

О влиянии условий нагружения и исходного состояния на откольное разрушение мощного взрывчатого вещества на основе октогена

В. К. Голубев, А. П. Погорелов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

Представлены результаты исследования откольного разрушения взрывчатого состава ОТК-90 при ударном нагружении. Образцы толщиной 20...105 мм нагружали ударом стальных пластин толщиной 1,0 и 1,6 мм, разгоняемых взрывом до скоростей 135...380 м/с. Численный расчет условий нагружения и откольного разрушения образцов выполняли в упругопластической постановке. В результате анализа полученных данных построено простое эмпирическое соотношение, связывающее максимальное растягивающее напряжение в плоскости откола с градиентом напряжения в растягивающем импульсе и максимальным напряжением в нагружающей ударной волне. Показано, что нормализация образцов приводит к определенному снижению значений разрушающей нагрузки.

Обозначения

t	– время
h_p	– толщина пластины-ударника
h_t	– толщина образца
h_s	– толщина откольного слоя
w_p	– скорость пластины-ударника
N	– число опытов
ρ	– плотность
ρ_0	– начальное значение плотности
σ	– продольное напряжение
σ_t	– максимальное растягивающее напряжение в плоскости откола
$\sigma_{t \min}, \sigma_{t \max}$	– минимальное и максимальные значения σ_t
σ_{mid}	– среднее значение σ_t
σ_c	– максимальное напряжение в ударной волне
$\Delta\sigma / \Delta x$	– градиент напряжения в растягивающем импульсе
P	– давление
E_t	– удельная тепловая энергия
c_0	– объемная скорость звука
γ	– параметр Грюнайзена
n	– показатель степени для кривой холодного сжатия
Y	– динамический предел текучести в условиях одномерного напряженного состояния

ν	– коэффициент Пуассона
R	– коэффициент корреляции
s	– стандартное отклонение
F	– F -отношение
a, b, c	– коэффициенты линейной множественной регрессии
s_a, s_b, s_c	– стандартные отклонения коэффициентов a, b, c

Число публикаций, посвященных исследованиям откольного разрушения взрывчатых составов, довольно ограничено. В работах [1, 2] для двух составов на основе октогена при нагружении образцов ударом плексигласовых пластин были определены диапазоны нагрузок от зарождения повреждений до полного макроскопического откольного разрушения образцов. В работе [3] изучалось влияние температуры нагрева на откольное разрушение при ударном нагружении четырех взрывчатых составов на основе гексо- и октогена. Установлено, что нагрев до температуры 150°C не приводил к снижению сопротивления составов макроскопическому откольному разрушению, а для одного из составов на основе гексогена при этой максимальной температуре даже наблюдалось его увеличение. В данной статье поставлена задача выяснить, в какой степени могут влиять на сопротивление откольному разрушению конкретного взрывчатого состава на основе октогена условия его ударно-волнового нагружения, которые могут варьироваться путем изменения скорости удара и толщины образца, и его исходное состояние, обусловленное используемой технологией прессования и последующей термической обработкой.

Образцы для ударных испытаний в форме дисков диаметром 120 мм и толщиной h_t изготавливали из состава ОТК-90 методом горячего прессования. Этот состав на основе октогена содержит в качестве пластификатора 7 мас.% тротила и в качестве связующего 3 мас.% коллоксилина. Часть образцов подвергали нормализации–выдержке в течение 30 сут. при повышенной температуре. Ударно-волновое нагружение образцов осуществляли ударом стальных пластин толщиной h_p , разгоняемых до необходимой скорости w_p с помощью скользящей детонации слоя пластического взрывчатого вещества (ВВ) ТП-83. Подобная система нагружения использовалась ранее при изучении чувствительности взрывчатых составов к удару и более подробно описана в работе [4]. Опыты проводили с полным сохранением всех фрагментов нагруженных образцов. Визуально наблюдали и анализировали характер и степень разрушения образцов, определяли среднюю толщину фрагментов первого откольного слоя h_s . С целью более точного и полного их выявления на тыльную поверхность образцов наносили тонкий слой яркого красителя.

