

## ПРЕДЕЛЬНАЯ СТОЙКОСТЬ ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

В. К. Голубев, В. А. Медведкин, А. П. Погорелов, В. И. Скоков

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты исследования воздействия ударно-волнового нагружения на образцы взрывчатого состава ОТК-90. Определены предельные уровни нагружения, приводящие к начальной стадии взрывчатого превращения при нагружении образцов ударом стальных пластин различной толщины. На основании этих результатов исследована предельная стойкость образцов состава при их нагружении скользящей детонацией пластического взрывчатого вещества ТП-83 через слой пенополиуретана, а также скользящей и нормальной детонацией низкоплотного взрывчатого вещества НИЛ-1. Границы перехода от чисто механического разрушения взрывчатого состава ОТК-90 к механохимической реакции достаточно хорошо согласуются для различных используемых методов ударно-волнового нагружения.

Одной из важных проблем конверсии вооружений является задача разборки и утилизации разнообразных боеприпасов, в том числе и ядерных. Для разрушения прочных клеевых соединений и некоторых элементов конструкции, а также дробления крупногабаритных зарядов взрывчатого вещества (ВВ), извлекаемых из боеприпасов для их последующего использования, потребовались методы достаточно интенсивного импульсного нагружения, реализовать которые можно лишь путем использования энергии взрыва. Однако наличие ВВ в составе боеприпаса ограничивает интенсивность такого рода нагружения. Необходимость импульсного воздействия на криволинейные поверхности достаточно большой площади либо протяженности также накладывает ограничения на выбор возможных методов. В данной работе вопрос определения предельных условий интенсивного импульсного нагружения ВВ рассмотрен применительно к одному из мощных взрывчатых составов на основе октогена — ОТК-90.

Образцы ОТК-90, содержащего 90 % (по массе) октогена и 10 % тротилколлоксилинового связующего, изготавливали методом горячего прессования в виде дисков диаметром  $d = 60 \div 120$  мм и толщиной  $h = 20 \div 70$  мм. Ударно-волновое нагружение образцов осуществляли различными методами. Для определения начальной стадии взрывчатого превращения состава в качестве базисного использовали метод нагружения ударом стальных пластин [1] толщиной 1, 1,6 и 3,0 мм. Но бо-

лее перспективны способы нагружения образцов скользящей детонацией слоев различных ВВ, удовлетворяющие требованиям поставленной технической задачи. В первом случае использовали низкоплотное листовое ВВ НИЛ-1, представляющее собой листы пенополиуретана толщиной 10 мм с порами, заполненными высокодисперсным порошком тэна. Плотность заполнения составляла  $\rho_{00} = 0,20 \div 0,29$  г/см<sup>3</sup>. Лист накладывали непосредственно на плоскую поверхность образца и инициировали в удаленной точке для создания приблизительно линейного фронта нагружающей детонационной волны. Во втором случае использовали пластическое ВВ ТП-83, содержащее не менее 83 % тэна и до 17 % полиизобутилена. Образцы нагружали через слой пенополиуретана толщиной 5 мм. Для создания линейного фронта детонации применяли линейный распределитель из перфорированного пластического ВВ. В качестве дополнительного метода, представляющего самостоятельный интерес, использовали нагружение образца нормальной детонацией заряда, состоящего из двух слоев ВВ НИЛ-1.

Условия нагружения регистрировали манганиновыми датчиками давления. Регистрация давления на границе пенополиуретана и образца при нагружении скользящей детонацией слоя ТП-83 осуществлялась линейными датчиками длиной 20 мм с сопротивлением 5,5 Ом, которые устанавливали по возможности параллельно фронту нагружающей детонационной волны. Давление на границе заряда НИЛ-1 и образца при нагружении нормальной детона-

Таблица 1

Материал	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$n$	$\gamma$	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$Y$ , МПа	$\nu$
Сталь	7,85	4,63	4,21	1,70	—	750	0,28
ОТК-90	1,86	2,74	7,12	1,20	—	40	0,32
Полиуретан	1,26	2,49	4,99	1,00	0,04	—	—

Таблица 2

ВВ	$\rho_e$ , г/см <sup>3</sup>	$D_e$ , км/с	$p_e$ , ГПа	$A$ , ГПа/(г/см <sup>3</sup> ) <sup>k</sup>	$k$	$B$ , ГПа	$m$ , г/см <sup>3</sup>
ТП-83	1,525	7,785	25,64	1,556	1,6	355,4	6,024
НИЛ-1 (тэн)	0,29	3,39	1,08	6,33	2,09	—	—

цией регистрировалось датчиками с размерами чувствительного элемента  $4 \times 4$  мм и сопротивлением 16 Ом. Толщина датчиков с изоляцией не превышала 0,15 мм, со стороны нагружения они дополнительно закрывались пленкой из фторопласта-4 толщиной 0,1 мм в первом случае и 0,2 мм — во втором.

