статических условиях происходили в отсутствие ВВ. Затем осторожно наливали жидкость в стаканчик: нитрометан при комнатной температуре, смесь БД при  $80\text{—}90^\circ\text{C}$ . Устанавливали инициатор — шашку из флегматизированного гексогена диаметром 12 мм, массой 2 г, закрывали взрывную камеру, приводили в действие ВФУ-1 и производили иницирование. Вся последовательность операций занимала 1,5—2 мин. За это время раствор БД охлаждался до температуры  $60\text{—}70^\circ\text{C}$ , что на  $15\text{—}25^\circ$  выше, чем температура плавления смеси. Кристаллизации раствора ни у стенок, ни у дна стаканчика не происходило.

При проведении опытов с нитрометаном стенки трубки покрывали изнутри слоем парафина. Картина распространения и затухания детонации нитрометана в стаканчике диаметром 16—20 мм на фоторегистрограммах обычная: на боковой развертке след, время от времени прерывающийся в результате затухания реакции вблизи поверхности, обращенной к фоторегистратору, яркие и темные полосы — струи продуктов, волны

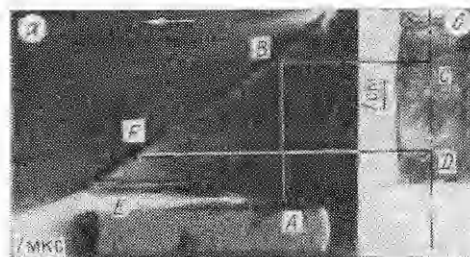


Рис. 1. Сопоставление боковой и торцевой фоторегистрограмм (а) и фотографии пластины-свидетеля (б), полученных при детонации нитрометана;  $d_3 = 17$  мм.

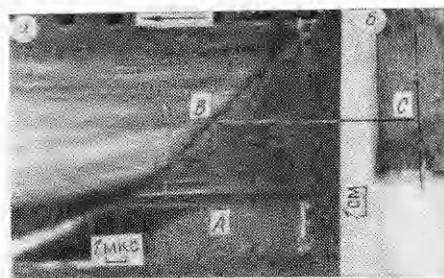


Рис. 2. Боковая и торцевая фоторегистрограммы (а) и фотография пластины-свидетеля при детонации смеси БД-70;  $d_3 = 17$  мм,  $D = 7,25$  мм/мкс.

высокоскоростной детонации, а иногда и ретонации, распространяющиеся по затухшим участкам. На торцевой развертке — характерные пилообразные зоны отсутствия реакции. На тех участках, где волны затухания возникают в части заряда, обращенной к пластине, на последней обычно имеются рытвины, ямки, а иногда и глубокие длинные бороздки — следы струй, оставленных волнами, обтекающими заряд по поверхности, типа тех, которые изучались в [8]. Угол наклона бороздок к оси заряда обычно  $50-60^\circ$ , реже  $70-75^\circ$ . Как правило, расположения бороздок на пластине и темных зон на торцевой развертке в той части заряда, которая обращена к пластине, согласуются друг с другом.

Число и степень упорядоченности расположения бороздок в целом гораздо меньше тех, которые наблюдались для состава ТГ [8]. Однако бывают исключения. На рис. 1 показаны результаты опыта в стаканчике с  $d_3 = 17$  мм,  $h_3 = 62$  мм. На пластине две четкие бороздки. Наклон их к оси заряда  $\alpha = 56$  и  $58^\circ$ , расстояние между ними  $34-35$  мм. Бороздки пересекают проекцию щели фоторегистратора на расстоянии  $13$  и  $47$  мм от места возникновения детонации в заряде.

Шаг винтовой линии  $h = \pi d \operatorname{ctg} \alpha$ . Величина  $d \approx d_3 + 2l$ , где  $d_3$  — диаметр стаканчика;  $l$  — расстояние между стенкой стаканчика и пластиной. Приняв  $l = 5$  мм,  $d_3 = 17$  мм, получим  $h = 53$  мм — шаг проекции винтовой линии на пластину, в  $1,5$  раза больший расстояния между бороздками. Это означает, что нижняя линия отвечает не продолжению верхней, а является результатом воздействия на пластину самостоятельной спиновой волны. На боковой развертке следы двух волн. Первая после яркой вспышки детонации инициатора — процесс, идущий со скоростью  $6,3$  мм/мкс. Вторая в нижней части заряда отвечает скорости  $6,7$  мм/мкс.

