

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ ТЭНА И ОКТОГЕНА

А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов, Л. К. Антонюк, Д. В. Назаров,  
С. А. Финюшин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, root@gdd.vniief.ru

Проведены экспериментальные исследования параметров детонации в монокристаллах тэна и октогена. Зарегистрированы параметры состояния в точке Чепмена — Жуге, параметры пика Неймана и зоны химических реакций. Показано, что в монокристаллах по сравнению с прессованными гетерогенными взрывчатыми веществами значительно возрастают длительность и ширина зоны химических реакций.

Ключевые слова: детонационная волна, монокристаллы ВВ, химический пик, состояние в точке Чепмена — Жуге, зона химических реакций.

### ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени структура и многие параметры детонационных волн в монокристаллах взрывчатого вещества (ВВ) изучены недостаточно. Величины пика Неймана неизвестны, а для состояний в точке Чепмена — Жуге приводятся только оценочные и расчетные параметры. Неизвестны также длительность и ширина зоны химических реакций в монокристаллах ВВ и их отличие от прессованных гетерогенных ВВ технологической плотности (98 ÷ 99 % от монокристаллической).

В работах [1–3] были проведены тщательные исследования параметров детонации монокристаллов тэна в четырех кристаллографических ориентациях (101), (100), (110), (001) в области давлений  $p < 19$  ГПа. Получено соотношение  $D = 2.54 + 2.41U - 0.311U^2$  для области  $0.4 < U < 1.9$  мм/мкс. Установлено, что вид кривой ударной сжимаемости не зависит от ориентации кристаллов, данные для всех ориентаций легли на одну кривую. Определены две более чувствительные ориентации: (110) (при нагружении монокристалла вдоль ориентации (110) детонация возникает при 4.22 ГПа) и (001), и две менее чувствительные ориентации: (101) и (100) (не детонируют при  $p \leq 19$  ГПа). Ориентация (001) показала смешанное поведение, но она ближе к ориентации (110) по чувствительности.

Цель настоящей работы — исследовать детонационные свойства монокристаллов тэна ( $\rho = 1.774$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 8.3$  км/с [4–8]) в кристаллографической ориентации (100) и октоге-

на ( $\rho = 1.904$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 9.1$  км/с [4–8]) в кристаллографической ориентации (111) в области их детонационных давлений.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Профиль массовой скорости  $U_{\text{LiF}}(t)$  на границе раздела монокристалл ВВ/LiF регистрировался лазерным интерферометром Фабри — Перо. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1.

Монокристаллы тэна инициировались детонационной волной, выходящей из заряда ТГ 30/70 (30 % тротила, 70 % гексогена) ( $p = 30.4$  ГПа), а монокристаллы октогена — детонационной волной, выходящей из заряда пластифицированного октогена 90/10 (90 % окто-

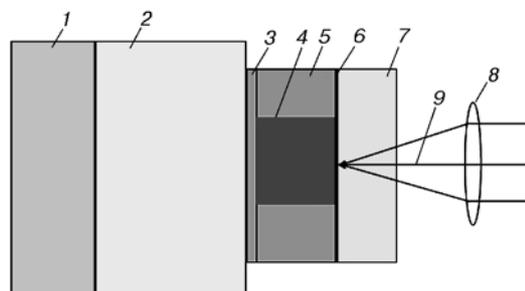


Рис. 1. Схема постановки экспериментов:

1 — плоскороволновой генератор, 2 — инициирующий заряд, 3 — слой пластифицированного ВВ, 4 — монокристалл ВВ, 5 — обойма из пластифицированного ВВ, 6 — алюминиевое покрытие на LiF ( $\approx 1$  мкм), 7 — кристаллы LiF, 8 — фокусирующая линза, 9 — зондирующее лазерное излучение

гена, 10 % связки) ( $p = 39$  ГПа) толщиной 40 мм. Их давления близки к давлениям детонации монокристаллов ВВ. Для уменьшения боковой разгрузки монокристаллы ВВ окружали обоймами из пластифицированных ВВ с близкими детонационными свойствами. Для исключения возможных зазоров в ряде опытов, где поверхность монокристалла ВВ была неплоской, между инициирующим зарядом и монокристаллом размещался тонкий слой пластифицированного ВВ.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОНОКРИСТАЛЛАМИ ОКТОГЕНА

