

ТРУДЫ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

ПРИ ТОМСКОМ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМ. В. В. КУЙБЫШЕВА

Выпуск 2

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Томск — 1973

Настоящий сборник содержит оригинальные работы по гидромеханике, газовой динамике и термоупругости, представленные сотрудниками научно-исследовательского института прикладной математики и механики при ТГУ и ряда кафедр Томского государственного университета. Труды рассчитаны на инженеров и научных работников, занимающихся приложениями численных и аналитических методов в различных областях прикладной математики и механики.

Редакторы — В. А. ШВАБ, В. Е. ТОМИЛОВ

ЭФФЕКТЫ ОТКОЛА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СОУДАРЕНИИ

Т. М. ПЛATOVA, И. Е. ХОРЕВ, П. В. МАКАРОВ

Построение модели кратерообразования в полупространстве и плитах ограниченной толщины с учетом эффектов, вызванных распространением ударных волн, невозможно без комплексного теоретического и экспериментального исследования многих задач физики высокоскоростного соударения. К таким задачам в первую очередь следует отнести:

а) построение уравнения состояния тел в области высоких и низких давлений с включением области отрицательных напряжений;

б) рассмотрение критических состояний металла и определение параметров его механического разрушения;

в) экспериментальное определение критических разрушающих напряжений и скорости откольных слоев;

г) установление экспериментальных и аналитических законов затухания ударных волн в различных средах;

д) выявление микроструктуры ударных волн, выяснение особенностей процесса возникновения и распространения ударных волн в твердых телах, связанных с кристаллической структурой тел.

Остановимся на опытно изучении эффектов откола, наблюдающихся при распространении ударных волн в металлах.

Экспериментальные исследования процесса высокоскоростного взаимодействия ударников с металлическими плитами установили существенное влияние на результативность соударения откольных эффектов, возникающих в результате выхода на свободную тыльную поверхность плиты ударной волны высокой интенсивности.

Откол возникает при взаимодействии двух волн разрежения, движущихся навстречу друг другу и образованных в результате отражения ударных волн от свободных поверхностей плиты и ударника. Если распространяющаяся в металле ударная волна при подходе к свободной поверхности сохранит высокую интенсивность (давление на фронте ударной волны в несколько раз превосходит значение прочности материала), на тыльной стороне плиты образуется множественный откол, состоящий из нескольких параллельных слоев.

Экспериментально установлено, что суммарная толщина откола и количество откольных слоев зависят от профиля ударной волны, т. е. от степени затухания параметров ударной волны за ее фронтом, от интенсивности ударной волны у свободной поверхности плиты и величины критических разрушающих напряжений материала.

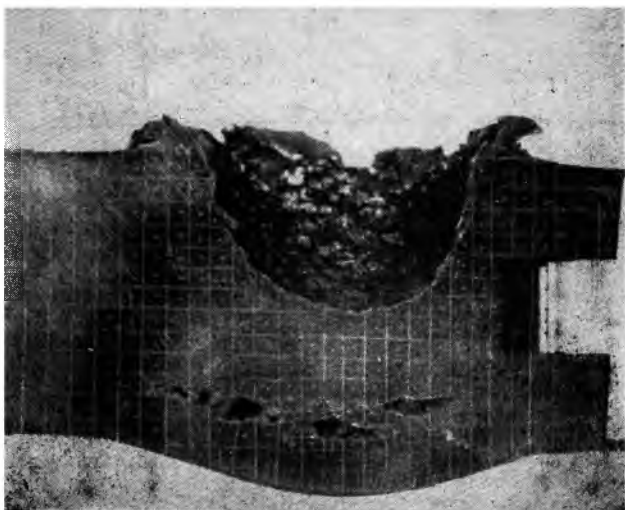


Рис. 1. Скорость удара 3500 м/сек, плита из стали 3 толщиной 28 мм, ударник стальной, $l_0=d_0=8$ мм

