

УДК 539.4

О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ И ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ НА ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ГЕКСОГЕНА

В. К. Голубев, А. П. Погорелов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты исследования откольного разрушения взрывчатого состава ГТК-70 при ударном нагружении. Образцы толщиной 20 и 30 мм нагружались ударом стальных пластин толщиной 1,0 мм, разгоняемых взрывом до скоростей $180 \div 370$ м/с. Расчет условий нагружения и откольного разрушения образцов выполнен 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.

Исследованиям динамического разрушения взрывчатых составов посвящено небольшое количество работ. Отдельные аспекты этой проблемы рассматривались в [1–3]. В работе [1] получены результаты по динамическому разрушению тэна и четырех составов на основе октогена в условиях одноосного растяжения. Скорость деформации до $3 \cdot 10^3$ с⁻¹ достигалась за счет использования метода разрезного стержня Гопкинсона. По сравнению с результатами статических испытаний прочность исследуемых материалов увеличилась в 5–6 раз, на основании чего было предложено использовать полученные результаты в качестве нижней оценки откольной прочности. В работе [2] изучалось откольное разрушение состава Propellant A при нагружении образцов ударом пластины из люсита. В диапазоне скоростей удара от 44 до 191 м/с, соответствующем диапазону рассчитанных ударных напряжений от 80 до 370 МПа, исследовались различные стадии откольного разрушения состава (от сохранения целостности образца до его полной фрагментации). В работе [3] изучалось влияние температуры нагрева на откольное разрушение четырех взрывчатых составов на основе гексогена и октогена. Нагрев до температуры 150 °С не приводил к снижению сопротивления составов макроскопическому откольному разрушению, а для состава ГТК-70 при этой максимальной температуре даже наблюдалось его аномальное увеличение, что связано с переходом данного состава в высокоэластичное состояние. В настоящей работе ставится задача выяснить, в какой степени могут влиять на сопротивление откольному разрушению конкретного взрывчатого состава условия его ударного нагружения, которые варьируются путем изменения скорости удара и толщины образца, и его исходное состояние, обусловленное используемой технологией прессования и последующей термической обработки.

Образцы для ударных испытаний в форме дисков диаметром 120 мм и толщиной h_t изготавливались из состава ГТК-70 методом горячего прессования. В исследуемом составе на основе гексогена массовая доля тротила в качестве пластификатора составляет 20 %, коллоксилина в качестве связующего — 10 %. Часть изготовленных таким образом образцов подвергалась нормализации, т. е. выдержке в течение 30 сут при повышенной температуре. Ударно-волновое нагружение образцов осуществлялось ударом стальной пла-

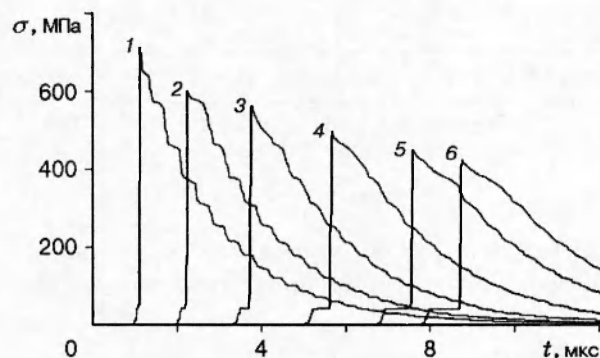


Рис. 1

стины толщиной 1,0 мм, разгоняемой 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 (см. [4]). Опыты проводились с полным сохранением всех фрагментов нагруженных образцов, визуально наблюдались и анализировались характер и степень разрушения образцов, определялась средняя толщина фрагментов первого откольного слоя h_s . С целью более точного и полного выявления фрагментов откольного слоя на тыльную поверхность образцов наносился тонкий слой яркого красителя.

Анализ условий ударно-волнового нагружения и откольного разрушения образцов проводился с использованием программы численного расчета одномерных упругопластических течений [5]. Основное внимание уделялось лагранжевым координатам, соответствующим местам образования откольного разрушения. На этих и близких к ним координатах выводились полные диаграммы продольного напряжения σ , действующего в процессе нагружения-разгрузки. В примыкающей к тыльной поверхности зоне образца шириной 5 мм и зоне стального ударника плотность ячеек расчетной сетки устанавливалась на уровне 50 мм^{-1} , а в остальном объеме ВВ — 20 мм^{-1} . В расчетах для исследуемого состава, а также для материала ударника (низкоуглеродистой стали Ст3) использовалось 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 P — давление; ρ — плотность материала; ρ_0 — начальная плотность; c_0 — объемная скорость звука; γ — параметр Грюнайзена; E_t — удельная тепловая энергия. Параметр n подбирался с использованием данных по ударно-волновой сжимаемости материалов в области относительно низких давлений. Упругопластические свойства учитывались путем задания динамического предела текучести Y и коэффициента Пуассона ν .