Использовались монокристаллы октогена следующих размеров: длина до 30 мм, ширина до 14 мм, толщина  $5 \div 14$  мм. Монокристаллы октогена, исследовавшиеся в серии из 4 опытов, имели форму двойниковых крестообразных непрозрачных сростков, которые образуются в процессе кристаллизации октогена из перенасыщенного раствора вдоль направлений (011) и (110). В результате получался монокристалл с плоской поверхностью в кристаллографической ориентации (111), по которой происходило его нагружение детонационной волной. Плоскость (111) является самым чувствительным кристаллографическим направлением в монокристалле октогена.

Характерный профиль  $U_{LiF}(t)$  одного из опытов для монокристалла октогена представлен на рис. 2. Два канала интерферометра Фабри — Перо регистрируют близкие, но различа-

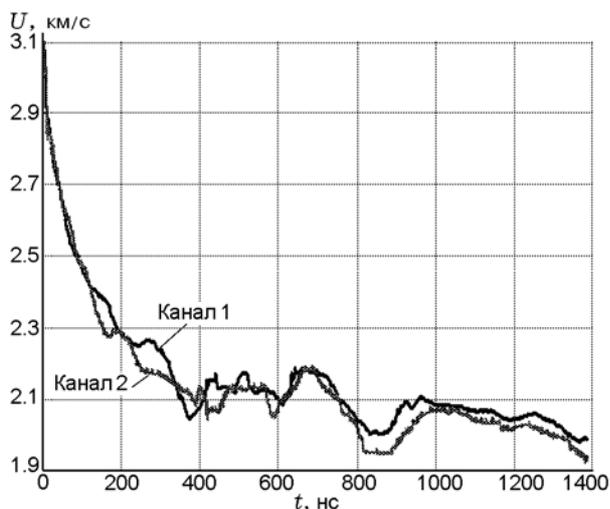


Рис. 2. Профиль  $U_{LiF}(t)$  для монокристалла октогена

ющиеся зависимости  $U_{LiF}(t)$  (разброс по скорости). Это связано с тем, что сигналы поступают (для передачи лазерного излучения используется оптоволокно) с двух участков исследуемой поверхности, центры которых отстоят друг от друга на расстояние  $\approx 1$  мм. В ряде опытов на профиле  $U_{LiF}(t)$  зарегистрированы пульсации (см. рис. 2). Их появление объясняется тем, что нагружение монокристаллов осуществлялось зарядом гетерогенного ВВ, из которого выходила детонационная волна с пульсациями. Пульсации на профилях  $U_{LiF}(t)$  могут приводить к занижению величины пика Неймана. Нами выбрана максимальная его величина из зарегистрированных в двух опытах. Параметры состояния в точке Чепмена — Жуге определялись по излому на профиле  $U_{LiF}(t)$ . Для каналов 1 и 2 с целью исключить влияние пульсаций использовались линейная и полиномиальная аппроксимации на участке крутого спада (область химпика) и на пологом участке профилей  $U_{LiF}(t)$  (тейлоровская волна разгрузки). Линейная аппроксимация зависимости  $U_{LiF}(t)$ , полученная по одному из каналов регистрации, представлена на рис. 3. В табл. 1 приведены параметры излома в зависимости от вида аппроксимации профиля скорости  $U_{LiF}(t)$ .