На торцевой развертке представляют интерес следы трех волн отсутствия реакции, начальные точки которых отстоят от момента иницирования детонации соответственно на  $1,4$ ;  $5,7$  и  $8,1$  мкс. Эти точки соответствуют расстояниям  $12$ ,  $37$  и  $53$  мм от места иницирования. Две первые волны глубокие, четкие, третья — небольшой треугольник в верхней части полосы — хорошо видна на пленке и фотографии (но может плохо получиться при репродуцировании). Начало первой волны отсутствия реакции практически совпадает с точкой пересечения первой спиновой волны и проекции щели фоторегистратора. Третья волна отсутствия реакции (на стороне заряда, обращенной к пластине) находится немного ниже точки пересечения второй спиновой волны с проекцией щели. Вторая волна отсутствия реакции отходит от лицевой стороны заряда, внедряясь в него в точке, находящейся на расстоянии  $25$  мм от первой. Это приблизительно половина шага винтовой линии ( $h/2 = 26,5$  мм). Можно думать поэтому, что возникновение второй волны отсутствия реакции также связано с прохождением по заряду спинового детонационного фронта.

Простые расчеты, приведенные выше, могут быть продублированы

столь же простым построением. Если от переднего края волны отсутствия реакции провести вертикальную прямую ( $AB$  на рис. 1) до пересечения с линией детонационного фронта на боковой развертке, а затем горизонтальную прямую  $BC$ , то она пересечет на фотографии пластины соответствующую борозду приблизительно в той точке, в которой последняя пересекается с проекцией на пластину щели фоторегистратора (штрихпунктирная линия).

Со смесью БД-70 опыты проводились при диаметре стаканчика 14 и 17 мм. При  $d_3 = 14$  мм наблюдалось затухание детонации после участка «прогона» 3–5 см. При  $d_3 = 17$  мм в основном детонация доходила до конца (в одном опыте наблюдался низкоскоростной детонационный процесс,  $D = 2,7$  км/с). Во всех случаях на торцевой фотографии видны характерные следы волн отсутствия реакции.

На рис. 2 видны две волны отсутствия реакции в части заряда, обращенной к фоторегистратору, на торцевой развертке (в нижней части полосы) и на боковой. Никаких определенных следов на пластине в этой части заряда нет: поверхность пластины равномерно шероховатая. Исходной точкой волны отсутствия реакции на той стороне заряда, которая обращена к пластине, на последней отвечает точка пересечения следа спиновой волны с проекцией щели фоторегистратора в нижней части сборки (см. траекторию  $ABC$  на рис. 2). Угол наклона следа спиновой детонации на пластине к оси заряда  $\alpha = 48^\circ$ . В двух других опытах наклон бороздок от  $48$  до  $55^\circ$ . При затухании или остановке, прерывании детонации  $\alpha$  увеличивается и может достигать до  $75$ – $80^\circ$ .

Неравномерность развития реакции при детонации зарядов из гомогенных или, как в [8], слабогетерогенных ВВ впервые отмечена, по-видимому, в работе [9], впоследствии изучалась неоднократно и послужила основой создания теорий негладкого детонационного фронта и критического диаметра детонации [1–3]. Однако проявления этой общей закономерности, основанной на фундаментальном свойстве взрывчатых систем — сильной зависимости скорости реакции от температуры, гораздо более обширны и разнообразны, чем это обычно полагают. Сюда относится разброс наружных слоев заряда, которому в свое время придавалось большое значение при передаче детонации на расстояние и даже при определении разрушающего действия взрыва [10]; неравномерный пульсирующий характер свечения в продуктах, образующихся в результате детонации; сложная структура следов, остающихся на поверхности металла при прохождении вблизи нее детонационной волны по жидкому ВВ [11]; неоднородная негладкая поверхность детонационного фронта, получающаяся при инициировании слабой плоской волной или точечным источником [12]; эффект «памяти», отчетливо проявляющийся на фоторегистрограммах: узкая зона отсутствия реакции, возникшая в результате появления воздушного пузырька на торцевой поверхности инициатора, может тянуться до самого конца заряда, несмотря на то, что все остальное ВВ рядом с ней детонирует. Наконец, наиболее интересная в рамках данной работы особенность детонации жидких ВВ — винтовые следы зон отсутствия реакции, получающиеся на статических фотографиях [13], и спиновые детонационные волны, идущие по поверхности заряда [7, 8]. Связь этих явлений друг с другом несомненна.