Условия ударно-волнового нагружения и откольного разрушения образцов анализировали с помощью программы численного расчета одномерных упругопластических течений [5]. Основное внимание уделяли лагранжевым координатам, соответствующим местам образования макроскопического откольного разрушения. На этих координатах, а также на ряде близлежащих к ним, выводили полные диаграммы действующего в процессе нагружения–

разгрузки продольного напряжения σ . Плотность ячеек расчетной сетки в примыкающей к тыльной поверхности зоне образца толщиной 5 мм и в зоне стального ударника устанавливали на уровне 50 мм^{-1} , а в остальном объеме ВВ снижали до 20 мм^{-1} . В выполненных расчетах для исследуемого состава, а также для материала ударника – низкоуглеродистой стали Ст.3 – использовали уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена:

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

Здесь ρ – плотность материала (ρ_0 – начальное значение); P – давление; E_t – удельная тепловая энергия; c_0 – объемная скорость звука; γ – параметр Грюнайзена. Параметр n подбирали с использованием данных по ударно-волновой сжимаемости материалов в области относительно низких давлений. Упругопластические свойства учитывали путем задания динамического предела текучести Y и коэффициента Пуассона ν .

Значение Y оценивали на основании сопоставления результатов расчета распространения нагружающего ударного импульса и его регистрации манганиновым датчиком давления. Полученное значение хорошо согласуется со значением, приведенным в работе [1] для близкого по свойствам состава. На рис. 1 показаны результаты расчета распространения нагружающего импульса с использованием значения $Y = 40 \text{ МПа}$. В этом случае достигалось наиболее приемлемое согласование экспериментальных и расчетных данных. Подобранные для последующих расчетов параметры уравнения состояния и упругопластические свойства материалов ударника и образца приведены в табл. 1.

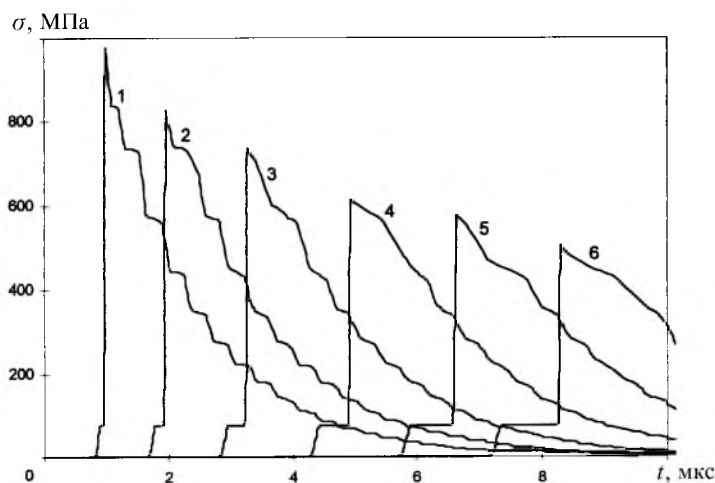


Рис. 1. Характер распространения нагружающего импульса в образце взрывчатого состава при ударе стальной пластиной толщиной 1 мм со скоростью 190 м/с: диаграммы напряжения 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют сечениям, расположенным на расстояниях 3, 6, 10, 15, 20 и 25 мм от поверхности удара.

Т а б л и ц а 1

Используемые в расчетах параметры уравнения состояния материалов

Материал	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$c_0, \text{км/с}$	n	γ	$Y, \text{МПа}$	ν
Сталь	7,85	4,63	4,21	1,70	750	0,28
ОТК-90	1,89	2,74	7,13	1,20	40	0,32

Т а б л и ц а 2

Результаты проведенных опытов и расчетов условий разрушения

Исходное состояние	$h_p, \text{мм}$	$h_t, \text{мм}$	$w_p, \text{м/с}$	$h_s, \text{мм}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$\sigma_t, \text{МПа}$	$\Delta\sigma / \Delta x, \text{МПа}$	
Поставка	1,0	20	135	2,2	678	142	65	
			180	1,8	921	183	102	
			200	1,7	1032	197	116	
			275	1,3	1463	235	181	
			300	1,2	1610	235	196	
			350	1,0	1913	201	201	
			40	270	2,0	1434	178	89
	330	1,5	1792	166	111			
	380	1,1	2100	131	119			
	70	300	2,0	1610	117	59		
	1,6	105	274	2,3	1458	91	40	
	333	1,6	1812	77	48			
	Нормализация	1,0	20	139	2,0	700	137	68
				160	1,6	812	144	90
194				1,2	998	146	122	
216				1,05	1124	148	141	
232				1,0	1216	158	158	
275				0,85	1463	145	171	
300				0,7	1610	147	210	

