

Таким образом, проведенный трехмерный численный расчет несимметричного соударения цилиндрического бойка с пластиной позволил исследовать особенности перфорации пластин в широком диапазоне начальных условий. С ростом скорости встречи вязкое растекание материала пластины становится определяющим механизмом пробивания. Передняя часть цилиндра приобретает при внедрении существенно несимметричную форму. Показано наличие при внедрении ударника двух действующих механизмов разрушения — волнового и деформационного.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Бриджмен. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: ИЛ, 1955.
2. Г. И. Канель, А. И. Дремин.— В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1979.
3. В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.
4. С. А. Новиков. ФГВ, 1985, 21, 6, 77.
5. Г. И. Канель, В. В. Шербань. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.
6. В. А. Горельский, И. Е. Хорев, И. Т. Югов. ПМТФ, 1985, 4, 112.
7. И. Е. Хорев, В. А. Горельский.— В кн.: Детонация. Черногловка, 1981.
8. R. T. Sedgwick, L. J. Hagaman, L. J. Herrman e. a. Int. J. Eng. Sci., 1978, 16, 11, 859.
9. Г. П. Меньшиков, В. А. Одинцов, Л. А. Чудов. Изв. АН СССР. МТТ, 1976, 1, 125.

Поступила в редакцию 27/III 1986

УДК 662—215.1

О ПРОЯВЛЕНИИ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ВЕЩЕСТВА ДОБАВКИ В ИЗМЕРЕНИЯХ ВОЛНОВЫХ И МАССОВЫХ СКОРОСТЕЙ ДЕТОНАЦИИ ВВ

С. В. Першин, А. Н. Дремин, С. В. Пятернев, Д. Н. Цаплин

(Черногловка)

Настоящая работа продолжает исследования [1, 2], в которых показано, что увеличение скорости детонации D на ее зависимости от начальной плотности $\rho_{см}$ смеси ВВ с добавками графита и графитоподобного нитрида бора обусловлено протеканием полиморфных превращений этих веществ в зоне химической реакции [1], в конце которой на зарегистрированном магнитоэлектрическим методом профиле детонационной волны (ДВ) наблюдается резкий спад массовой скорости [2].

Цель настоящей работы — подтвердить справедливость данной трактовки. Для этого в круг исследований наряду с углеродом и нитридом бора включены добавки кремния и кварца — веществ, также претерпевающих полиморфные превращения в ударных волнах.

Изучались зависимости скорости детонации от начальной плотности смесей ВВ с добавками алмаза, графитоподобного нитрида бора, кремния и кварца, а также профили массовой скорости в смеси ТГ с кремнием. Постановка экспериментов описана в [1, 2]. Точность измерения $\rho_{см}$ и D в них не хуже 0,5%. Полученные результаты представлены на рис. 1—3.

Зависимости $D(\rho_{см})$ для смесей гексогена с 25% (по массе) алмаза и графита, несмотря на значительно меньший (<3 против 80 мкм) по сравнению с графитом размер частиц алмаза и на его уникальную (в 5 раз большую, чем у меди) теплопроводность, расположены в непосредственной близости друг от друга (см. рис. 1). Тот факт, что кривая для алмаза находится выше, свидетельствует о том, что переход графита в алмаз в зоне химической реакции должен сопровождаться ростом D , что и наблюдается на опыте [1]. Ситуация в данном случае такая же, как и с нитридом бора — линия $D(\rho_{см})$ для кубического нитрида бора лежит

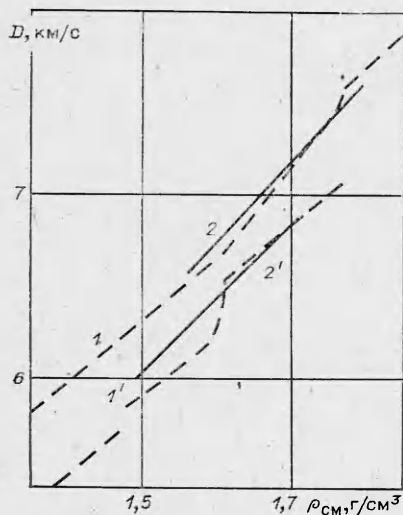


Рис. 1. $D(\rho_{см})$ -зависимости для смесей гексогена с 25% добавки.

1 — графит [1], 2 — алмаз; 1', 2' — смеси ТГ 25/75 с 25% графитоподобного и кубического нитрида бора [1].

