

5. Д. Райнхардт, Д. Пирсон. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М.: ИЛ, 1958.
6. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ЖЭТФ, 1961, 40, 6, 1980.
7. J. O. Egeman. J. Appl. Phys., 1961, 32, 5, 939.
8. Е. Ф. Грязнов, В. А. Одинцов, В. В. Селиванов. Изв. АН СССР. МТТ, 1976, 6, 148.
9. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1954.
10. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, Ю. П. Тарасов. ФТТ, 1962, IV, 1, 249.
11. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
12. Z. Rassenberg, J. Parlon, D. Yaziv. J. Appl. Phys., 1980, 13, 1489.
13. А. В. Апаньин, А. Н. Дремни, Г. П. Канель. ФГВ, 1981, 17, 3, 93.
14. В. А. Зильберштейн, Э. П. Эстрин. ФММ, 1971, 32, 2, 436.
15. G. E. Duval, R. A. Graham. Rev. Modern. Phys., 1977, 49, 3, 523.
16. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ЖЭТФ, 1964, 47, 3(9), 814.
17. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 2, 252.
18. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. Приборы и техника эксперимента, 1963, 1, 135.
19. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ФТТ, 1963, 5, 1, 269.
20. С. А. Новиков, В. А. Синицын, А. Г. Иванов и др. ФММ, 1966, 21, 3, 452.
21. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 4, 608.
22. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1965, 20, 1, 133.

Поступила в редакцию 26/VII 1983

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК УГЛЕРОДА И НИТРИДА БОРА НА ДЕТОНАЦИЮ ВВ

С. В. Пятернев, С. В. Першин, А. И. Дремни, А. И. Анискин

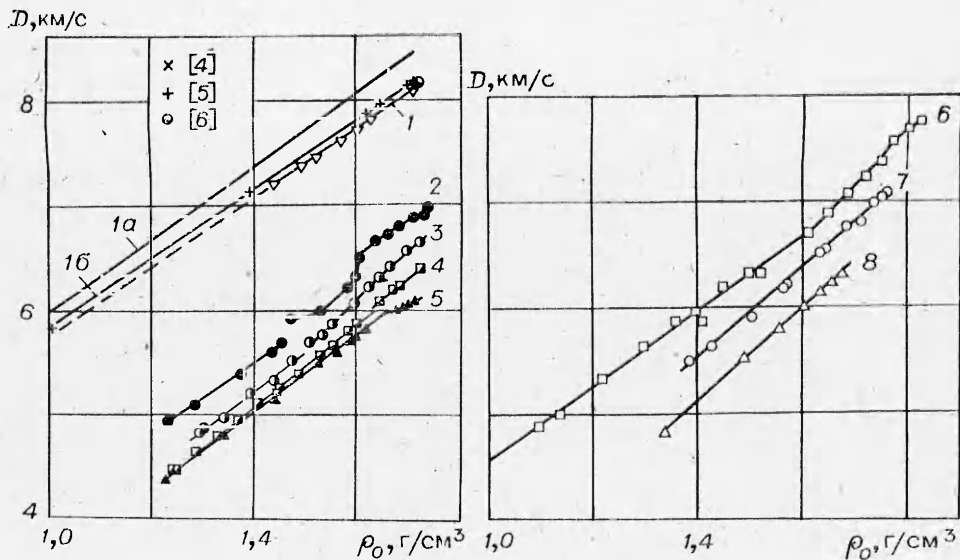
(Черноголовка)

Вопрос о влиянии дисперсной добавки к взрывчатому веществу на процесс детонации сложен и недостаточно изучен. Сложность состоит в необходимости его рассмотрения одновременно, по крайней мере, в трех аспектах: газо- и термодинамическом и кинетическом. Влияние добавки многообразно и зависит от физических свойств и структурного состояния ее вещества, массовой доли, дисперсности веществ в смесевом заряде, а также от размеров и формы заряда.