Расчетный анализ условий нагружения проводили с использованием программы численного расчета одномерных упругопластических течений [2]. Основное внимание уделяли определению условий нагружения образцов, т. е. изменению давления на их поверхности в зависимости от времени. Кроме того, рассматривали и распространение нагружающих ударно-волновых импульсов в объеме образцов и их отражение от свободных тыльных поверхностей, приводящее к множественному откольному разрушению. В выполненных расчетах для исследуемого состава ОТК-90 и материала ударника — низкоуглеродистой стали Ст3 — применяли уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена с предельной плотностью [3]:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right] + \gamma \rho E.$$

Здесь  $\rho$  — плотность материала,  $\rho_0$  — ее начальное значение,  $p$  — давление,  $E$  — удельная тепловая энергия,  $c_0$  — объемная скорость звука,  $\gamma$  — параметр Грюнайзена. Параметр  $n$  подбирали на основе данных по ударно-волновой сжимаемости материалов в области относительно низких давлений. Упругопластические свойства учитывали заданием динамического предела текучести  $Y$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ . Подобного типа уравнение состояния для пористого полиуретана (поролон) с плотностью  $\rho_{00}$  подбирали на основании данных по ударно-волновой сжимаемости [4]. Па-

раметры уравнения состояния для всех указанных материалов приведены в табл. 1.

Для продуктов детонации (ПД) пластического ВВ ТП-83 в расчетах применяли уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена следующего вида:

$$p - p_s(\rho) = \gamma \rho (E - E_s(\rho)).$$

Здесь в качестве опорной кривой задавалась изоэнтропа расширения ПД в форме Зубарева [5]

$$p_s = A \rho^k + B e^{-m/\rho},$$

а взаимосвязь удельной внутренней энергии и давления на этой изоэнтропе определялась с помощью термодинамического соотношения

$$p_s = \rho^2 \frac{dE_s}{d\rho}.$$

Параметры детонационной волны и уравнения состояния продуктов детонации ВВ ТП-83, определенные авторами [6], приведены в табл. 2, где  $\rho_e$  — начальная плотность ВВ,  $D_e$  — скорость детонации,  $p_e$  — давление в детонационной волне. Изоэнтропу расширения продуктов детонации ВВ НИЛ-1 принимали в виде

$$p_s = A \rho^k. \quad (1)$$

Значения  $k$  подбирали на основе полученных экспериментальных данных по регистрации давления на границе заряда НИЛ-1 и образца состава ОТК-90. Ориентировочные параметры детонационной волны и приближенного уравнения состояния продуктов детонации ВВ НИЛ-1 с плотностью заполнения тэном 0,29 г/см<sup>3</sup> также приведены в табл. 2. Коэффициент  $A$  в данном случае определяли по формуле

$$A = \frac{D_e^2 k^k}{\rho_e^{k-1} (k+1)^{k+1}}.$$

Таблица 3

$h_p$ , мм	$d \times h$ , мм	$w_p$ , м/с	$p_0$ , ГПа	Результат опыта
1,0	120 × 70	355	1,93	Разрушение
	90 × 40	380	2,08	— // —
	120 × 70	400	2,20	Начало взрывчатого превращения
	90 × 40	420	2,32	— // —
1,6	90 × 20	260	1,37	Разрушение
	90 × 40	292	1,56	— // —
	90 × 40	343	1,86	Начало взрывчатого превращения
	90 × 40	364	1,99	— // —
3,0	120 × 70	180	0,90	Разрушение
	120 × 40	208	1,06	— // —
	120 × 70	233	1,21	Начало взрывчатого превращения
	120 × 70	260	1,37	— // —