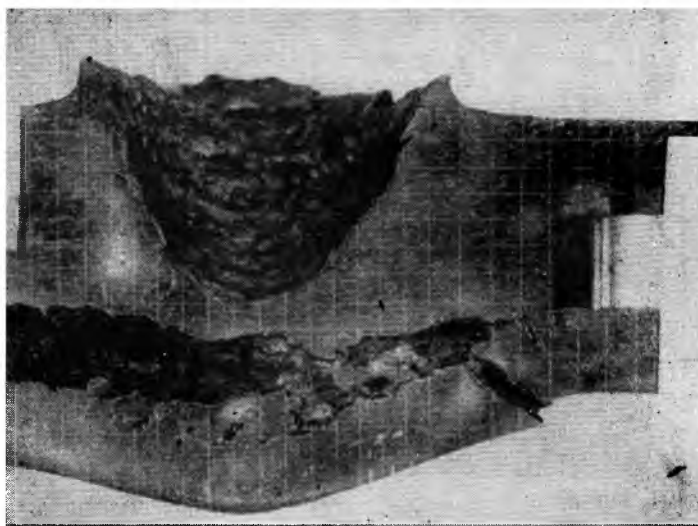


Рис. 2. Скорость удара 3500 м/сек, плита из стали 3 толщиной 27,5 мм, ударник медный, $l_0=d_0=8$ мм.

Опыты указывают на следующую закономерность: с ростом скорости при заданной толщине плиты высота первого откольного слоя убывает, а общее число отколов возрастает. При меньших скоростях удара образуется откол в 1—2 слоя; с ростом скорости удара толщина слоев уменьшается, а число их увеличивается.

На рис. 1—6 даны фотографии разрезов стальных и свинцовых плит, на которых видны трещины и отколы, образовавшиеся при скорости удара 2000—6000 м/сек.

Эксперименты для цилиндрических ударников выполнены на легкогазовой баллистической установке, метавшей ударники со скоростью 3—7 км/сек. Система измерения скорости в опытах позволила фиксировать состояние и положение ударника в двух точках траектории у дульного среза ствола с помощью теневых фотографий и время движения ударника между этими точками. Выбор методики измерения скорости ударника осуществлялся из соображений нечувствительности системы измерения к действию ярко светящейся ионизированной струи плотного газа, в которой движется ударник, а также к действию сильных магнитных полей, возникающих при разрядке конденсаторов.

Начальные параметры ударных волн, распространяющихся в плите и ударнике при соударении в диапазоне скоростей 2—10 км/сек (опыты рис. 1—6), приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Скорость удара, км/сек	<i>Al</i> → <i>Pb</i>	<i>Cu</i> → <i>Pb</i>	<i>Pb</i> → <i>Pb</i>	<i>Al</i> → <i>Al</i>	<i>Cu</i> → <i>Al</i>
	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 0,24$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 0,80$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 1,00$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 1,00$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 3,28$
2	0,25	0,41	0,40	0,18	0,28
	7,1 3,1	5,3 3,6	3,5	6,6	4,8 7,1
3	0,43	0,77	0,72	0,31	0,46
	8,0 3,6	6,0 4,3	4,2	7,3	5,3 8,0
4	0,64	1,16	1,10	0,45	0,68
	8,9 4,1	6,7 4,9	4,8	8,0	5,8 9,0
5	0,89	1,62	1,55	0,60	0,94
	9,8 4,5	7,4 5,6	5,5	8,7	6,3 9,9
6	1,17	2,14	2,08	0,79	1,21
	10,7 5,0	8,2 6,2	6,1	9,4	6,8 10,8
7	1,48	2,75	2,68	0,98	1,53
	11,6 5,4	8,9 6,8	6,7	10,1	7,3 11,7
8	1,82	3,42	3,35	1,20	1,87
	12,5 5,8	9,7 7,4	7,4	10,8	7,8 12,6
9	2,21	4,16	4,09	1,44	2,24
	13,4 6,2	10,5 8,1	8,0	11,5	8,3 13,6
10	2,62	4,96	4,90	1,69	2,64
	14,4 6,7	11,2 8,7	8,6	12,2	8,8 14,4