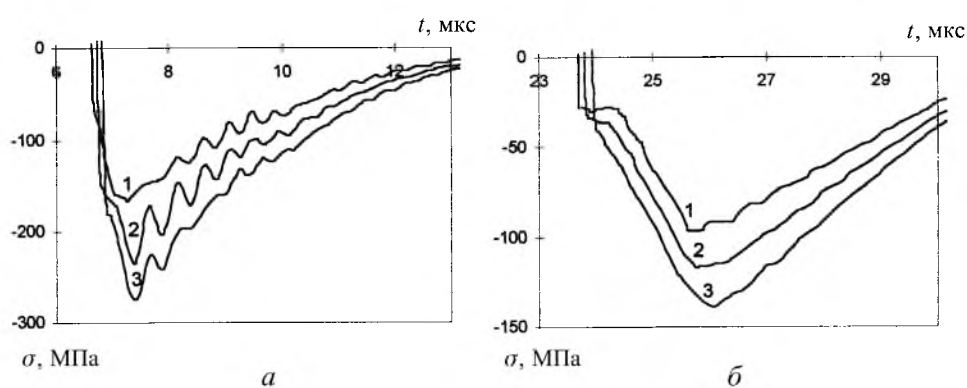


Рис. 2. Диаграммы растягивающего напряжения в образцах толщиной 20 (а) и 70 мм (б) при ударе пластиной толщиной 1 мм со скоростью 300 м/с: диаграммы напряжения 1, 2, 3 соответствуют сечениям, расположенным на расстояниях 0,9; 1,2 и 1,5 мм (а) и 1,6; 2,0 и 2,4 мм (б) от тыльной поверхности.

Результаты проведенных опытов и расчетов по определению условий откольного разрушения образцов состава ОТК-90 представлены в табл. 2, где σ_t – максимальное растягивающее напряжение на координате откола; σ_c – максимальное продольное напряжение в образце у поверхности удара; $\Delta\sigma / \Delta x$ – градиент давления в растягивающем импульсе. Предполагалось, что условная величина разрушающей нагрузки (σ_t) может быть в какой-то степени взаимосвязана с параметрами, характеризующими интенсивность и скорость ударно-волнового нагружения ($\sigma_c, \Delta\sigma / \Delta x$). Действительно, уже поверхностное рассмотрение результатов проведенных опытов позволяет отметить определенный рост значений σ_t при увеличении $\Delta\sigma / \Delta x$ и несколько более сложную тенденцию влияния σ_c . На рис. 2 для примера показаны диаграммы растягивающего напряжения в образцах толщиной 20 и 70 мм, нагруженных ударом с одинаковой скоростью 300 м/с. Отмеченная на рис. 2,а волнистость, проявляющаяся для минимальной толщины образца и максимальных скоростей удара, обусловлена ступенчатостью нагружающего импульса, которую можно наблюдать на рис. 1. Использование в расчете более совершенной упруговязкопластической модели среды должно привести к определенному сглаживанию подобных осцилляций.

В дополнительном опыте образец в состоянии поставки толщиной 105 мм нагружали ударом стальной пластины толщиной 3 мм со скоростью 46 м/с. В этом случае не было отмечено макроскопического откольного разрушения образца. Рассчитанное значение σ_c составило 229 МПа, а значения σ_t , определенные на расстояниях 10, 20 и 30 мм от тыльной поверхности, – соответственно 43, 64 и 66 МПа.

В качестве предварительного шага по систематизации полученных результатов определяли средние значения разрушающих нагрузок σ_{mid} для обоих исходных состояний и их стандартные отклонения s . Эти результаты приведены в табл. 3, где N – число проведенных опытов для каждого исследуемого случая. Поскольку нормализованные образцы имели толщину лишь 20 мм, отдельно рассматривались также результаты для образцов этой толщины в состоянии поставки. Подобный подход был обусловлен желанием как-то разделить влияние эффектов, обусловленных условиями нагружения и исходным состоянием образцов. Далее предполагали, что зависимость разрушающей нагрузки от параметров, характеризующих условия нагружения, может быть выражена в виде простого линейного соотношения:

$$\sigma_t = a + b \Delta\sigma / \Delta x + c \sigma_c.$$

Полученные с использованием метода регрессионного анализа параметры множественной регрессии приведены в табл. 4 для трех указанных случаев, где R – коэффициент корреляции; F – определяющее значимость регрессии F -отношение. Уже из сопоставления стандартных отклонений для усредненного (табл. 3) и регрессионного (табл. 4) представлений полученных результатов можно сделать заключение о правомерности применения простейшей линейной модели регрессии для описания условий откольного разрушения образцов исследуемого взрывчатого состава. Осо-