С целью выявления характера распространения нагружающего импульса в образце проведены опыты, в которых осуществлялась регистрация импульсного давления на различных расстояниях от поверхности соударения. Скорость удара во всех случаях задавалась равной 170 м/с, манганиновые датчики давления устанавливались на координатах 3, 10, 20 и 23 мм. В результате были зарегистрированы механические импульсы с амплитудными значениями давления 560, 510, 460 и 410 МПа. Для определения эффективного динамического предела текучести исследуемого состава в расчетах изменялось значение Y . На рис. 1 приведены расчетные диаграммы 1–6 напряжений при $Y = 20 \text{ МПа}$, соответствующие сечениям, расположенным на расстояниях 3, 6, 10, 15, 20, 23 мм от поверхности соударения. В этом случае достигалось наилучшее соответствие между эксперименталь-

Таблица 1

Материал	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	n	γ	Y , МПа	ν
Сталь	7,85	4,63	4,21	1,70	750	0,28
ГТК-70	1,72	2,37	7,38	1,20	20	0,34

ными и расчетными результатами. Подобранные и использованные в последующих расчетах параметры уравнения состояния и упругопластических свойств материалов ударника и образца приведены в табл. 1.

Результаты опытов и расчетов по определению условий откольного разрушения образцов состава ГТК-70 представлены в табл. 2. Здесь σ_t — максимальное растягивающее напряжение на координате откола, σ_c — максимальное продольное напряжение в образце у поверхности соударения, $\Delta\sigma/\Delta x$ — градиент давления в растягивающем импульсе. Предполагалось, что условная величина разрушающей нагрузки (σ_t) может в какой-то степени зависеть от параметров, характеризующих интенсивность и скорость ударно-волнового нагружения (σ_c , $\Delta\sigma/\Delta x$). Действительно, уже при первом рассмотрении результатов восьми опытов с образцами в состоянии поставки можно отметить определенный рост σ_t при увеличении значений выбранных параметров. На рис. 2 приведены диаграммы растягивающего напряжения в образцах толщиной 20 мм для обоих исходных состояний и для существенно различающихся (на $100 \div 110$ м/с) скоростей удара (линии 1, 2 соответствуют материалу в состоянии поставки и удару со скоростями 205 и 304 м/с; 3, 4 — после нормализации, 186 и 296 м/с). Здесь необходимо отметить явное влияние нормализации на снижение значений разрушающей нагрузки и сглаживание тенденций, проявляющихся для образцов в состоянии поставки.

В дополнительном опыте образец в состоянии поставки толщиной 40 мм нагружался ударом стальной пластины толщиной 2,0 мм со скоростью 80 м/с. В этом случае не было отмечено макроскопического откольного разрушения образца. Расчетное значение σ_c составило 322 МПа, а значения σ_t на расстояниях 3, 6, 9 и 12 мм от тыльной поверхности — 50, 84, 115 и 134 МПа соответственно.

При систематизации полученных результатов вначале определялись минимальные

Таблица 2

Исходное состояние	h_t , мм	w_p , м/с	h_s , мм	σ_c , МПа	σ_t , МПа	$\Delta\sigma/\Delta x$, МПа/мм
Поставка	20	205	3,0	885	260	87
		285	2,5	1293	302	121
		300	2,5	1373	311	124
		304	2,5	1391	314	126
		360	2,0	1690	300	150
	30	180	3,0	767	182	61
		212	3,0	921	216	72
		280	2,2	1266	214	97
Нормализация	20	186	2,3	796	195	85
		229	1,9	1006	203	107
		250	1,6	1112	189	118
		296	1,5	1347	196	131
		325	1,3	1501	197	151
		368	1,0	1735	164	164

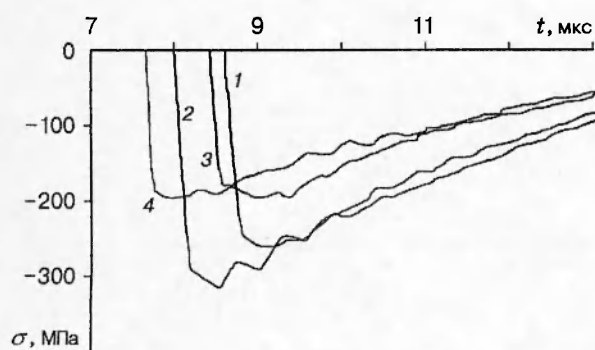


Рис. 2

Таблица 3

Исходное состояние	N	$\sigma_{t,\min} - \sigma_{t,\max}$, МПа	$\bar{\sigma}_t$, МПа	s , МПа
Поставка	8	214–314	262,4	52,1
Нормализация	6	164–203	190,7	13,8

$\sigma_{t,\min}$, максимальные $\sigma_{t,\max}$ и средние $\bar{\sigma}_t$ значения разрушающих нагрузок для обоих исходных состояний и их стандартные отклонения s . Эти результаты приведены в табл. 3 (N — число проведенных опытов для каждого исходного состояния). Далее предполагалось, 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 методом регрессионного анализа параметры множественной регрессии a , b , c и их стандартные отклонения s_a , s_b , s_c приведены в табл. 4 для обоих исходных состояний. Здесь R — коэффициент корреляции, F — определяющее значение регрессии отношение. Сопоставляя стандартные отклонения s 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 состава в состоянии поставки. Применимость подобного подхода проиллюстрирована на рис. 3, на котором приведены результаты определения условий откольного разрушения образцов в состоянии поставки (темные точки) и представления с использованием полученного уравнения регрессии (светлые точки). На рис. 3, а, б представлены зависимости разрушающей нагрузки σ_t от градиента давления в растягивающем импульсе $\Delta\sigma/\Delta x$ и от интенсивности нагружающей ударной волны σ_c соответственно. Что касается результатов по откольному разрушению образцов состава после нормализации, то небольшое число проведенных опытов и использование образцов лишь одной толщины не позволило четко выявить влияние условий нагружения на величину разрушающей нагрузки.