На процесс детонации влияет, в частности, протекание в зоне химической реакции детонационной волны полиморфного превращения вещества добавки. Сведения об этом в литературе отсутствуют. Только одна публикация [1] случайным образом имеет отношение к этому вопросу. Ее авторы, изучая влияние на параметры детонации добавок различных веществ (алюминия, вольфрама и кварца), обнаружили излом в сторону увеличения скорости детонации на ее зависимости от начальной плотности смеси тринитротолуола с кварцем. В [1] предполагалось, что этот излом обусловлен полиморфным превращением в кварце (оснований для более четкой интерпретации в то время не было). Полиморфное превращение в ударно-сжатом кварце обнаружено позже [2, 3], однако установленный в [1] интересный факт оставался без внимания до последнего времени.

Цель настоящей работы — экспериментальное доказательство влияния полиморфного превращения вещества добавки на процесс детонации. В качестве добавки выбраны кристаллохимические аналоги — углерод и нитрид бора, поведение которых в ударных волнах хорошо изучено.

Для приготовления смесей и прессования зарядов использовались ВВ: гексоген в состоянии поставки, на 60% (по массе) состоящий из частиц размером $\delta = 180 \div 300$ мкм, тринитротолуол (ТНТ) с $\delta < 100$ мкм и различные смеси (ТГ) этих двух ВВ. В качестве добавок использовались: графит $C_{гр}$ ($\Delta < 80$ мкм), коллоидный графит (6—25 мкм), графитоподобный нитрид бора $BN_{гр}$ (4—25 мкм), полученный взрывом вюрцитный нитрид бора BN_n (чернобор) с $\Delta < 3$ мкм и сфалеритный (кубический) нитрид бора $BN_{сф}$ с $\Delta < 1$ мкм. Смесей готовили двухчасовым перемешиванием компонентов в фарфоровой емкости с деревянными куби-

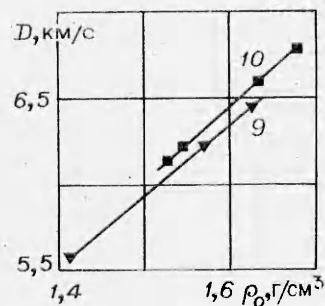


ками на рольганге. Размер частиц после изготовления смесей не контролировали. Характеристики смесей приведены в таблице.

Регистрировались зависимости скорости детонации D от начальной плотности ρ_0 смесей. Использовались заряды диаметром 40 и длиной (без учета длины детонационной линзы) 160 мм. Скорость детонации в конце заряда на базе 80 мм измеряли ионизационными датчиками одновременно двумя осциллографами ОК-15М (случай смеси графита с гексогеном) или двумя частотомерами ЧЗ-34. Ошибка в измерении скорости детонации в первом случае не превышала 1, во втором — 0,5%. Ошибка в измерении начальной плотности зарядов не превышала 0,3%. Зарегистрированные зависимости $D(\rho_0)$ представлены на рисунке. Номера линий соответствуют номеру смеси в таблице.

Следует отметить согласованность настоящих результатов по регистрации зависимости $D(\rho_0)$ для ТГ 25/75 с экспериментальными данными [4—6] (линия 1б) и значительное их отклонение от приведенной в [7] (линия 1а): данная работа — $D = 2,459 + 3,288\rho_0$, $S_{ост} = 0,017$ км/с; [4—6] — $D = 2,552 + 3,277\rho_0$, $S_{ост} = 0,022$ км/с; [7] — $D = 2,586 + 3,422\rho_0$. Здесь $S_{ост}$ — остаточная дисперсия [8].