Результаты, полученные при нагружении образцов ударом стальных пластин, представлены в табл. 3. Здесь  $w_p$  — скорость пластины-ударника, разгоняемой скользящей детонацией слоя пластического ВВ ТП-83;  $p_0$  — начальное давление на нагружаемой поверхности образца, действующее в течение времени  $\tau = 2h_p/c_l$ , где  $h_p$  — толщина пластины-ударника,  $c_l$  — продольная скорость звука (для низкоуглеродистой стали  $c_l = 5,94$  км/с [4]). Результаты экспериментов условно разделяли на две группы (см. таблицу). В первом случае образец разрушался на большое число хорошо сохранившихся мелких фрагментов. Во втором случае в результате начавшегося взрывчатого превращения частично разрушалось устройство для крепления образцов, а оставшаяся часть фрагментов разбрасывалась на значительные расстояния и в некоторых случаях происходило их возгорание. В этих экспериментах, характеризуемых относительно низкоинтенсивными условиями нагружения, выход на нормальный детонационный режим не был зарегистрирован. Полученные таким образом результаты приведены на рис. 1. В качестве предельной стойкости состава считали границу перехода от чисто механической реакции состава на ударно-волновое нагружение к механохимической реакции, обусловленной началом взрывного экзотермического разложения ВВ. Ориентировочное расположение этой границы показано сплошной линией на рис. 1. В используемых координатах и единицах измерения она может быть представлена в виде

$$p_0 = 3,12 - 3,35\tau + 1,37\tau^2.$$

Предельную стойкость состава ОТК-90 при нагружении скользящей детонацией слоя

пластического ВВ через слой пенополиуретана определяли на образцах размерами  $\varnothing 60 \times 20$  мм. Толщины слоев ВВ ТП-83 составляли 0,9, 1,2 и 1,5 мм. В двух первых случаях наблюдалось только механическое разрушение образцов, а в последнем случае отмечено начало взрывчатого превращения. В следующем опыте образец размерами  $\varnothing 90 \times 20$  мм нагружали таким образом, что детонационная волна переходила из слоя толщиной 1,2 мм в слой толщиной 1,5 мм. Под каждым из слоев на границе пенополиуретана и образца устанавливали линейный манганиновый датчик, расположенный параллельно фронту детонационной волны. Расстояние между датчиками 25 мм, причем 10 мм из них приходилось на слой толщиной 1,5 мм. С помощью этих датчиков регистрировали нагружающие импульсы давления на поверхности об-

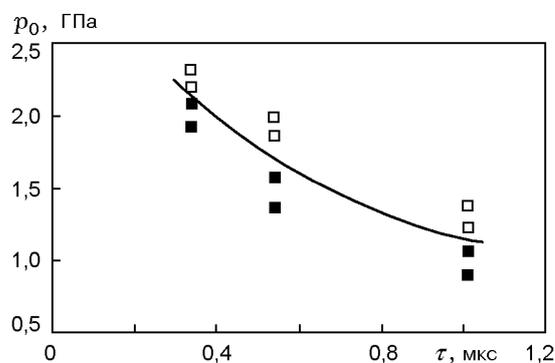


Рис. 1. Влияние характерного времени нагружения на предельную стойкость взрывчатого состава ОТК-90 при нагружении образцов ударом стальных пластин:

темные значки — разрушение образцов без признаков взрывчатого превращения; светлые — начало взрывчатого превращения

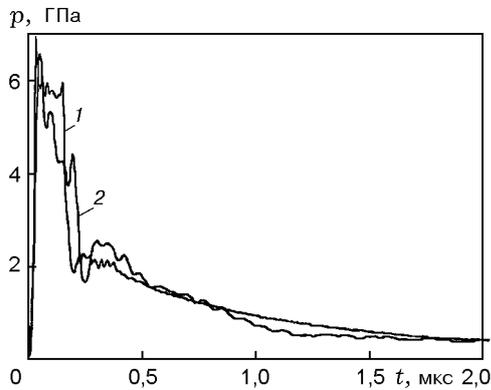


Рис. 2. Расчетное давление на границе пенополиуретан — образец при нагружении взрывом слоя ТП-83 толщиной 1,2 мм через слой пенополиуретана толщиной 5 мм в режиме мгновенной (1) и нормальной (2) детонации

разца, а также фиксировали время выхода на нагружаемую более толстым слоем ВВ поверхность образца волны взрывчатого превращения. Через 5,4 мкс после прихода нагружающего импульса на второй датчик давление на нем стало нарастать, и он претерпел разрушение.

Расчеты условий нагружения образцов проводили в одномерной постановке. В качестве предельных по отношению к режиму скользящей детонации рассматривали случаи мгновенной и нормальной детонации слоя ВВ. Результаты расчетов показаны на рис. 2, откуда следует, что режим детонации не оказывает существенного влияния на характер нагружения образца через слой пенополиуретана. Однако расчеты показывают также и образование кратковременного ( $\approx 0,2$  мкс), но весьма интенсивного пика давления на начальной стадии нагружения. На рис. 3 условия нагружения, соответствующие возбуждению начальной стадии взрывчатого превращения, сопоставляются с критическими условиями нагружения образца ударом стальной пластины толщиной 1,0 мм. Экспериментальные данные, представленные также на рис. 3, существенно отличаются от расчетных на начальной стадии нагружения. С одной стороны, расчет с использованием уравнения состояния пористой жидкости [3] несколько завышает амплитуду наблюдаемого пика давления. Однако основная причина расхождения заключается в «срезании» начальной формы импульса при регистрации весьма протяженным (20 мм) линейным датчи-