Результаты определения массовой скорости в точке излома и длительности зоны химических реакций по двум каналам регистрации с использованием двух аппроксимаций оказались близки:  $U_{LiF} = 2.16 \pm 0.01$  км/с,  $t = 265 \pm 15$  нс. В остальных опытах получены также близкие значения. Для определения па-

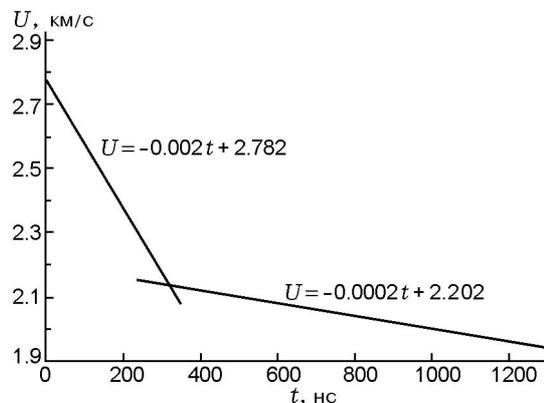


Рис. 3. Аппроксимация профиля скорости  $U_{LiF}(t)$  монокристалла октогена для определения параметров плоскости Чепмена — Жуге и зоны химической реакции

Таблица 1

Аппроксимация	Канал 1		Канал 2	
	$t$ , нс	$U$ , км/с	$t$ , нс	$U$ , км/с
Линейная	277	2.160	257	2.151
Полиномиальная	273	2.167	251	2.157

раметров пика Неймана в исходном ВВ использовалось соотношение, полученное нами методом последовательных приближений. Сначала для определения величины пика Неймана использовались адиабата и  $(D-U)$ -соотношение для непрореагировавшего состава РВХ 9404 [4]:  $D = 2.49 + 2.09U$ . Опускаясь из зарегистрированного в LiF состояния по данной адиабате на детонационный луч монокристалла октогена, определяем параметры пика Неймана в первом приближении. Теперь, имея данные для монокристалла октогена в области низких давлений [4] и измеренную нами величину пика Неймана в области высоких давлений, определяем  $(D-U)$ -соотношение и адиабату для монокристалла октогена. После этого из зарегистрированного в LiF состояния опускаемся на детонационный луч по данной адиабате и определяем  $(D-U)$ -соотношение во втором приближении. Для определения истинных величин пика Неймана адиабаты и  $(D-U)$ -соотношения достаточно трех последовательных приближений. В итоге искомое соотношение имеет вид:  $D = 1.8 + 2.09U$ .

Для определения состояния в точке Чепмена — Жуге использовались изоэнтропы продуктов взрыва пластифицированных составов

октогена 90/10 и 95/5 (10 и 5 % связки соответственно), обе изоэнтропы практически совпадают и на рис. 4 неразличимы.

Для монокристалла октогена ( $\rho = 1.904 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 9.1 \text{ км/с}$ ) определены следующие значения параметров детонации:

— пик Неймана:  $p = 60.9 \text{ ГПа}$ ,  $U = 3.51 \text{ км/с}$ ,

— состояние в точке Чепмена — Жуге  $p = 43 \text{ ГПа}$ ,  $U = 2.48 \text{ км/с}$ ,

— длительность и ширина зоны химических реакций 265 нс и 1.76 мм.

Таким образом длительность зоны химических реакций монокристалла октогена оказалась в три раза выше, чем в пластифицированном октогене 90/10 (95 нс).

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОНОКРИСТАЛЛАМИ ТЭНА

Было проведено 7 экспериментов с монокристаллами тэна двух типов: малыми — длиной 16 мм, шириной 10 мм, толщиной  $2 \div 6 \text{ мм}$ , и большими — 36 мм, 14 мм и  $6 \div 14 \text{ мм}$  соответственно. Монокристаллы тэна были прозрачными, полупрозрачными и непрозрачными (с микротрещинами внутри кристаллов). Различий в параметрах детонации в пределах погрешности метода для прозрачных, полупрозрачных и непрозрачных кристаллов не обнаружено.

Параметры пика Неймана и состояния в точке Чепмена — Жуге в монокристаллах тэна определялись по профилю  $U_{\text{LiF}}(t)$  так же, как в монокристаллах октогена. При этом для пика Неймана в исходном ВВ использовалось  $(D-U)$ -соотношение, зарегистрированное нами при  $p > 19 \text{ ГПа}$  (об этом речь пойдет ниже), а для состояния в точке Чепмена — Жуге — изоэнтропа продуктов взрыва состава ТГ 30/70 (рис. 5). Окончательно для монокристалла тэна в настоящей работе определены следующие значения параметров детонации:

— пик Неймана:  $p = 35.4 \text{ ГПа}$ ,  $U = 2.41 \text{ км/с}$ ,

— состояние в точке Чепмена — Жуге:  $p = 28 \text{ ГПа}$ ,  $U = 1.88 \text{ км/с}$ ,

— длительность и ширина зоны химических реакций 95 нс и 0.61 мм.