Монотонное в идеальном режиме распространения детонации возрастание ее скорости с увеличением начальной плотности зарядов в таких индивидуальных ВВ, как ТНТ и гексоген, а также смесей этих веществ



Номер смеси	ВВ	Добавка	Δ , мм	ТНТ/Г/(BN или С), %
1	ТГ 25/75	—		25/75
2	ТГ 25/75	BN _{гр}	4—25	18, 75/56, 25/25
3	ТГ 50/50	BN _{гр}	4—25	37, 5/37, 5/25
4	ТГ 80/20	BN _{гр}	4—25	60/15/25
5	ТНТ	BN _{гр}	4—25	75/25
6	Гексоген	С _{гр}	≤ 80	75/25
7	ТГ 25/75	С _{гр}	6—25	18, 75/56, 25/25
8	ТНТ	С _{гр}	6—25	75/25
9	ТГ 25/75	BN _в	≤ 3	18, 75/56, 25/25
10	ТГ 25/75	BN _{сф}	≤ 1	18, 75/56, 25/25

[7] не нарушается какими-либо особенностями и практически линейно. Введение инертных добавок снижает скорость детонации, но не нарушает монотонного характера зависимостей $D(\rho_0)$. Введение же добавки, способной к полиморфному превращению в ударных волнах [4] (см. рисунок), приводит к появлению на этих зависимостях изломов как в сторону уменьшения скорости детонации, так и в сторону ее увеличения.

Естественно было предположить, что эти особенности обусловлены влиянием полиморфных превращений веществ добавки на детонационный процесс. В пользу такого предположения свидетельствует соизмеримость времен полиморфного и взрывчатого превращений, а также близость давлений в детонационных волнах, отвечающих изломам D , ρ_0 -зависимостей, к давлениям в изломах ударных адиабат соответствующих веществ — кварца, графита и графитоподобного нитрида бора. Исследования структуры УВ в графите и нитриде бора [9] показали, что время превращения в плотные фазы при давлениях, близких к началу перехода (12 ГПа в нитриде бора и 19,6 ГПа в графите), равно в обоих случаях 1 мкс и быстро убывает с ростом давления, достигая в случае нитрида бора при 16 ГПа значения 0,1 мкс.

Время химической реакции (ширина химика) в детонационной волне для индивидуальных [10] и смесевых [11] ВВ при давлении в плоскости Чепмена — Жуке $p = 8$ ГПа не превышает 0,5 мкс и убывает с ростом p до 0,1—0,2 мкс.

Проведенная с использованием политропического уравнения состояния с показателем политропы, равным 3, оценка давлений в плоскости Чепмена — Жуке детонационных волн, скорость детонации которых отвечает изломам D , ρ_0 -зависимостей, дает $p = 12$ ГПа для зависимостей 2 и 3 и 14 ГПа для зависимостей 4 и 5 (см. рисунок). Эти значения близки к давлению начала перехода нитрида бора в плотную кристаллическую форму при ударном сжатии. В случае же графита, обладающего близкими к нитриду бора физическими свойствами, практически такой же (до начала превращения) ударной сжимаемостью и примерно таким же размером частиц, аналогичные D , ρ_0 -зависимости (7 и 8 на рисунке) остаются линейными. Излом в случае графита (линия 6) регистрируется для его смеси с гексогеном, при детонации которой ($\rho_0 = 1,71$ г/см³) достигается давление 20 ГПа, необходимое для его превращения в алмаз в ударной волне.

Поскольку отток вещества от ударного фронта детонационной волны является дозвуковым, а от плоскости Чепмена — Жуке — сверхзвуковым, полиморфное превращение может влиять на параметры детонации только в том случае, если оно протекает за время химической реакции.

Влияние инертных добавок к пористым ВВ на параметры детонации, структуру фронта и время химической реакции в основном обусловлено потерями энергии на прогрев добавки в зоне химической реакции [11]. Влияние добавки, претерпевающей полиморфное превращение, более сложно. Превращение сопровождается резким уменьшением объема, изменением внутренней энергии за счет скрытой теплоты превращения и термодинамических свойств вещества добавки. На поглощение добавкой тепла может также сказаться изменение ее реальной структуры.

