

9. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*.— Вып. 4.— М.: ИЛ, 1950.— С. 108—119.
10. Большаков А. П., Новиков С. А., Сеницын В. А. Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6 // *Пробл. прочности*.— 1979.— № 10.— С. 87—88.
11. Еременко А. С., Новиков С. А., Сеницын В. А. Трещиностойкость поликарбоната и полиметилметакрилата при высоких скоростях нагружения // *Физико-химическая механика материалов*.— 1985.— № 4.— С. 80—83.
12. Еременко А. С., Новиков С. А., Сеницын В. А. Корреляция релаксационных и энергетических характеристик разрушения полимеров при высоких скоростях нагружения // *Докл. АН СССР*.— 1986.— 286, № 6.— С. 1320—1323.
13. Большаков А. П., Новиков С. А., Сеницын В. А. Прочность конструкционных материалов при динамических нагрузках (обзор): Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов.— 1989.— Вып. 1.— С. 24—46.
14. Новиков С. А., Сеницын В. А., Ной П. А. Взрывные устройства для механических испытаний материалов в экспериментах на импульсных реакторах // Там же. Сер. ИРПКС.— 1986.— Вып. 1.— С. 26—31.
15. Багрянов Б. В., Квасков Г. А., Новиков С. А. и др. Методы внутрореакторных испытаний конструкционных материалов в условиях двухосного динамического растяжения при скоростях деформации 10^2 — 10^4 с⁻¹ // Там же.— 1988.— Вып. 2.— С. 44—49.
16. Багрянов Б. В., Квасков Г. А., Новиков С. А. Устройство для испытания трубчатых образцов в условиях двухосного динамического растяжения // *Пробл. прочности*.— 1988.— № 6.— С. 108—110.
17. Багрянов Б. В., Большаков А. П., Новиков С. А. Прочность стеклоэпоксида при импульсном нейтронном облучении // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. ИРПКС*.— 1987.— Вып. 1.— С. 57—61.

г. Москва

Поступила в редакцию 6/II 1990

УДК 539.89 : 662.215.2

*В. К. Голубев, Ю. А. Крысанов, С. А. Новиков,
А. И. Рябикин*

О МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПРЕГРАД СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ТОНКОГО СЛОЯ ВВ

Представлены результаты исследования механического нагружения преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ. В результате численного расчета построены зависимости параметров нагружения от акустического импеданса преград. Получены экспериментальные результаты по влиянию размера нагружаемой поверхности и толщины слоя ВВ на значение импульса, переданного преградам из алюминия и текстолита. Рассмотрено распределение механического импульса в двухслойной системе текстолит — алюминий. Экспериментальные результаты объясняются существенной затянутостью нагружающего механического импульса.

Метод нагружения преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ широко применяется в практике динамических испытаний материалов и конструкций, а также в ряде импульсных технологических операций [1—3]. Он позволяет нагружать поверхности большого размера и сложной формы механическим импульсом высокой интенсивности и малой длительности. Особенно удобны для этих целей пластические ВВ, которые имеют малую критическую толщину детонации и легко наносятся на поверхность произвольной формы. Так, еще в [1] описывалось пластическое ВВ С-4 на основе тэна, имеющее плотность 1,5 г/см³, скорость детонации 6,7 км/с и устойчиво детонирующее при толщине слоя 0,4 мм. Отдельные вопросы механического нагружения преград скользящей детонацией исследовались расчетным [4, 5] и экспериментальным [6] методами. В данной работе поставлена задача более детального рассмотрения некоторых связанных с процессом нагружения эффектов, для чего оба эти метода используются в совокупности.

Слой ВВ толщиной h_e располагался на плоской поверхности преграды. Плоский детонационный фронт, перпендикулярный поверхности раздела ВВ — преграда, имел скорость распространения D_e . Течение продуктов детонации (ПД) рассматривалось в системе координат, связанной

с детонационным фронтом. Схема течения показана в [5]. В рассматриваемой системе координат ПД из детонационного фронта истекают, согласно условию Чепмена — Жуке, со скоростью звука. Дальнейшее сверхзвуковое течение ПД происходит в двух взаимодействующих волнах разрежения. Поле течения ПД описывается уравнениями двумерного стационарного сверхзвукового течения [7]:

$$Q - \theta = 2\xi \quad \text{вдоль } C^+, \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(\theta + \alpha),$$

$$Q + \theta = 2\eta \quad \text{вдоль } C^-, \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(\theta - \alpha),$$

где ξ и η сохраняют постоянные значения вдоль индивидуальных характеристик; θ — угол течения; $Q = \alpha + \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} (M^2 - 1)$; α и M — угол и число Маха; n — показатель степени в изоэнтропе расширения ПД, $p = A\rho^n$, а давление в потоке ПД определяется формулой $p = B \left(\frac{n+1}{2} M^2 + 1 \right)^{\frac{n}{n-1}}$. Соответствующие константы выражаются через

свойства ВВ следующим образом: $A = \frac{D_e n^n}{\rho_e^{n-1} (n+1)^{n+1}}$, $B = \frac{\rho_e D_e^2}{n+1} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n}{n-1}}$.