Расчет начальных параметров ударных волн в металлах при соударении выполняется по формулам:

$$U_0 = U_y + U_n \quad (1)$$

$$D_y = C_{0y}^1 + \lambda_y u_y; \quad D_n = C_{0n}^1 + \lambda_n u_n; \quad (2)$$

$$P_y = P_n = \rho_{0y} D_y U_y = \rho_{0n} D_n U_n = \rho_{0y} [C_{0y}^1 + \lambda_y U_y] U_y = \rho_{0n} [C_{0n}^1 + \lambda_n U_n] U_n = \rho_{0y} [C_{0y}^1 + \lambda_y (U_0 - U_n)] (V_0 - U_n); \quad (3)$$

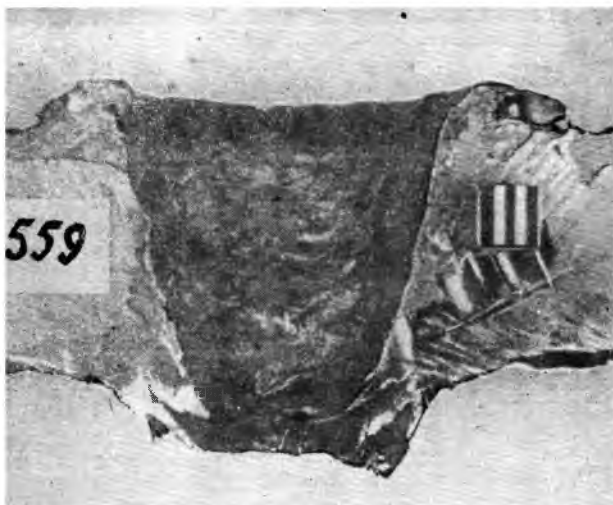


Рис. 3. Скорость удара 1700 м/сек, плита из свинца толщиной 27 мм, ударник свинцовый, $l_0=d_0=7,9$ мм.

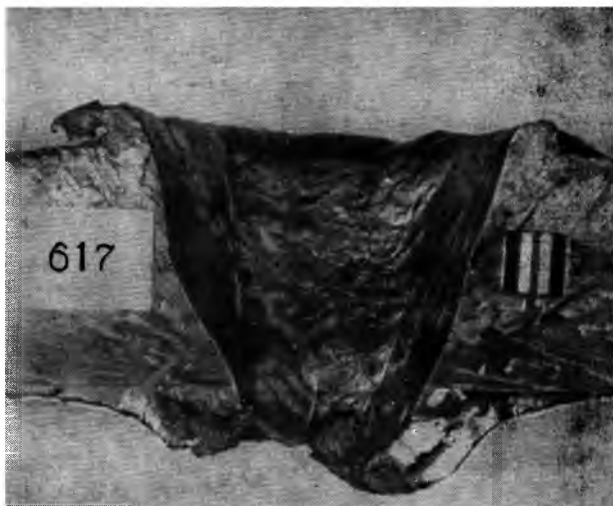


Рис. 4. Скорость удара 1870 м/сек, плита из свинца толщиной 32 мм, ударник медный, $l_0=d_0=7,9$ мм



Рис. 5. Скорость удара 5100 м/сек, плита из свинца толщиной 41,5 мм, ударник стальной, $l_0=d_0=5$ мм