При детонации гомогенного ВВ вблизи предела у поверхности заряда возникает слой нагретого ударной волной, но относительно медленно реагирующего вещества. Оно сгорает в пульсирующем режиме, воспламеняясь с задержкой, отвечающей температуре ударного разогрева [8], чем, в частности, объясняется пульсирующее свечение в продуктах, оттекающих от заряда.

Конфигурация и размеры слоя непостоянны. Возникнув на краю заряда под действием волны разрежения, зона медленной реакции вращается в глубь ВВ и одновременно перемещается вслед за детонационной волной вдоль оси цилиндра. Хотя теория устойчивости волн отсутствия реакции на поверхности цилиндра еще не разработана, вполне естествен-

но ожидать, что их траектории будут преимущественно винтовыми линиями.

Когда толщина слоя непрореагировавшего ВВ у поверхности станет достаточно большой, воспламенение в этом слое может привести к детонации, распространяющейся также по винтовой линии вслед за убегающей спиновой волной отсутствия реакции. На некоторой глубине под поверхностью заряда возникает спиновая детонационная волна. Если траектория волны отсутствия реакции отвечает скорости распространения детонации по сжатому веществу, образуется устойчивая конфигурация волн, подобная показанной на рис. 1 (или на рис. 5 в [8], где наклон траектории зоны затухания задач принудительно винтовой насечкой на поверхности заряда).

Скорость спиновой волны  $D_c = D/\cos \beta$ , где  $D$  — скорость нормальной детонации;  $\beta \approx \arctg [d_3 \operatorname{tg} \alpha / (d_3 + 2l)]$  — угол наклона винтовой линии на поверхности заряда к его оси. Для нитрометана при  $\alpha = 56 \div 58^\circ$ ,  $d_3 = 17$  мм,  $l = 5$  мм,  $D = 6,3$  км/с получим  $\beta = 43 \div 45^\circ$ ,  $D_c = 8,7 \div 8,9$  км/с. Это согласуется с результатами расчета скорости в темной зоне по Дремину — Трофимову: согласно [4], скорость детонации в этой зоне для нитрометана 8,64 км/с.

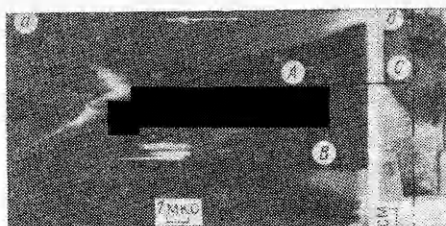
В случае смеси БД-70 расчет, проведенный по схеме [2—4], дает  $D_c = 10,5$  км/с, что отвечает  $\beta = \arccos(D/D_c) = 46,4^\circ$  и  $\alpha = 59^\circ$ . Эта величина близка к получившимся в большинстве случаев на опыте значениям  $48\text{—}55^\circ\text{C}$ . При расчете принято  $\rho_0 = 1,5$  г/см<sup>3</sup>,  $k = 3,12$ ,  $D = 1,775 + 3,645 \cdot \rho_0$  (расчет по [14], согласие скорости детонации с опытом хорошее),  $v = 4$  мм/мкс, ударная адиабата БД-70  $D = 1,7 + 1,6 \cdot v$  мм/мкс.

В общих чертах картина возникновения и распространения спиновых волн по поверхности заряда из жидких ВВ получается примерно такой же, как и при детонации литых зарядов из смесей тротил — гексоген и тротил — тэн [8]. Основное отличие состоит, как уже указывалось, в том, что сетка полос на пластине-свидетеле в [8] получалась более частой, сравнимой с частотой пульсаций свечения на боковой развертке фронта и в отходящих от поверхности продуктах детонации. В данном случае на боковой развертке пульсаций свечения практически нет: слой кальки сглаживает пульсирующее свечение во фронте, а частота пульсаций свечения продуктов гораздо больше частоты появления спиновых волн. Важное отличие состоит также в том, что в [8] прохождение спиновой волны облегчает распространение детонации по поверхностному слою: поверхность пластины (под бороздой) равномерно шероховатая до тех пор, пока детонационная волна не отойдет от края заряда и вновь не начнется разброс непрореагировавших частиц, обычно заканчивающийся прохождением спиновой волны.