В качестве уравнения состояния материала преграды использовалась ударная адиабата в виде линейного соотношения между массовой и волновой скоростями $D = c_0 + \lambda u$. Граничное условие на поверхности раздела ПД — преграда имело в этом случае вид $p = \rho_0 (c_0 + \lambda D_e \sin \theta) \times D_e \sin \theta$, где ρ_0 — плотность материала преграды, а на свободной поверхности ПД — $p = 0$.

Численное решение задачи методом характеристик дает расположение границы раздела ПД — преграда и давление на этой границе. Далее могут быть определены нормальная и тангенциальная составляющие переданного преграде механического импульса

$$I_n = \int_0^t p(t) dt, \quad I_\tau = \int_0^t p(t) \operatorname{tg} \theta(t) dt.$$

Расчеты проводились на ЭВМ для ВВ со следующими свойствами: $\rho_e = 1,52 \text{ г/см}^3$, $D_e = 7,8 \text{ км/с}$, $n = 3$. Представилось целесообразным перекрыть по возможности наиболее широкий диапазон изменения свойств материалов нагружаемых преград. Свойства материалов, взятые в основном из [8—10], а также параметры нагружения преград приведены в таблице. В расчетах и при представлении результатов использовались

Материал преграды	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	λ	\bar{p}_0	θ_0 , рад	\bar{I}_n	\bar{I}_τ
Вольфрам	19,2	4,03	1,24	0,777	0,028	1,139	0,021
Молибден	10,2	5,16	1,24	0,726	0,038	1,120	0,028
Уран	18,9	2,55	1,50	0,726	0,038	1,119	0,028
Никель	8,86	4,62	1,52	0,695	0,045	1,106	0,033
Железо	7,85	4,57	1,49	0,676	0,050	1,097	0,036
Медь	8,90	3,96	1,50	0,675	0,050	1,097	0,036
Титан	4,51	5,22	0,77	0,597	0,070	1,059	0,048
Свинец	11,3	2,03	1,52	0,632	0,060	1,073	0,043
Алюминий	2,71	5,25	1,39	0,523	0,092	1,012	0,061
Магний	1,72	4,49	1,27	0,423	0,127	0,941	0,078
Стеклотекстолит	1,72	2,26	1,22	0,346	0,159	0,871	0,091
Текстолит	1,36	2,65	1,49	0,337	0,163	0,863	0,092
Плексиглас	1,18	2,59	1,51	0,316	0,173	0,842	0,096
Полистирол	1,05	2,51	1,36	0,291	0,185	0,818	0,099
Полиэтилен	0,92	2,05	1,95	0,286	0,188	0,803	0,100
Пенополистирол	0,70	1,19	1,35	0,203	0,237	0,703	0,108
»	0,50	0,70	1,31	0,156	0,272	0,625	0,109

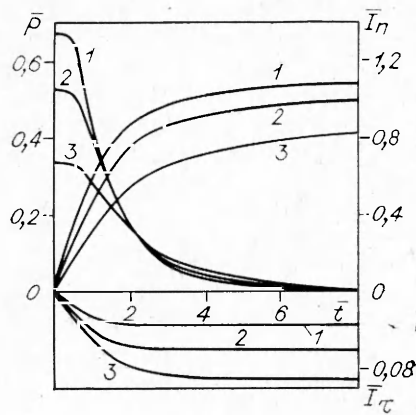


Рис. 1. Зависимость давления на границе раздела и составляющих импульса от времени для меди (1), алюминия (2) и текстолита (3).

безразмерные параметры, связанные с размерными следующим образом:

$$t = \bar{t} \frac{h_e}{D_e}, \quad p = \bar{p} \frac{\rho_e D_e^2}{n+1}, \quad I = \bar{I} \frac{\rho_e D_e h_e}{n+1}.$$

Для p и θ в таблице приведены начальные величины, для нормальной и тангенциальной составляющих переданного преграде импульса — значения, соответствующие безразмерным временам 30 и 5 для металлов и 40 и 10 для неметаллических материалов. К этим временам передача импульса преграде фактически завершается для более жестких материалов и близка к завершению для более мягких. Зависимости параметров нагружения преград от времени и от акустического импеданса представлены на рис. 1 и 2.