Результаты измерений параметров детонации для монокристаллов толщиной 2 и 9 мм представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что параметры стационарной детонационной волны сформировались на толщине монокристалла менее 2 мм и до толщины 9 мм не изменялись.

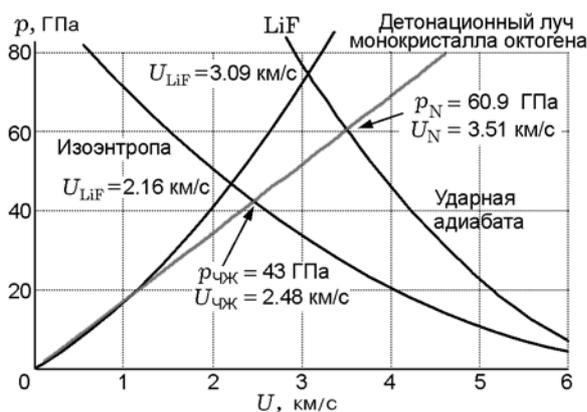


Рис. 4. Определение параметров пика Неймана и состояния в точке Чепмена — Жуге в монокристалле октогена

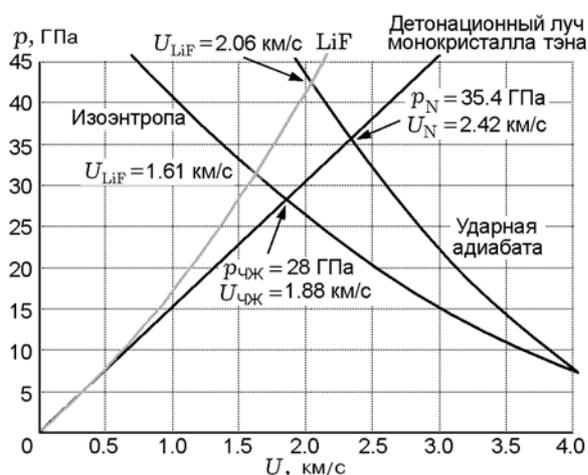


Рис. 5. Определение параметров пика Неймана и состояния в точке Чепмена — Жуге в монокристалле тэна

Превышение величины пика Неймана над параметрами состояния Чепмена — Жуге составило 1.26 раза. Длительность зоны химических реакций (95 нс) более чем в 20 раз превысила аналогичную величину для пластифицированного тэна (4 нс) [9, 10]. Отметим, что критический диаметр детонации монокристалла тэна (8 мм) также оказался выше критического диаметра для пластифицированного тэна (0.5 мм) более чем в 15 раз.

В работе [11] был обнаружен излом на  $(D-U)$ -зависимости для пластифицированного тэна при  $p \approx 4$  ГПа,  $U \approx 0.7$  км/с и два излома для монокристалла тэна — при  $p \approx 4.3$  ГПа,  $U \approx 0.64$  км/с и  $p = 11.6$  ГПа,  $U = 0.79$  км/с, которые были связаны в первом случае с началом, во втором случае — с началом и окончанием фазового перехода.

В настоящей работе для монокристалла тэна уточнены параметры: первого излома на  $(D-U)$ -зависимости —  $p = 4.74$  ГПа,  $U = 0.67$  км/с,  $D = 4.02$  км/с, второго излома —  $p = 19.64$  ГПа,  $U = 1.85$  км/с,  $D = 6$  км/с. На рис. 6 представлены данные из работы [4] (максимальное значение, точка  $B$  при  $p = 14.4$  ГПа,  $U = 1.5$  км/с), из работы [1] (максимальное значение, точка  $C$  при  $p = 19.1$  ГПа,  $U = 1.82$  км/с) и наши данные — пик Неймана (точка  $N$ ), которые соответствуют исходной адиабате непрореагировавшего ВВ. Известно, что тэн существует в двух модификациях: орторомбической ( $\alpha$ ) ( $\rho = 1.774$  г/см<sup>3</sup>) и метастабильной тетрагональной ( $\beta$ ) ( $\rho = 1.716$  г/см<sup>3</sup>) [12], поэтому два излома, по-видимому, являются началом и окончанием фазового перехода.