Значение скрытой теплоты полиморфного превращения находится в пределах от десятых долей до нескольких процентов энергии кристаллической решетки и поэтому может существенным образом повлиять на параметры детонации. К такому же эффекту приводит и изменение ее термодинамических свойств. Превращения графита и нитрида бора в плотные модификации характеризуются большим изменением объема — отношение удельных объемов исходных и плотных модификаций при нормальных условиях равно 1,5, а при давлениях, соответствующих полному превращению в УВ (20 ГПа — ВН и 40 ГПа у С), — 1,2. Температурные зависимости теплоемкости и характеризующие их температуры Дебая полиморфных модификаций нитрида бора, а также графита и алмаза,

сильно отличаются [12—14]. При этом дебаевские температуры алмаза и сфалеритного нитрида бора имеют аномально высокие значения. Изменение в ходе полиморфного превращения термодинамических свойств добавки влияет на равновесную температуру ее смеси с продуктами детонации и ее внутреннюю энергию. В свете сказанного определим основные факторы влияния добавки, претерпевающей полиморфное превращение, на параметры детонации:

1) резкое уменьшение объема вещества добавки при его переходе в плотную модификацию, которое должно сопровождаться снижением скорости детонации из-за охлаждения реагирующей смеси в результате «преждевременного» расширения в освобожденный объем;

2) изменение термодинамических свойств (теплоемкости, дебаевской температуры) вещества добавки при ее переходе в новую кристаллическую форму. Действие этого фактора может совпадать с действием первого, но может быть направлено и в противоположную сторону. Если образовавшаяся фаза для достижения равновесной температуры требует большего количества тепла, чем исходная, детонация замедлится — действие двух факторов совпадает. Если же для ее прогрева потребуется меньше тепла, чем для исходной, то скорость детонации возрастет — основные факторы окажутся противоборствующими.

Преобладающее влияние первого фактора над вторым, по-видимому, имеет место при детонации смеси графитоподобного нитрида бора с ТНТ, когда D , ρ_0 -зависимость (линия 5 на рисунке) отклоняется в сторону уменьшения скорости детонации. По сравнению с остальными (зависимости 2—4) температура детонационного нагружения добавки в этом случае минимальна, и превращение графитоподобного нитрида бора, как известно [15], происходит в вюрцитную модификацию, у которой температура Дебая ~ 1400 К [13]. Изменение внутренней энергии добавки не так велико, как при переходе в сфалеритную модификацию с более высокой температурой Дебая (1700—1800 К) [12], и определяющим является влияние, обусловленное уменьшением объема добавки.

С увеличением доли гексогена в смеси с ТНТ растет температура детонационного нагружения NB. Известно [15], что это приводит к образованию сфалеритной модификации, доля которой в смеси с вюрцитной повышается с температурой. При этом возрастает влияние второго фактора. Появление в зоне химической реакции добавки со значительно меньшей, чем у исходной, внутренней энергией равносильно высвобождению дополнительного тепла, не только компенсирующего действие первого фактора, но и приводящего к возрастанию скорости детонации. С повышением (при переходе от смеси к смеси 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2) температуры нагружения добавки влияние второго фактора увеличивается, чем и объясняется возрастание отклонения зависимостей от первоначального хода.

Аналогичным образом следует объяснить и излом на D , ρ_0 -зависимости (линия 6) для смеси гексогена с графитом.