бенно это относится к образцам материала в состоянии поставки. Наглядно применимость подобного подхода проиллюстрирована на рис. 3, где сопоставлены исходные и прогнозируемые с использованием полученного уравнения регрессии значения σ_t .

Т а б л и ц а 3

Данные по разрушающим нагрузкам без учета условий нагружения

Исходное состояние	N	$\sigma_{t \min} (\sigma_{t \max})$, МПа	σ_{mid} , МПа	s , МПа	s / σ_{mid} , %
Поставка (все)	12	77 (235)	162,8	52,0	31,9
Поставка ($h_t = 20$ мм)	6	142 (235)	198,8	34,9	17,6
Нормализация	7	137 (158)	146,4	6,2	4,2

Т а б л и ц а 4

Параметры регрессии, описывающие опытные данные

Исходное состояние	R	s , МПа	F	$a \pm s_a$, МПа	$b \pm s_b$, МПа	$c \pm s_c$, МПа
Поставка (все)	0,953	17,40	44,5	$137,7 \pm 19,9$	$0,90 \pm 0,10$	$-0,050 \pm 0,013$
Поставка ($h_t = 20$ мм)	0,982	8,55	40,3	$141,1 \pm 11,1$	$1,80 \pm 0,31$	$-0,159 \pm 0,037$
Нормализация	0,790	4,68	3,33	$150,5 \pm 9,5$	$0,51 \pm 0,24$	$-0,065 \pm 0,036$

Отметим некоторые особенности полученных результатов по определению и описанию условий откольного разрушения исследуемого взрывчатого состава. Прежде всего укажем на выявленную тенденцию влияния параметров, характеризующих интенсивность (σ_c) и скорость ($\Delta\sigma / \Delta x$) ударно-волнового нагружения, на условную величину разрушающей динамической нагрузки σ_t . Полученные параметры множественной линейной регрессии (табл. 4) указывают на достаточную обоснованность используемого в этой работе подхода. Для количественной оценки снижения сопротивления откольному разрушению исследуемого состава в результате нормализации сопоставим средние значения σ_t , полученные для образцов одинаковой толщины (20 мм) примерно в одном и том же диапазоне скоростей удара. Для состава в состоянии поставки это значение составляет 198,8 МПа, а после нормализации – 146,4 МПа. Таким образом, снижение динамической прочности состава в результате нормализации составляет около 26%. Результат, полученный при нагружении сохранившего макроскопическую целостность образца ударом пластины толщиной 3 мм, когда максимальное растягивающее напряжение находилось на уровне 66 МПа, достаточно хорошо согласуется с остальными и может служить ориентировочной границей стойкости состава к ударному нагружению подобного типа. Следует также отметить, что в условиях стандартных статических испытаний значения прочности исследуемого взрывчатого состава при растяжении и сжатии равны соответственно 4,5 и 40 МПа. Условия макроскопического откольного разрушения составов на основе октогена при удар-

ном нагружении определяли в работах [1–3]. Здесь испытывали образцы толщиной 4–6 мм и наблюдали откольное разрушение при нагружении импульсами давления с амплитудными значениями 130...200 МПа. Таким образом, полученные результаты вполне сопоставимы с известными ранее данными, но весьма существенно расширяют диапазон условий ударно-волнового нагружения и указывают на необходимость учета технологических аспектов.