Если сравнить торцевые фотографии процесса, полученные в данной работе, со статическими снимками из [13] (нитрометан при том же диаметре заряда), легко заметить, что число поверхностных волн в [13] гораздо больше числа волн отсутствия реакции на торцевых снимках: там их десятки, здесь — единицы. Очевидно, на торцевых снимках видны только волны, которые достаточно далеко проникают в глубь заряда. Существенно отметить также, что число таких глубоких волн близко к числу спиновых детонационных волн, возникающих в заряде. Более того, на фотографиях видно, что во многих случаях волна затухания появляется в щели фоторегистратора в тот момент, когда проекцию щели пересекает спиновая детонационная волна. Эти наблюдения, а также то обстоятельство, что волна затухания не исчезает после прохождения спиновой детонационной волны, а, напротив, продолжительное время распространяется и по поверхности, и в глубь заряда, позволяют предположить, что глубокие волны отсутствия реакции и, следовательно, затухания детонации жидких взрывчатых веществ тесно связаны с распространением спиновой детонационной волны либо даже являются его результатом.

Рис. 3. Взаимодействие ВВ с пластиной-свидетелем при затухании детонации заряда ( $d_3 = 17$  мм) смеси БД-70.

а — фоторегистрограммы; б — фотография пластины-свидетеля.



В тех случаях, когда спиновая волна, распространяясь по поверхности цилиндра и двигаясь к его оси, инициирует волну отсутствия реакции, в заряде формируется слой непрореагировавшего вещества в виде сложной фигуры, похожей, если пренебречь разбросом и возобновлением реакции в затухшем слое, на криволинейный конус с основанием в форме гипертрофически разрастающейся запятой. Точнее, такой конус получится, если восстановить отпечатки нереагирующей зоны на последовательно расположенных поперечных сечениях цилиндрического канала.

Судьба сжатого до высокой плотности и нагретого до высокой температуры вещества, из которого построена рассматриваемая фигура, вообще говоря, не простая. Оно может быть разбросано продуктами детонации соседних слоев заряда, в нем может возникнуть детонационный режим с повышенной скоростью, хорошо видный на многих фотографиях (см. рис. 1). На одной из фоторегистрограмм, полученной с нитрометаном, в точке появления быстрой детонационной волны возникла яркая ретонационная волна, скорость которой (7,4 км/с) выше средней скорости нормальной детонации (в этом опыте 6,4 км/с). Наконец, рассмотрение нижней части пластины на рис. 2 допускает еще одну возможность превращения слоя непрореагировавшего ВВ: разбрасываемое продуктами детонации соседних слоев заряда вещество взрывается при ударе о пластину. На рис. 2 нижняя часть пластины, находившаяся вблизи слоя непрореагировавшего вещества, интенсивно деформирована продуктами этого взрыва.

Интересная картина взаимодействия ВВ с пластиной, происшедшего после прохождения детонации по заряду, показана также на рис. 3. Через 15 мкс после прохождения детонационной волны на пленке появляется свечение, возникшее, очевидно, в результате взрыва ВВ на поверхности пластины. Можно полагать, что слой непрореагировавшего вещества, находившегося в заряде вблизи пластины, был разбросан продуктами взрыва слоя, удаленного от пластины. Нагретые частицы ВВ с высокой (0,3—0,4 мм/мкс) скоростью ударились о поверхность металла, после чего в образовавшейся на пластине пленке ВВ возникла детонация, распространявшаяся вверх и вниз от места возникновения. Скорость волны, идущей вверх (8,3 км/с), гораздо больше средней скорости детонации в этом опыте (6,6 км/с). Отсюда следует, в частности, что скорость 0,3—0,4 мм/мкс соударения частиц состава БД с поверхностью металла близка к критической, необходимой для инициирования детонации предварительно нагретого в ударной волне и при ударе о пластину слоя ВВ.

Таким образом, как видно из данных, опубликованных ранее, и результатов настоящей работы, детонирующий заряд из гомогенного ВВ в процессе распространения детонации имеет тенденцию к превращению в сложную многослойную систему, в которой каждый слой может детонировать и самостоятельно, и существенно воздействуя на распространение взрывного превращения в соседних слоях.