Достоверность предположения о влиянии изменения термодинамических свойств добавки на параметры детонации получила экспериментальное подтверждение. Как и следовало ожидать, результаты для смеси ТГ 25/75 с вюрцитным нитридом бора (зависимость 9) расположилась на 0,1 км/с ниже, чем для аналогичной смеси (10) со сфалеритным нитридом бора. Расчет по политропическому уравнению состояния убавил скорости детонации при замене сфалеритного нитрида бора вюрцитным, проведенный для данного случая с учетом рассчитанной для высоких температур (и равной 0,15 кДж/г) разницы внутренних энергий сфалеритного и вюрцитного нитрида бора, дал значение 0,1 км/с, совпадающее с экспериментальным. Разница внутренних энергий сфалеритного и вюрцитного нитрида бора рассчитана в дебаевском приближении для зависимости внутренней энергии от температуры с использованием дебаевских температур из работы [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил, М. Н. Арифов. Докл. АН СССР, 1960, 131, 5, 1140.
2. Г. А. Ададуров, А. Н. Дремин, С. В. Першин и др. ПМТФ, 1962, 4, 81.
3. J. Wackerly. J. Appl. Phys., 1962, 33, 2, 922.
4. А. Н. Дремин, Г. А. Ададуров. Изв. АН СССР. ОХН, 1960, 6, 1130.
5. M. J. Kamlet, H. Hurvitz. J. Chem. Phys., 1968, 48, 8, 3865.
6. М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4, 127.
7. М. Н. Борзых, В. П. Кондриков. ФГВ, 1978, 14, 1, 117.
8. Н. Джонсон, Ф. Лнон. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы обработки данных). Т. 1. М.: Мир, 1980.
9. А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, Г. Н. Канель и др. ПМТФ, 1978, 3, 112.
10. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
11. К. К. Шведов, А. Н. Анискин, А. Н. Ильин и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 72.
12. Н. Н. Сирота, Н. А. Кофман. Докл. АН СССР, 1975, 225, 6, 1316.
13. Н. Н. Сирота, Н. А. Кофман. Докл. АН СССР, 1976, 230, 1, 82.
14. D. L. Burk. Phys. Rev., 1958, 111, 5, 1275.
15. Г. А. Ададуров, А. В. Ананьин, Т. В. Бавина и др. Тр. II Совещания по обработке материалов взрывом. Новосибирск, 1982.

Поступила в редакцию 26/IV 1985,
после доработки — 5/VII 1985

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ СИММЕТРИЧНОМ СОУДАРЕНИИ СТРУЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

А. В. Уткин, А. Н. Дремин
(Черноголовка)

Высокоскоростное косое соударение металлических пластин сопровождается рядом физических явлений, наиболее интересны из которых — волнообразование на границе соударения металлов и формирование обратной струи. Основные параметры обратной струи хорошо согласуются с расчетом в рамках идеальной несжимаемой жидкости [1]. В этом случае процесс соударения сводится к задаче о столкновении плоских струй. Возникающая конфигурация течения в системе координат, связанной с точкой контакта, показана на рис. 1: OA и OB — струи, соударяющиеся под углом 2β ; OC и OD — основной поток и обратная струя; O — точка контакта. Интерес к гидродинамическому описанию процесса соударения пластин возник вновь в связи с открытием волнообразования на границе соединения пластин [2]. Подробно это явление рассмотрено в [3, 4]. Там же приведен критический обзор многих концепций, предложенных для описания волнообразования. В настоящей работе рассматривается гидродинамический подход.

В [5, 6] высказано мнение, что возникновение волн есть следствие неустойчивости течения за точкой контакта. В последовавших затем работах (например, [7—9]) на основании не только качественных, но и количественных оценок показано, что в рамках этого подхода находят объяснение основные закономерности процесса волнообразования. Несколько принципиальных вопросов, однако, остались не решенными. Во-первых, при исследовании на устойчивость течения за точкой контакта аппроксимируется более простым течением, которое и исследуется на устойчивость. Исходный же поток до сих пор на устойчивость не анализировался. Во-первых, известно, что волны на границе соединения пластин имеют отчетливо выраженную вихревую структуру

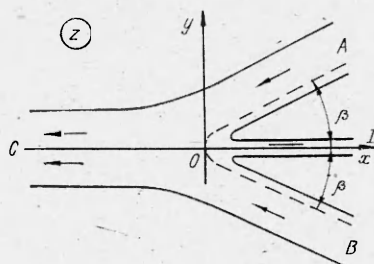


Рис. 1. Симметричное соударение пластин.