

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА УДАРОМ
II. КРИТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЗРЫВА**

М. Я. Васильев
(Москва)

Взрыв осуществлялся ударом пластинки по поверхности ВВ. Методика исследования возбуждения взрыва ударом пластинки дана в [1].

Наличие или отсутствие взрыва у исследуемого заряда определялось с помощью лупы времени и одновременно по пробиванию или не пробиванию преграды, несущей откольную пластинку. Определялась критическая скорость откольной пластинки, вызывающая или не вызывающая возбуждение взрыва тротила при различной начальной плотности образцов (табл. 1 и 2).

Точность определения характеризуется отклонением скорости пластинки от критического значения на $\pm 0,5\%$. Превышение критической скорости на $0,5\%$ дает 100% взрывов, а уменьшение критической скорости на $0,5\%$ — 100% отказов.

В табл. 1 можно видеть воспроизводимость опытов, влияние скорости и отсутствие влияния массы пластинки. Результаты коротко суммированы в табл. 2.

Чтобы перейти от критической скорости к критической энергии возбуждения взрыва, рассчитывалось количество энергии, вводимое во взрывчатое вещество ударом пластинки. С этой целью определялась скорость ударной волны в исследуемом заряде при заданной скорости и массе ударяющей пластинки.

Исследование ударной волны в тротиле производилось при плотности образцов $1,43, 1,54$ и $1,60$ г/см³, диаметре 70 мм и толщине 5 мм. Удар осуществлялся стальной пластинкой толщиной 1 мм.

Результаты исследования динамической сжимаемости тротила приведены в табл. 3. Если измерены скорости ударяющей пластинки и возникающей при этом ударной волны, то с помощью уравнений сохранения

$$\frac{V}{V_0} = \frac{(D-u)}{D}; \quad p - p_0 = \rho_0 D u; \quad E - E_0 = \frac{1}{2} (p - p_0) (V_0 - V);$$

соотношения $u_c = \frac{w}{2}$; и графика ударной адиабаты материала пластинки

можно определить основные динамические характеристики во фронте ударной волны ($p, V, u, E - E_0$) [2]. Как известно, общая работа удара пластинки (E) представляет сумму из энергии движения вещества (E_u) и упругой и тепловой частей энергии (E_y, E_T):

$$E = E_u + E_y + E_T, \quad (1)$$

причем $E_u = E_y + E_t$. При возбуждении взрыва основная роль принадлежит тепловой энергии. При ударе пластинкой по прессованному органическому веществу в первом приближении можно не делить внутреннюю энергию на упругую и тепловую части, а считать всю ее тепловой и равной, следовательно, половине общей работы удара:

$$E - E_0 = \frac{u^2}{2} \approx Q. \quad (2)$$

Таблица 1
Определение критической скорости пластинки, возбуждающей взрыв тротила различной плотности

Плотность тротила, г/см ³	Скорость пластинки (1 мм), м/сек	Взрыв (+) или отсутствие взрыва (-)	Скорость пластинки (3 мм), м/сек	Взрыв (+) или отсутствие взрыва (-)
1,43	442	—	463	+
	458	+	441	—
	450	+	456	+
	454	—	454	—
	458	+	454	—
	454	—	456	—
	458	+	456	+
1,54	478	+	490	—
	478	—	493	+
	478	+	490	—
	475	—	440	—
	478	—	493	+
1,600	483	—	530	—
	513	—	539	+
	535	+	535	+
	528	—	533	—
	531	+	535	—
	528	—	533	—
	531	+		

бате торможения стали ($a=0,4 \cdot 10^7 [г \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1}]$), где ρ_0 — плотность исследуемого вещества; D — скорость ударной волны.

Полученное соотношение позволяет анализировать влияние на движение вещества за фронтом волны начальной плотности исследуемого ВВ и скорости ударной волны в нем. При равной скорости ударяющей пластинки (ω) скорость движения вещества за фронтом волны (u) будет больше в том образце ВВ, у которого меньше плотность (ρ_0) и скорость ударной волны (D) (см. табл. 3).