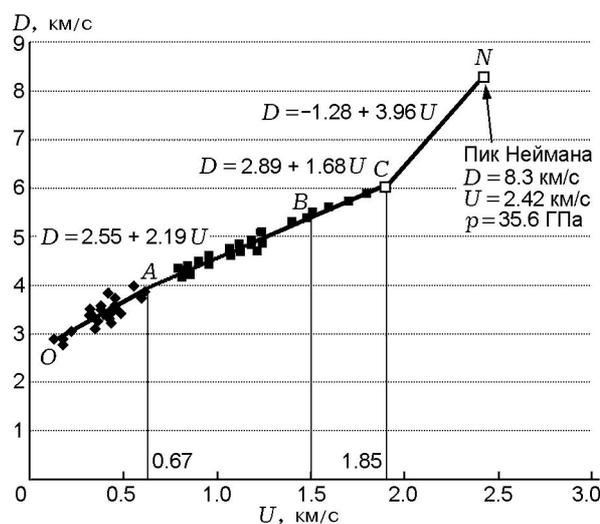


Рис. 6.  $(D-U)$ -зависимости для монокристалла тэна

Определены  $(D-U)$ -соотношения для монокристалла тэна на разных участках зависимости:  $D = 2.55 + 2.19U$ ,  $0 < U < 0.67$  км/с — область  $OA$  на рис. 6,  $D = 2.89 + 1.68U$ ,  $0.67 < U < 1.85$  км/с — область  $AC$ ,  $D = -1.28 + 3.96U$ ,  $1.85 < U < 2.42$  км/с — область  $CN$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В монокристаллах по сравнению с гетерогенными ВВ существенно увеличивается дли-

Таблица 2

Толщина монокристалла, мм	$p$ , ГПа		Длительность химической реакции, нс
	пик Неймана	состояние в точке Чепмена — Жуге	
2	35.6	27.7	$90 \pm 15$
9	35.4	28	$95 \pm 10$

тельность зоны химических реакций. Это связано с тем, что в монокристаллах нет пор и «горячих точек» во много раз меньше, чем в гетерогенных ВВ. «Горячими точками» в монокристаллах ВВ являются полосы локализованного сдвига. В работе [1] высокую чувствительность монокристаллов тэна в ориентации (110) при  $p \approx 4$  ГПа авторы связывают с пластическими деформациями и разрывом молекулярных связей из-за движения краевых дислокаций в полосах локализованного адиабатического сдвига.

Зарегистрирована зависимость величины пика Неймана от кристаллографического направления. Ранее нами были определены [9] величины пика Неймана ( $p = 49 \pm 1$  ГПа) для прессованного ( $\rho = 1.88$  г/см<sup>3</sup>), агатированного ( $\rho = 1.89$  г/см<sup>3</sup>) и пластифицированного октогена ( $\rho = 1.86$  г/см<sup>3</sup>) и состояние в точке Чепмена — Жуге ( $p = 39$  ГПа) для пластифицированного октогена 90/10. Величина пика Неймана оказалась в 1.26 раза выше. Для монокристаллов октогена при увеличении давления детонации на 10 % (43 ГПа) по сравнению с пластифицированными составами октогена (39 ГПа) величина пика Неймана значительно возрастает — в 1.42 раза относительно состояния Чепмена — Жуге, в то время как для большинства ВВ увеличение обычно составляет  $1.3 \pm 0.05$ . По-нашему мнению, это обусловлено тем, что нагружение монокристалла октогена проводилось по чувствительной кристаллографической ориентации (111); при нагружении вдоль других, менее чувствительных кристаллографических направлений величины пика Неймана могут быть другими. По крайней мере, в монокристалле тэна при нагружении вдоль малочувствительного направления (100) пик Неймана ( $p = 35.4$  ГПа) вырос по сравнению с пластифицированным тэном ( $p = 34.5$  ГПа) незначительно (на 2.6 %), в то время как давление детонации возросло на 20 % (с 23.4 до 28 ГПа). В гетерогенных ВВ, где кристаллы располагаются во всех возможных кристаллографических направлениях, зависимость от кристаллографической ориентации отсутствует.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы параметры детонации монокристаллов тэна и октогена. Для монокристалла тэна определены величина пика Неймана —  $p = 35.4$  ГПа,  $U = 2.41$  км/с,