Спиновые поверхностные детонационные волны, способствовавшие распространению детонации в литых зарядах из состава тротил — гексоген, в случае жидких ВВ, по-видимому, являются источником возникновения глубоких волн отсутствия реакции и, следовательно, одной из причин затухания детонации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н. Критический диаметр детонации жидких ВВ // Докл. АН СССР.— 1962.— 147, № 4.— С. 870.
2. Дремин А. Н., Трофимов В. С. Расчет критических диаметров детонации жидких ВВ // ПМТФ.— 1964.— № 1.— С. 126.
3. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах.— М.: Наука, 1970.— 162 с.
4. Enig J. W., Petrone F. J. The failure diameter theory of Dremmin // Proc. Fifth Symp. (Int.) on Detonation, ACR-184, Office of Nav. Res., Arlington, Va, 1970, 99.
5. Гамезо В. Н., Кондриков Б. Н. Расчет критических характеристик распада нитрометана и тротила по зависимости критического диаметра детонации от температуры: IV Всесоюз. совещ. по детонации, доклады, Телави, 1988.— Т. 1.— С. 111.
6. Гамезо В. Н., Козак Г. Д., Кондриков Б. Н. и др. Кинетика химических реакций при детонации солей нитрометана с серной кислотой // Химическая физика процессов горения и взрыва. Кинетика химических реакций: Материалы 9-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черногоровка, 1989.— С. 110.
7. Козак Г. Д., Кондратьев В. В., Кондриков Б. Н. и др. Распространение детонации в тонком слое взрывоопасного вещества // Первый Всесоюз. симп. по макроскопической кинетике и химической газодинамике.— Черногоровка, 1984.— Т. 1. ч. 2.
8. Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Обломский В. Б. Спиновая детонация в твердых веществах // ФГВ.— 1989.— 25, № 4.— С. 86.
9. Campbell A. W., Holland T. E., Malin M. E. et al. Detonation phenomena in homogeneous explosives // Nature.— 1956.— 178.— N 4523.— P. 38.
10. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва, № 1.— М.: Изд-во АН СССР, 1952.— 20 с.
11. Urtiew P. A., Kusubov A. S. Wall traces of detonation in nitromethane-acetone mixtures // Proc. Fifth Symp. (Int.) on Detonation, ACR-184, Office of Nav. Res., Arlington, Va, 1970, 105.
12. Андреев С. Г., Жученко В. С., Зюзин В. В. и др. Продольно-поперечная неустойчивость ускоряющихся иницирующих ударных волн // ФГВ.— 1991.— 27, № 1.— С. 139.
13. Persson P. A., Bjannholt G. A photographic technique for mapping failure waves and other instabilizing phenomena in liquid explosive detonation // Proc. Fifth Symp. (Int.) on Detonation, ACR-184, Office of Nav. Res., Arlington, Va, 1970, 115.
14. Кондриков Б. Н., Сумин А. Н. Уравнение состояния газов при высоком давлении // ФГВ.— 1987.— 23, № 1.— С. 114.

г. Москва

Поступила в редакцию 26/VII 1991

УДК 621.791

*М. С. Качан, Е. П. Курочкина*

### ТЕПЛОВАЯ ДИНАМИКА СВАРНОГО ШВА ПРИ СОУДАРЕНИИ ПЛАСТИН ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Решена несимметричная многофронтная задача Стефана для случая соударения пластин из меди и стали. В отличие от симметричной задачи здесь отмечено появление приконтактных твердых зон в обеих пластинах. Расплав полностью затвердевает за 3 мкс, что соизмеримо с временем возможного прихода растягивающих напряжений.

Процесс образования оплавленной зоны в результате соударения пластин описан в работах [1, 2]. Тепловой режим сварного шва (особенно толщина оплавленной зоны и время затвердевания) имеет принципиальное значение для качества сварки. Приходящие в зону шва после периода высоких давлений волны разгрузки могут привести к возникновению растягивающих напряжений, препятствующих сварке. Необходимо, чтобы к моменту прихода волн разгрузки шов успел затвердеть и достаточно остыть. К настоящему времени уже выполнены экспериментальные [3, 4] и теоретические [4, 5] исследования температурного режима шва. Соответствующая задача Стефана для модели плоского соударения одинаковых пластин и динамика межфазной границы рассчитаны в [6]. Практически важное значение имеет исследование