Возбуждение взрыва тротила было выполнено стальными пластинками толщиной 1 и 3 мм. Оказалось, что изменение массы пластинки в 3 раза не изменяет критическую скорость, вызывающую возбуждение взрыва. Из полученного уравнения (4) следует, что энергия сжатия ($E - E_0$) определяется только скоростью пластинки и не зависит от ее массы, которая в уравнение не входит.

Рассматриваемый необходимый для расчетов участок адиабаты торможения пластинки, являющейся зеркальным отражением ударной адиабаты стали [3], в некотором интервале можно выразить уравнением прямой (в общем случае это уравнение параболы или еще более сложное уравнение)

$$p = a(\omega - u). \quad (3)$$

Решая уравнение (3) совместно с уравнением сохранения импульса в ударной волне, для тротила $p = \rho_0 Du$, находим зависимость скорости движения вещества (u) от скорости пластинки (ω)

$$u = \frac{a}{a + \rho_0 D} \cdot \omega, \quad (4)$$

где a — тангенс угла наклона прямой, соответствующей адиа-

Таблица 2
Зависимость критической скорости пластинки от плотности тротила

Толщина ударяющей пластинки, мм	Критическая скорость пластинки, м/сек	Плотность образцов, г/см ³
1	456	1,43
	478	1,54
	530	1,600
3	456	1,43
	492	1,54
	535	1,600

Действие удара пластинок разной массы состоит в создании разной длины волны в исследуемом образце. При увеличении массы пластинки в n раз во столько же раз увеличивается длина волны в образце, количество же энергии, вводимое при динамическом сжатии на единицу объема вещества пластинками различной массы и одинаковой скорости, постоянно. Однако время нахождения тепловой энергии сжатия в едини-

Таблица 3
Энергия, вводимая в исследуемый образец ударом пластинки ($E - E_0$)

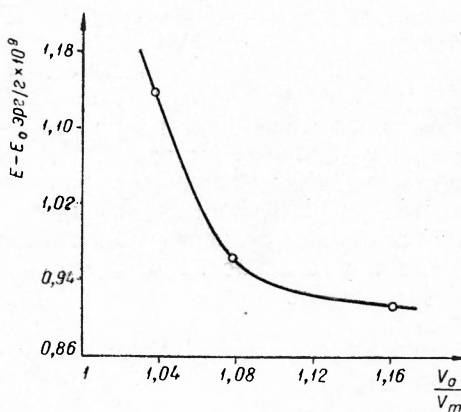
Скорость пластинки, м/сек	Плотность ВВ, г/см ³	Скорость ударной волны, м/сек	Массовая скорость ВВ, м/сек	Давление во фронте волны, см ²	Энергия при ударном сжатии, эрг/г	Критическая энергия, кал/см ³
302	1,43	1567	286,0	6,409·10 ⁹	0,4090·10 ⁹	—
456	1,43	1915	426,8	11,688·10 ⁹	0,9108·10 ⁹	31,13
302	1,54	2007	280,3	8,664·10 ⁹	0,3929·10 ⁹	—
480	1,54	2455	438,5	16,580·10 ⁹	0,9620·10 ⁹	35,41
302	1,60	2237	277,2	9,922·10 ⁹	0,3842·10 ⁹	—
442	1,60	2583	400,6	16,557·10 ⁹	0,8025·10 ⁹	—
530	1,60	2800	476,6	21,352·10 ⁹	1,1357·10 ⁹	43,43

це объема не должно быть меньше некоторой величины, необходимой для развития реакции, и удар очень тонкой пластинкой малой массы не сможет этого обеспечить из-за ограниченной толщины сжатого слоя и быстрого наступления разгрузки. С увеличением плотности исследуемого образца растет и критическая скорость возбуждающей взрыв пластинки (см. табл. 2). Из уравнения (4) также следует, что с увеличением плотности ВВ критическая скорость пластинки, возбуждающей взрыв, должна увеличиваться.