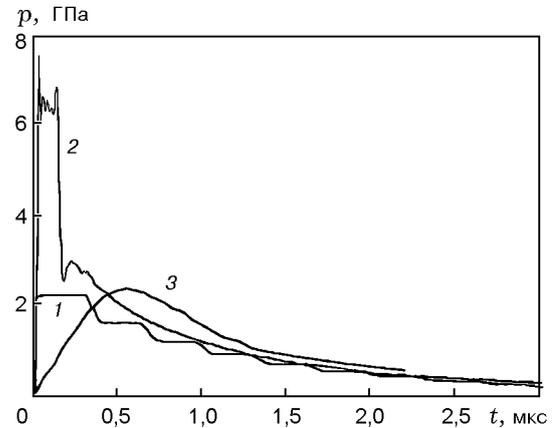


Рис. 3. Давление на нагружаемой поверхности образца, при котором отмечена начальная стадия его взрывчатого превращения:

1 — удар стальной пластины толщиной  $h_p = 1,0$  мм со скоростью  $w_p = 400$  м/с, расчет; 2, 3 — взрыв слоя ТП-83 толщиной 1,5 мм через слой пенополиуретана толщиной 5 мм, расчет и эксперимент соответственно

ком кривой ударной волны, поскольку практически исключено создание таких условий, когда фронт волны в таком неоднородном материале, как пенополиуретан, одновременно подойдет к датчику по всей его длине.

Стойкость состава ОТК-90 при нагружении скользящей детонацией слоя листового ВВ НИЛ-1 определяли на образцах размерами  $\varnothing 90 \times 20$  мм. Использовали листы ВВ с плотностью наполнения тэном 0,21 и 0,29 г/см<sup>3</sup>. В обоих случаях реакция образцов на нагружение была чисто механической, т. е. они разрушались без проявления каких-либо признаков начинающегося взрывчатого превращения. Образец такого же размера нагружали нормальной детонацией заряда НИЛ-1 толщиной 20 мм, состоящего из двух слоев ВВ с плотностью наполнения тэном 0,29 г/см<sup>3</sup>. Для создания по возможности плоского фронта детонационной волны использовали распределитель в форме конуса, выполненный из состава НИЛ-1 с меньшей плотностью наполнения (0,15 г/см<sup>3</sup>). В этом опыте как визуально (по степени разрушения устройства для крепления образцов), так и по показаниям датчика давления отмечено возбуждение взрывчатого превращения в образце. Экспериментально зарегистрированный профиль давления показан на рис. 4. Здесь же приведены расчетные профили давления в инертных образцах при ударе по ним стальными пластинами.

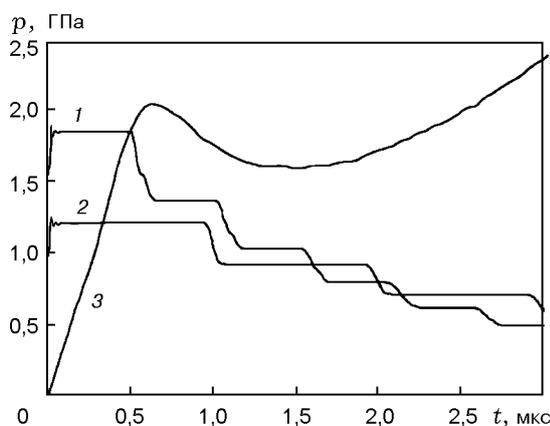


Рис. 4. Давление на нагружаемой поверхности образца, при котором отмечена начальная стадия его взрывчатого превращения:

1, 2 — удар стальными пластинами с  $h_p = 1,6$  мм,  $w_p = 343$  м/с и  $h_p = 3,0$  мм,  $w_p = 233$  м/с соответственно, расчет; 3 — нормальная детонация заряда НИЛ-1 толщиной 20 мм с плотностью наполнения тэном  $0,29$  г/мм<sup>3</sup>, эксперимент

Полученное значение начального давления на поверхности образца при выходе детонационной волны из заряда НИЛ-1 ( $p_0 = 2,06$  ГПа) позволило определить параметр  $k$  для уравнения изоэнтропы расширения ПД вида (1). В результате совместного решения уравнений для изоэнтропы расширения ПД и ударной адиабаты материала образца

$$p = \frac{\rho_e D_e^2}{k+1} \left[ 1 - \frac{k-1}{2k} \left( \frac{(k+1)u}{D_e} - 1 \right) \right]^{2k/(k-1)},$$

$$p = \rho_0 (c_0 + \lambda u) u$$

( $u$  — массовая скорость) получено значение  $k = 2,09$ . Естественно, что это значение соответствует лишь плотности наполнения тэном  $0,29$  г/см<sup>3</sup>. При снижении плотности наполнения значение параметра  $k$  также должно уменьшаться.