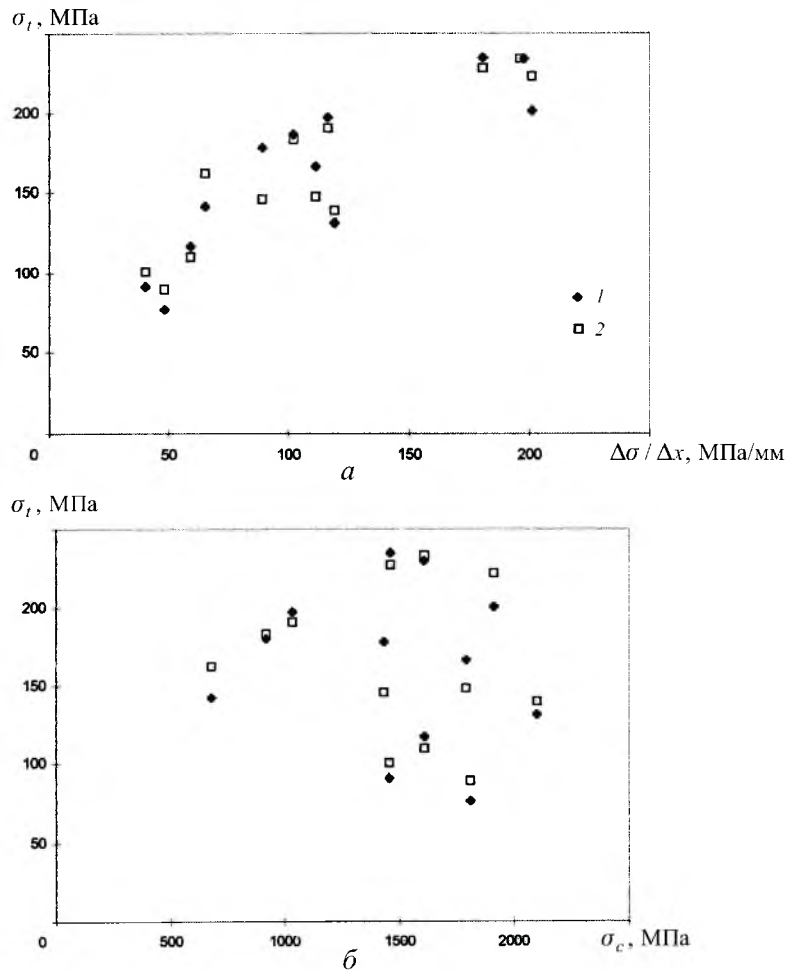


Рис. 3. Результаты определения условий откольного разрушения образцов в состоянии поставки (1) и их представление с использованием полученного уравнения регрессии (2): *a* – зависимости разрушающей нагрузки от градиента давления в растягивающем импульсе; *б* – то же от интенсивности нагружающей ударной волны (*б*).

Резюме

Подано результати дослідження відкольного руйнування вибухового складу ОТК-90 при ударному навантаженні. Зразки товщиною 20–105 мм навантажували ударом сталевих пластин товщиною 1,0 і 1,6 мм, які розганяються вибухом до швидкостей 135...380 м/с. Чисельний розрахунок умов наванта-

ження та відкольного руйнування зразків виконували в пружнопластичній постановці. За результатами аналізу одержаних даних побудовано просте емпіричне співвідношення, що зв'язує максимальне розтягувальне напруження в площині відколу з градієнтом напруження в розтягуючому імпульсі та максимальним напруженням у навантажуючій ударній хвилі. Показано, що нормалізація зразків призводить до певного зниження значень руйнівного навантаження.

1. *Seaman L., Curran D. R., Murri W. J.* A continuum model for dynamic tensile microfracture and fragmentation // Transactions of ASME. J. Appl. Mech. – 1985. – **52**, N 3. – P. 593 – 600.
2. *Seaman L., Erlich D. C.* Fracture in rocket propellant // J. de Physique. – Colloque C3. – Vol. 1. – P. 557 – 564.
3. *Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С.* О влиянии нагрева на откольное разрушение некоторых взрывчатых составов // Физика горения и взрыва. – 1995. – **31**, № 5. – С. 129 – 131.
4. *Погорелов А. П., Глушак Б. Л., Новиков С. А., Синицын В. А.* Исследование зависимости давления инициирования состава ТГ 50/50 от длительности действия импульса при ударе тонкими стальными пластинами // Там же. – 1977. – **13**, № 2. – С. 294 – 296.
5. *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. Методики и программы численного решения задач математической физики. – 1982. – Вып. 3 (11). – С. 11 – 21.

Поступила 28. 09. 98