Экспериментально исследовано влияние материала и размера нагружаемой поверхности преграды, а также толщины слоя ВВ на величину переданного преграде механического импульса. Образцы из алюминия (сплав АМг6) представляли собой цилиндры высотой 60 и диаметром 20—350 мм. В случае преграды из текстолита к алюминиевым образцам жестко крепились текстолитовые диски толщиной 10 и диаметром 20—150 мм. На нагружаемую торцевую поверхность образца наносился слой пластического ВВ. Детонация подводилась к центру нагружаемой поверхности с помощью тонкого детонационного мостика из пластического ВВ. Механический импульс образца определялся по траектории его движения, регистрируемой методом скоростной киносъемки. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Подобным образом рассматривалось распределение механического импульса в двухслойной системе. В этом случае жесткого крепления текстолитовых дисков к алюминиевым цилиндрам не было. Толщина нагружающего слоя ВВ составляла 0,4 мм. Распределение импульса ха-

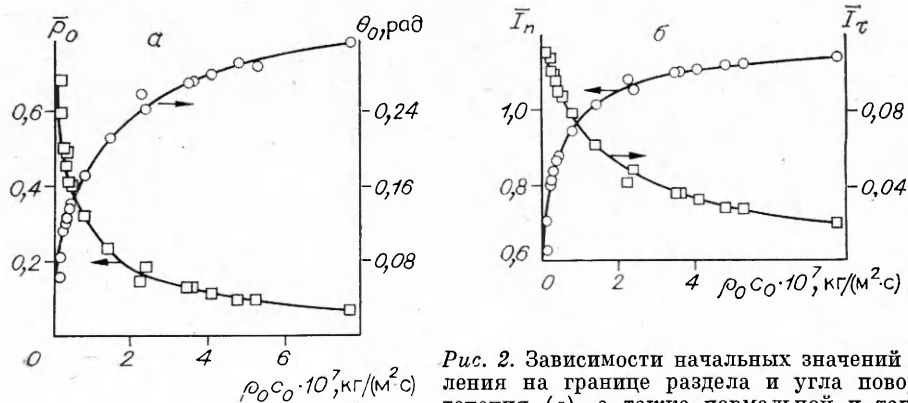


Рис. 2. Зависимости начальных значений давления на границе раздела и угла поворота течения (а), а также нормальной и тангенциальной составляющих импульса (б) от акустического импеданса преграды.

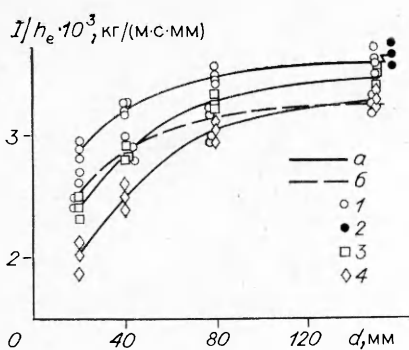


Рис. 3. Зависимость импульса, переданного преградам из алюминия (а) и текстолита (б), от диаметра образца для толщины слоя ВВ 0,4 мм. d , мм: 1, 2 — 350, 3 — 1, 4 — 1,5.

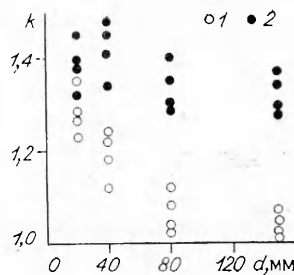


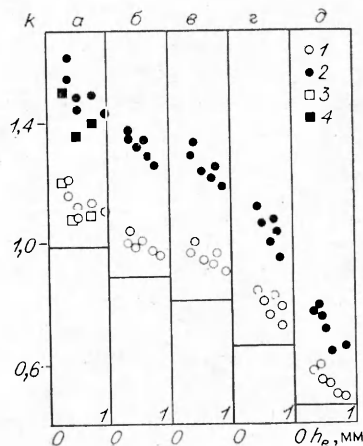
Рис. 4. Влияние диаметра двухслойной системы текстолит — алюминий на коэффициент усиления при использовании экспериментального (1) и расчетного (2) значений прикладываемого импульса.

характеризовалось коэффициентом усиления $k = I_2/I_1$, где I_1, I_2 — импульсы, приложенные к текстолиту и алюминию. Полученные для k результаты представлены на рис. 4. Расчетные значения импульсов корректировались на эффект бокового разлета узкого бокового слоя ПД методом, указанным ниже.