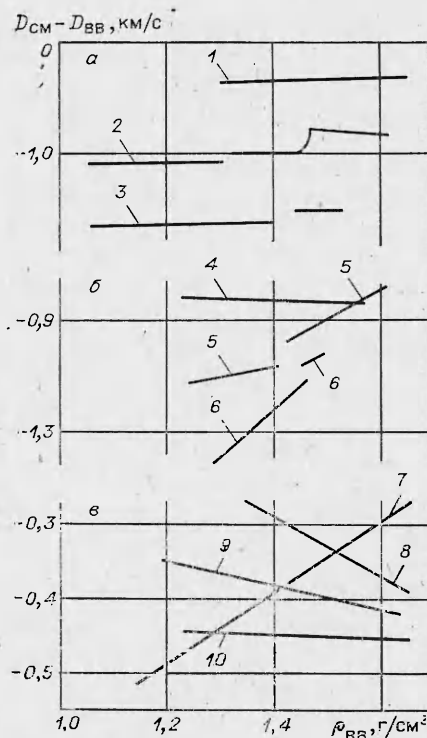


Рис. 2. Зависимости убыли скорости детонации от начальной плотности ВВ: ТГ 25/75 (а, б), ТНТ (в).

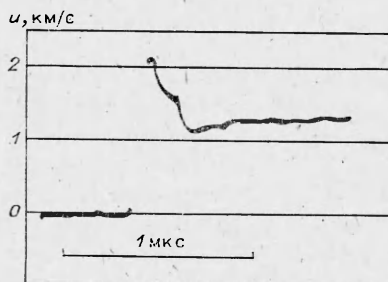
Добавки, %: $\text{BN}_{\text{ГР}}$ ($\delta=4 \div 25$ мкм), 1 — 10, 2 — 25, 3 — 40, 7 — 10 ($\delta=63 \div 70$ мкм); SiO_2 , 4 — 25 ($\delta < 40$ мкм), 8 — 10 — 15 ($\delta=63 \div 70$, < 40 и < 10 мкм соответственно); Si, 5, 6 — 25 ($\delta=125 \div 250$ и < 40 мкм соответственно).

(см. рис. 1) выше, чем для графитоподобного, и близка к верхнему участку этой зависимости, который, согласно [1], отвечает переходу нитрида бора в плотную кубическую модификацию.

Полного совпадения верхнего участка кривой 1 с линией 2 ожидать и не следовало, поскольку итоговые состояния на этих зависимостях отличаются в силу различия в разогреве веществ (графита и алмаза), обладающих существенно разной сжимаемостью и размером в разной степени прогреваемых частиц, а также в силу возможно неполного перехода графита в алмаз в зоне химической реакции. Можно предположить, что, уменьшив размер частиц графита до субмикронного, «алмазный» участок для графита удастся приблизить к зависимости для смеси с алмазом. Ниже, на примере добавки кремния, показана реальность такой возможности.

Таким образом, вывод [1] об обусловленности увеличения скорости детонации смешанного заряда ВВ уменьшением эффективной теплоемкости добавки в результате перехода ее вещества в зоне химической реакции в плотную модификацию находит экспериментальное подтверждение.

Рис. 3. Осциллограмма профиля массовой скорости в заряде диаметром 60 мм ТГ 25/75 + 25% Si ($\delta=70-125$ мкм) с $\rho_{см} = 1,585$ г/см³.



Следует также заметить, что действию этого фактора содействует выделение теплоты полиморфного превращения.

Как и на ранее зарегистрированной в [1] зависимости 2 (см. рис. 2), резкое (на 100 м/с) возрастание скорости детонации смеси ТГ/ $\text{BN}_{\text{гр}}$ 60/40 имеет место (см. рис. 2, 3) при давлении в плоскости Чепмена — Жуге $p_{\text{ч-ж}} \approx 12$ ГПа, что по-прежнему хорошо согласуется с давлением начала полиморфного превращения нитрида бора в УВ [3].

Для 10%-ных смесей графитоподобного нитрида бора с ТГ 25/75 и ТНТ аномалий не зарегистрировано. В первом случае (см. рис. 2, 1) ожидаемое возрастание скорости детонации, по-видимому, расположено левее исследованного диапазона $\rho_{\text{ВВ}}$, где опыты провести не удалось из-за недостаточной механической прочности прессованных зарядов малой плотности. Во втором случае (см. рис. 2, 7) проявление полиморфного превращения не в кубическую, а в вюрцитную модификацию при малом содержании добавки могло оказаться слабым для регистрации изменения величины D .

Зависимости $D(\rho_{\text{см}})$ для смесей ТГ 25/75 с 25% кремния имеют характерные разрывы при $p_{\text{ч-ж}} = 14 \div 15$ ГПа для добавки с размером частиц $\delta = 125 \div 250$ мкм (см. рис. 2, 5) и 13—14 ГПа при $\delta = 40$ мкм (см. рис. 2, 6).

Можно было бы дать следующее толкование наблюдаемым аномалиям: с увеличением $\rho_{\text{ВВ}}$ и p в ДВ время химической реакции уменьшается, частица добавки не успевает прогреться и отобрать тепло у продуктов реакции до прохождения через плоскость Чепмена — Жуге, что ведет к росту скорости детонации. Однако скачкообразный характер возрастания D , а также малое (порядка $0,01$ г/см³), как это видно на рис. 2, отличие соответствующих разрывам значений $\rho_{\text{ВВ}}$ при весьма значительном (почти на порядок по линейному размеру и на три порядка по массе) изменении размера частиц не позволяет сделать такого заключения.