Обсудим полученные результаты. Для того чтобы оценить снижение сопротивления откольному разрушению исследуемого состава в результате нормализации, сопоставим средние значения $\bar{\sigma}_t$, полученные для образцов одинаковой толщины (20 мм) в примерно одинаковом диапазоне скоростей удара. Для состава в состоянии поставки это значение составляет $(297,4 \pm 21,7)$ МПа (5 опытов), а после нормализации — $(190,7 \pm 13,8)$ МПа (6 опытов). Таким образом, снижение динамической прочности состава в результате нормализации составляет около 36 %. Для обоих исходных состояний характерна тенденция

Таблица 4

Исходное состояние	R	s	F	$a \pm s_a$, МПа	$b \pm s_b$, мм	$c \pm s_c$
Поставка	0,963	16,5	32,2	$142,2 \pm 25,4$	$3,85 \pm 0,77$	$-0,236 \pm 0,075$
Нормализация	0,732	12,1	1,74	$194,5 \pm 40,3$	$1,35 \pm 1,62$	$-0,139 \pm 0,137$

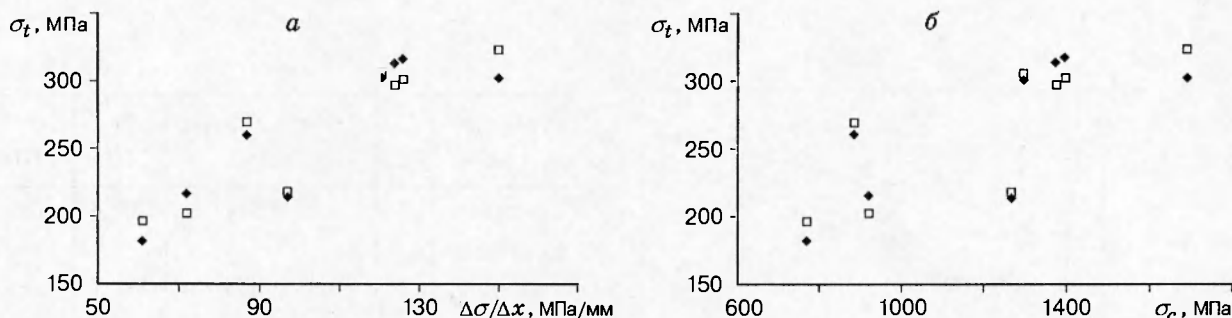


Рис. 3

снижения расчетных значений σ_t при нагружении образцов ударом максимальной интенсивности ($1,69 \div 1,73$ ГПа). Здесь определяющую роль, по-видимому, начинает играть эффект дополнительного энергосвободения за счет начинающейся в близлежащем к поверхности соударения слое ВВ реакции разложения. При аналогичной постановке опыта нагружение с интенсивностью около 2,0 ГПа приводит к инициированию в исследуемом составе процесса детонации. Результат, полученный при нагружении сохранившего макроскопическую целостность образца ударом пластины толщиной 2,0 мм со скоростью 80 м/с при максимальном растягивающем напряжении 140 МПа, достаточно хорошо согласуется с остальными полученными результатами и может служить ориентировочной границей стойкости состава к ударному нагружению. Этот результат близок к определенному в работе [3] для образцов состава ГТК-70 толщиной 4 мм критическому уровню разрушения, характеризуемому давлением в нагружающем импульсе $160 \div 170$ МПа. Можно предположить, что полученные результаты вполне адекватно описывают условия макроскопического откольного разрушения исследуемого взрывчатого состава.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. В. Батькову за проведение измерений импульсного давления и Б. Л. Глушаку за обсуждение постановки опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoge K. G. Dynamic tensile strength of explosive materials // Explosivstoffe. 1970. N 2. P. 39–41.
2. Seaman L., Curran D. R., Murri W. J. A continuum model for dynamic tensile microfracture and fragmentation // Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech. 1985. V. 52, N 3. P. 593–600.
3. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. О влиянии нагрева на откольное разрушение некоторых взрывчатых составов // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 129–131.
4. Погорелов А. П., Глушак Б. Л., Новиков С. А., Сеницын 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.
5. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. Н., Софронов В. Н. Программа УПОК для решения задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы числ. решения задач мат. физики. 1982. Вып. 3. С. 11–21.

Поступила в редакцию 2/III 1998 г.