Проводилась еще одна серия опытов по распределению механического импульса. Диаметр двухслойной системы составлял в этом случае 95 мм, толщина алюминиевого слоя менялась в пределах 3—300 мм, а в качестве первого слоя использовались диски из стеклотекстолита с $\rho = 1,2$ г/см³ (рис. 5). Расчетные и экспериментальные значения I_1 определялись с помощью результатов, приведенных на рис. 2, 3. Горизонтальными линиями на рис. 5 отмечены предельные, соответствующие совместному движению слоев, значения $k = m_2/(m_1 + m_2)$ (m_1 и m_2 — массы первого и второго слоев). В некоторых опытах в качестве первого слоя применялись диски из текстолита толщиной 10 мм.

Совокупность полученных расчетных и экспериментальных результатов по нагружению преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ позволяет составить более полное представление о процессе нагружения по сравнению с [5, 6]. Приведенные на рис. 3 результаты указывают на существенную роль размера нагружаемой поверхности преграды и толщины слоя ВВ на величину I . Наблюдаемый эффект может быть обусловлен лишь тем, что нагружающий механический импульс имеет полное время действия, существенно превышающее характерное расчетное время, составляющее $(3 \div 5) h_e/D_e$. В этом случае снижение импульса при уменьшении диаметра преграды и росте толщины слоя ВВ

Рис. 5. Влияние толщины алюминиевого слоя (а — в: $h_2 = 300, 30, 15, 7, 3$ мм) и толщины слоя ВВ на коэффициент усиления в двухслойной системе (1, 2 — стеклотекстолит, 3, 4 — текстолит) при использовании экспериментального (1, 3) и расчетного (2, 4) значений прикладываемого импульса.



связано с увеличением доли ПД, подвергшихся боковому разлету и вследствие этого не вносящих свой вклад в среднее значение удельного на единицу поверхности механического импульса.

Для упрощенного рассмотрения процесса нагружения условно разграничим процесс воздействия ПД на преграду на две стадии. Первая, высокоинтенсивная и кратковременная, достаточно реалистически описывается результатами расчета разлета ПД в вакуум. Переданные преградам из алюминия и текстолита значения механического импульса $I/h_e = 3 \cdot 10^3$ и $2,56 \cdot 10^3$ кг/(м·с·мм). На момент времени $5h_e/D_e$ указанным преградам передается соответственно 94 и 88 % полного импульса. Вторая, низкоинтенсивная и более длительная стадия обусловлена взаимодействием расширяющихся ПД с воздухом. Ее вклад характеризуется превышением экспериментально определенного максимального значения импульса над расчетным. Для алюминия и текстолита эти превышения составляют $0,63 \cdot 10^3$ и $0,68 \cdot 10^3$ кг/(м·с·мм). Поскольку передача импульса на этой стадии не зависит от акустического импеданса преграды, примем общее для обоих материалов значение $0,70 \cdot 10^3$ кг/(м·с·мм), действенное для $d > 150$ мм. Предположим также, что начальное давление на этой стадии соответствует расчетному на границе ПД с воздухом, составляющему ~ 30 МПа, а его спад происходит линейно с течением времени. Оценка характерного времени нагружения $\sim 400h_e/D_e$.

На основании полученных результатов и сделанных предположений можно оценить снижение механического импульса за счет бокового разлета ПД на обеих стадиях нагружения. На второй стадии, взяв в ПД $c = 0,5$ км/с, что соответствует среднему давлению в нагружающем импульсе 15 МПа, и рассматривая процесс нагружения с учетом боковой разгрузки, получим, что среднее значение удельного механического импульса будет определяться так:

$$\frac{2p^*}{r^2} \int_0^r \int_0^{t^*} \left(1 - \frac{p^*}{2I^*h_e} t\right) \rho d\rho dt.$$

Здесь r — радиус преграды; $p^* = 30$ МПа; $I^* = 0,70 \cdot 10^3$ кг/(м·с·мм); $t^* = \min \left\{ \frac{r-\rho}{c}, \frac{2I^*h_e}{p^*} \right\}$. На первой стадии, сравнивая экспериментальные результаты (для нагружения с $h_e = 1,0$ мм, $d = 20$ мм; $h_e = 1,5$ мм, $d = 20$ мм, $d = 40$ мм) с расчетными и учитывая еще боковой разлет ПД на второй стадии, оценим ширину бокового слоя ВВ, не участвующего в процессе нагружения. Полученная величина характеризует боковой разлет ПД на первой стадии нагружения и составляет $\sim 1,2h_e$. Зависимости механического импульса от диаметра преграды и толщины слоя ВВ, построенные на основании расчета с учетом эффектов догрузки и бокового разлета, хорошо согласуются с приведенными на рис. 3 экспериментальными результатами.