В то же время близость величин $p_{\text{ч-ж}}$ в изломах кривых 5 и 6 к давлению (13 ГПа) начала полиморфного превращения кремния в УВ [4], а также наличие такой же, как и в случаях с добавками графита и графитоподобного нитрида бора [2], особенности на профиле массовой скорости детонационной волны в ТГ с кремнием (см. рис. 3), свидетельствует о том, что появление аномалий (см. рис. 2, 5 и 6) обусловлено протеканием в зоне химической реакции полиморфного превращения кремния в плотную модификацию, дебаевская температура которой, по-видимому, значительно выше, чем у исходной фазы. Излом кривой 7 свидетельствует о том, что полиморфное превращение может проявляться и при достаточно большом размере частиц добавки. Из сравнения линий 5 и 6 видно, что падение D при уменьшении δ значительно. Это обстоятельство и позволяет надеяться на приближение «алмазного» участка зависимости для состава графит — гексоген к аналогичной для смеси, содержащей алмаз.

В работе [5] обнаружен излом кривой $D(\rho_{\text{см}})$ для смеси ТНТ с 15% кварца, обусловленный полиморфным превращением кварца в плотную модификацию. На рис. 2 приведены кривые для смесей ТГ и ТНТ с кварцем. Отсутствие изломов на них может быть объяснено тем, что полиморфный переход в кварце немартенситного типа и его давление может зависеть от условий нагружения и прогрева частиц. Так, давление полиморфного перехода в монокристалле кварца составляет $\sim 14,4$ ГПа [6], а в смеси кварца с парафином ~ 20 ГПа [7]. Анализ результатов опытов для ТНТ с кварцем различных фракций показывает, что прогрев в ДВ имеет место уже при сравнительно больших δ . Энергетические затраты на сжатие и разгон добавки невелики по сравнению с затратами на ее разогрев [8]. Поэтому если теплообмен ограничивается термическим сопротивлением продуктов детонации, то в случае добавок кварца и кремния, которые имеют примерно равную теплоемкость, должно было бы наблюдаться примерное совпадение кривых $D(\rho_{\text{ВВ}})$ для аналогичных смесей. В эксперименте наблюдается более сильное падение скорости дето-

нации для смесей с кремнием, который имеет меньшее термическое сопротивление по сравнению с кварцем. Можно сделать вывод, что теплообмен определяется внутренним термическим сопротивлением вещества добавки. При этом значение числа Био может (например, в случае добавки кварца) значительно превышать единицу.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Пятернев, С. В. Першин, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1986, 22, 3, 99.
2. С. В. Пятернев, С. В. Першин, А. П. Дремин и др. Там же.
3. Г. А. Ададунов, Л. О. Атовмян, З. Г. Алиев и др. Докл. АН СССР, 172, 5, 1066.
4. Т. Goto, Т. Sato, J. Siono. Jap. J. Appl. Phys., 1982, 21, 6, 369.
5. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил, М. И. Арифов. Докл. АН СССР, 1960, 131, 5, 1140.
6. J. Wackerly. J. Appl. Phys., 1962, 33, 2, 922.
7. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин, С. В. Першин и др. ПМТФ, 1962, 4, 81.
8. К. К. Шведов, А. И. Анискин, А. П. Ильин и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 72.

Поступила в редакцию 27/III 1986

УДК 533.6.011.72

РАССЛОЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

*П. А. Войнович, Н. В. Евтюхин,
А. И. Жмакин, А. Д. Марголин,
А. А. Фурсенко, В. М. Шмелев*

(Москва)

Анализ явлений, связанных с распространением ударных волн (УВ) по неоднородным средам, необходим при решении большого числа задач физики взрыва, релаксационной газодинамики сверхзвуковых течений, астрофизики. Различным аспектам взаимодействия УВ с газами, в которых существуют значительные градиенты температуры и плотности, посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ [1—7]. В [1, 2] наблюдалось искривление фронта волны и ослабление ее интенсивности в прогревом слое над поверхностью пластины. Результаты экспериментов [1] сравнивались с расчетом, основанным на одномерной модели распада разрыва, развитой для усредненных параметров прогреваемого слоя. Указано на возможность размытия фронта УВ, если скорость ее распространения в невозмущенной области меньше скорости звука внутри тепловой неоднородности.

Особенности распространения УВ в смесях неперемешанных или частично перемешанных газов с различными теплофизическими свойствами изучались в [3, 4, 6, 7]. В [7] показано хорошее совпадение картины течения при нормальном падении УВ на границу области предварительно неперемешанных газов, полученной с помощью двумерных расчетов, и результатами экспериментов. В последнее время появились сообщения об аномальных явлениях при распространении УВ по существенно неоднородной и неравновесной среде (плазма тлеющего газо-