Таблица 4
Зависимость возбуждения взрыва у различных ВВ от скорости ударяющей пластинки (толщина пластинки 3 мм)

Исследуемое взрывчатое вещество	Плотность ВВ, г/см ³	Критическая скорость пластинки, м/сек
Тротил	1,43	456
	1,54	492
	1,600	535
Гексоген	1,645	332
Тетрил	1,615	332
Пикриновая кислота	1,585	431
Тротил—гексоген (50:50)	1,589	346

Примечание. Тетрил взят после длительного хранения на складе.



Зависимость внутренней энергии динамического сжатия тротила от отношения удельных объемов исследуемого образца и монокристалла.

Увеличение критической энергии пластинки, возбуждающей взрыв, зависит от уменьшения воздушных зазоров между кристаллами прессованного вещества, что согласуется с представлением Боудена и Иоффе [4].

Зависимость между энергией динамического сжатия и отношением удельных объемов исследуемого образца и монокристалла приведена на рисунке. Влияние на критическую энергию уменьшения воздушных зазоров резко проявляется при больших плотностях образцов.

Определялись критические скорости пластинок при возбуждении взрыва у различных взрывчатых веществ (табл. 4). Полученные значения критических скоростей пластинки не противоречат принятому ряду чувствительности взрывчатых веществ к удару. При одинаковом давлении прессования гексоген ($\rho_0 = 1,645 \text{ г/см}^3$) в 1,48 раза чувствительнее тротила ($\rho_0 = 1,540 \text{ г/см}^3$).

Определение критических скоростей, как уже указывалось, удается осуществить с очень большой точностью ($\pm 0,5\%$).

ВЫВОДЫ

1. Определялась критическая энергия возбуждения взрыва тротила, вводимая ударом пластинки. Получены критические скорости и соответствующие критические энергии возбуждения взрыва тротила при плотности образцов 1,43; 1,54 и 1,60 г/см^3 .

2. Определялись критические скорости пластинок при возбуждении взрыва у различных взрывчатых веществ; были исследованы: тротил, гексоген, тетрил, пикриновая кислота и смесь тротил — гексоген (50 : 50). Точность определения характеризуется отклонением скорости пластинки от критического значения на $\pm 0,5\%$. Превышение критической скорости на 0,5% дает 100% взрывов, а уменьшение критической скорости на 0,5% 100% отказов.

3. Замерялась скорость ударной волны и определялись основные динамические характеристики во фронте волны для тротила с указанной выше плотностью ($p, V, u, E - E_0$). Получено соотношение между скоростью движения вещества и критической скоростью пластинки

$$u = \frac{a}{a + \rho_0 D} \cdot \omega; \quad E - E_0 = \frac{a^2}{(a + \rho_0 D)^2} \cdot \frac{\omega^2}{2},$$
$$a = 0,4 \cdot 10^7 [\text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}],$$

позволяющее количественно анализировать влияние на критическую энергию возбуждения взрыва (или скорость движения вещества u) скорости и массы ударяющей пластинки, а также плотности исследуемого ВВ. Из уравнения (4) следует, что энергия сжатия ($E - E_0$) определяется только скоростью пластинки (ω) и не зависит от ее массы, которая в уравнение не входит.

Поступила в редакцию
2/II 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Я. Васильев. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
2. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др. ЖЭТФ, 1958, 34, 886.
3. W. Goranson, D. Bankroft et al. J. Appl. Phys., 1955, 26, 1479.
4. D. Bankroft, E. Peterson, S. Minshall. J. Appl. Phys., 1956, 27, 291.
5. Ф. П. Боуден и А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. ИЛ, 1955.