параметры состояния в точке Чепмена — Жуге —  $p = 28$  ГПа,  $U = 1.88$  км/с, ширина и длительность зоны химических реакций —  $\Delta x = 0.61$  мм,  $\Delta t = 95$  нс.

Для монокристалла тэна обнаружены два излома на ( $D-U$ )-зависимости, которые, по-видимому, являются началом ( $p = 4.74$  ГПа,  $U = 0.67$  км/с,  $D = 4.02$  км/с) и окончанием ( $p = 19.64$  ГПа,  $U = 1.85$  км/с,  $D = 6.0$  км/с) фазового перехода  $\alpha \rightarrow \beta$ .

Для монокристалла октогена определены величина пика Неймана —  $p = 60.9$  ГПа,  $U = 3.51$  км/с, параметры состояния в точке Чепмена — Жуге —  $p = 43$  ГПа,  $U = 2.48$  ГПа, ширина и длительность зоны химических реакций —  $\Delta x = 1.76$  мм,  $\Delta t = 265$  нс.

Выявлена зависимость величины пика Неймана от кристаллографического направления: в более чувствительном направлении она существенно выше, чем в менее чувствительном.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dick J. J., Mulford R. N., Spencer W. J., Pettit D. R., Garcia E., Shaw D. C. Shock response of pentanitrate single crystals // J. Appl. Phys. — 1991. — V. 70, N 7. — P. 3572.
2. Dick J. J., Ritchie J. P. Molecular mechanics modeling of shear and the crystal orientation dependence of the elastic precursor shock strength in PETN // J. Appl. Phys. — 1994. — V. 76, N 5. — P. 2726.
3. Dick J. J., Yoo C. S., Holmes N. C., Soures P. C., Wu C. J., Ree F. H. Anomalous shock initiation of detonation in PETN crystals // J. Appl. Phys. — 1997. — V. 81, N 2. — P. 601.
4. LASL Explosive Property Data / T. R. Gibbs, A. Popolato (Eds). — Berkeley: University of California, 1980.
5. Dobratz V. M. LLNL Explosives Handbook. — Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. — March 1981.
6. LASL Shock Hugoniot Data / S. P. Marsh. — Berkeley, 1980.
7. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. — М.: Мир, 1985.
8. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. I.
9. Фёдоров А. В. Параметры пика Неймана и структура фронта детонационной волны конденсированных ВВ // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 10. — С. 13–22.
10. Фёдоров А. В., Меньших А. В., Ягодин Н. Б. Структура детонационного фронта в гетерогенных ВВ // Хим. физика. — 1999. — Т. 18, № 11. — С. 64.

11. **Кузьмицкий И. В., Гатилов Л. А.** Уравнение состояния для пластифицированного тэна с учетом фазового перехода на основе американских данных и опытов ИФВ // Междунар. конф. по ударным волнам в конденсированном веществе / под ред. В. Ю. Клименко, М. А. Хусаинова. — Санкт-Петербург; Новгород, 2010. — С. 161–165.
12. **Foltz M. F.** Pressure dependence on the reaction propagation rate of PENT at high pressure // Proc. Tenth Intern. Detonation Symp., July 12–16 1993. — Arlington: Office of Naval Res., 1993. — P. 579–585.

*Поступила в редакцию 6/VII 2010 г.*

---