С использованием полученного значения  $k$  и подхода, описанного в [5], было определено начальное давление на поверхности образца ОТК-90 при его нагружении скользящей детонацией слоя ВВ НИЛ-1 с указанной плотностью наполнения. В результате совместного решения уравнений для давления и угла поворота течения ( $\theta$ ) в сверхзвуковом потоке продуктов детонации

$$p = \frac{\rho_e D_e^2}{k+1} \left[ \frac{k+1}{2((k-1)M^2/2+1)} \right]^{(k-1)/k},$$

$$\theta = \arcsin \frac{1}{M} +$$

$$+ \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(M^2-1)(k-1)}{k+1}} - \frac{\pi}{2}$$

( $M$  — число Маха) и уравнения для граничного условия на границе раздела ПД — образец

$$p = \rho_0 (c_0 + \lambda D_e \sin \theta) D_e \sin \theta$$

получено, что на границе раздела  $p_0 = 0,83$  ГПа. В соответствии с данными [5] темп спада давления на поверхности образца в этом случае близок к таковому при ударе стальной пластиной толщиной 3,0 мм, показанному на рис. 4.

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов относительно применимости взрывных методов интенсивного импульсного нагружения для целенаправленного разрушения зарядов мощных ВВ, входящих в состав боеприпасов. Совершенно правомерно, что в качестве базисного (контрольного) выбран метод нагружения образцов ВВ металлическими пластинами различной толщины, отработанный в [1]. Он позволяет достаточно просто определить границу стойкости ВВ к ударно-волновому нагружению, принимая во внимание две основные характеристики интенсивного импульсного воздействия: начальное давление на поверхности образца и темп его спада в процессе нагружения. Выбор взрывных методов должен проводиться на основе условий согласования реализуемых режимов нагружения с базисным по этим основным характеристикам.

Что касается рассмотренного в работе случая нагружения образцов взрывчатого состава ОТК-90, отметим следующее. Применение в качестве метода нагружения скользящей детонации низкоплотного листового ВВ НИЛ-1 толщиной 10 мм с плотностью заполнения тэном до  $0,29$  г/см<sup>3</sup> с достаточной степенью надежности гарантирует ударно-волновое разрушение взрывчатого состава без перехода в режим неконтролируемого взрывчатого превращения. Это подтверждает сопоставление данных соответствующих экспериментов с результатами, полученными при нагружении образцов ударом стальных пластин. При отработке метода нагружения скользящей детонацией слоя пластического ВВ ТП-83 через слой пенополиуретана также достаточно надежно

определена граница стойкости рассматриваемого взрывчатого состава к ударно-волновому нагружению. Полученные экспериментальные данные подтверждают и результаты проведенных расчетов условий нагружения. Однако, принимая во внимание выявленную в расчете возможность образования кратковременного, но весьма интенсивного пика давления на начальной стадии нагружения, обусловленного уплотнением пенополиуретана, следует проявлять осторожность при варьировании схем нагружения. Так, например, при сохранении подобия в системе ВВ — пенополиуретан увеличение толщины слоя пенополиуретана до 10 мм приводит к увеличению расчетной длительности этого пика до 0,4 мкс, что уже чревато переходом в режим взрывчатого превращения. В целом же полученные результаты указывают на достаточно высокую эффективность и надежность рассмотренных методов скользящей детонации при нагружении систем, критических по чувствительности к импульсному воздействию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Погорелов А. П., Глушак Б. Л., Новиков С. А., Синицин В. А. Исследование зависимости давления инициирования состава ТГ 50/50 от длительности действия импульса при ударе тонкими стальными пластинами // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 2. С. 294–296.
2. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. Н., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3(11). С. 11–21.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
4. Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 299–427.
5. Голубев В. К., Крысанов Ю. А., Новиков С. А., Рябикин А. И. О механическом нагружении преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 4. С. 94–99.
6. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 114–126.

*Поступила в редакцию 7/IV 1999 г.,  
в окончательном варианте — 20/VIII 1999 г.*