Объяснение хода зависимостей переданного преграде импульса от геометрических факторов существенной затаенностью нагружающего импульса позволяет понять также и полученные результаты по распределению механического импульса в двухслойной системе (см. рис. 4 и 5). Реалистическое значение коэффициента усиления, характеризующее распределение достаточно короткого механического импульса в двухслойной системе, получается при использовании расчетной величины I_1 . Для рассматриваемой системы текстолит — алюминий (см. рис. 4) определенное таким образом k практически постоянно в диапазоне диаметров системы 20—150 мм. Для пары стеклотекстолит — алюминий (см. рис. 5) наблюдается прогрессивное снижение значения k для алюминиевого слоя толщиной менее 15 мм. Это обусловлено тем, что отношение времени циркуляции в слоях системы

$$\frac{h_2 c_{01} \sqrt{D_e^2 - c_{01}^2}}{h_1 c_{02} \sqrt{D_e^2 - c_{02}^2}}$$

становится меньше единицы, т. е. определяющее влияние на эффект расслоения начинает оказывать волна разрежения, отраженная от свободной поверхности Al.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарг Дж. С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов.— М.: Мир, 1966.
2. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом.— Новосибирск: Наука, 1980.
3. Голубев В. К., Новиков С. А., Синицына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ // ПМТФ.— 1981.— № 2.— С. 112.
4. Erktan J. O. // The Phys. Fluids.— 1958.— 1, N 6.— P. 535.
5. Привалов Ю. М., Солоненко В. Р., Тарасов Б. А. Воздействие скользящей детонации на сжимаемую стенку // ФГВ.— 1976.— 12, № 3.— С. 444.
6. Погорелов А. П., Глушак Б. Л., Новиков С. А. и др. О зависимости импульса отдачи от жесткости преграды в режиме скользящей детонации слоя ВВ // Там же.— 1977.— 13, № 5.— С. 771.
7. Мизес Р. Математическая теория течений сжимаемой жидкости.— М.: ИЛ, 1961.
8. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
9. Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. // Высокоскоростные ударные явления/ Под ред. Р. Кислоу.— М.: Мир, 1973.
10. Дудолов И. П., Ракигин В. И., Сутулов Ю. Н. и др. Ударная сжимаемость полистирола с различной начальной плотностью // ПМТФ.— 1969.— № 4.— С. 148.

г. Москва

Поступила в редакцию 3/VII 1990

УДК 531.663

М. В. Лисанов, А. В. Дубовик

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗАРЯДА НА ПАРАМЕТРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ УДАРЕ

На основе модели термопластического разрушения и воспламенения тонкого слоя вязкопластического материала при ударе и использовании нормального закона распределения прочности зарядов ВВ выполнены численные расчеты параметров инициирования и кривых частостей взрывов в зависимости от размеров заряда и энергии удара.

В настоящее время чувствительность твердых взрывчатых веществ (ВВ) к механическим воздействиям оценивается методом критических напряжений [1] и комплексом стандартных методик, основанных на определении частости (вероятности) взрывов (ГОСТ 4545-80). При испытаниях на чувствительность к удару образец спрессованного ВВ толщиной h_0 помещается между торцами двух цилиндрических металлических роликов радиусом R , по которым наносится осевой удар падающим грузом массой M со скоростью v_0 . Взрыв происходит в процессе деформации заряда, если давление прочностного разрушения P_1 превышает критическую величину $P_{кр}$. По методу критических напряжений значение $P_{кр}$ определяется варьированием толщины образцов и является одной из основных характеристик механической чувствительности ВВ. В стандартных методах испытаний масса заряда (навески) постоянна, и чувствительность ВВ характеризуется величиной частости взрывов F или энергией падающего груза, соответствующей частости F_0 , равной 0, 50 или 100 %.

Не обсуждая здесь достоинства и недостатки, присущие указанным методам испытаний, зададимся целью выяснить причины, влияющие на точность определения показателей чувствительности ВВ, вследствие которых данные о степени опасности ВВ, полученные разными группами исследователей, не всегда согласуются между собой. Один из основных факторов, влияющих на вероятность возникновения взрыва и погрешность определения $P_{кр}$, — разброс значений прочности заряда вблизи средней