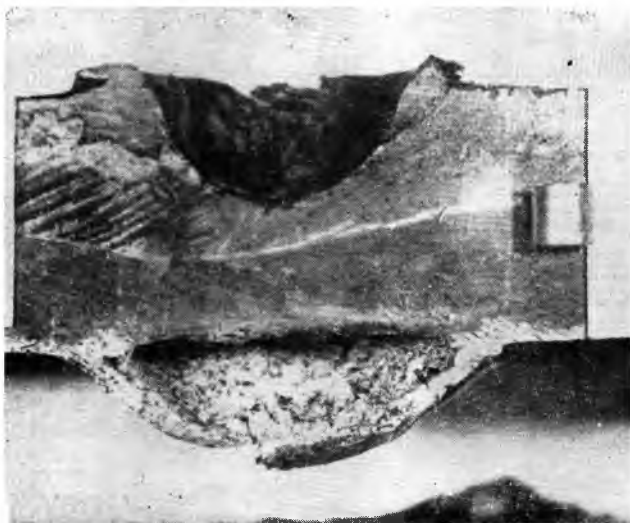


Рис. 6. Скорость удара 6000 м/сек, плита из свинца толщиной 25 мм, ударник алюминиевый, $l_0=d_0=6$ мм

Т а б л и ц а 2

Скорость удара, км/сек	$Al \rightarrow Ст-3$	$Ст-3 \rightarrow Ст-3$	$Cu \rightarrow Ст-3$	$Pb \rightarrow Ст-3$
	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 0,35$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 1,00$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 1,14$	$\frac{\rho_{0y}}{\rho_{0n}} = 1,45$
2	0,26	0,42	0,45	0,42
	7,1 5,1	5,4	5,3 5,5	3,6 5,4
3	0,44	0,73	0,77	0,72
	8,0 5,4	6,2	6,0 6,3	4,2 6,1
4	0,65	1,09	1,16	1,10
	8,9 6,0	7,0	6,7 7,1	4,8 7,0
5	0,90	1,52	1,60	1,54
	9,8 6,5	7,7	7,4 7,9	5,4 7,8
6	1,17	2,01	2,12	2,04
	10,7 7,1	8,5	8,1 8,7	6,1 8,6
7	1,48	2,56	2,68	2,62
	11,6 7,6	9,3	8,8 9,5	6,7 9,4
8	1,81	3,18	3,32	3,25
	12,5 8,2	10,1	9,6 10,3	7,3 10,2
9	2,18	3,85	4,02	3,97
	13,4 8,8	10,9	10,3 11,1	7,9 11,0
10	2,58	4,59	4,79	4,74
	14,2 9,4	11,7	11 11,9	8,5 11,9

$$U_n^2(\rho_{0n}\lambda_n - \rho_{0y}\lambda_y) + U_n(\rho_{0n}C_{0n}^1 + 2\rho_{0y}\lambda_y V_0 + \rho_{0y}C_{0y}^1) - \rho_{0y}V_0(C_{0y}^1 + \lambda_y V_0) = 0, \quad (4)$$

где

 V_0 — скорость удара; P — давление; ρ — плотность; D — скорость фронта ударной волны; U — массовая скорость;

$C_{0y}^1, C_{0n}^1, \lambda_y, \lambda_n$ — характеристики сжимаемости материалов ударника и плиты, входящие в ударную адиабату.

В табл. 1, 2 рассмотрено 9 вариантов соударяющихся пар при изменении отношения начальной плотности ударника к начальной плотности плиты от 0,24 до 4,20. Значения параметров ударных волн даны в виде дроби; в числителе — давление на контактной поверхности (M бар), в знаменателе: первая цифра — скорость распространения переднего фронта ударной волны в ударнике в км/сек, вторая цифра — скорость распространения переднего фронта ударной волны в плите.

Сравнение опытных данных, полученных при внедрении ударников в полупространство и плиты ограниченной толщины, говорит об увеличении влияния тыльных эффектов с ростом скорости на результат взаимодействия соударяющихся пар.

В табл. 3 представлены опытные данные об относительной глубине кратера L_k/d_0 и относительной толщине пробиваемой плиты b/d_0 для одноплотных соударяющихся пар металлов ($Ст-3 \rightarrow Ст-3$, $Cu \rightarrow Cu$, $Al \rightarrow Al$) и разноплотной пары ($Ст-3 \rightarrow Pb$) при цилиндрическом ударнике, иллюстрирующие рост b/L_k с увеличением скорости удара.

Для успешного описания откольных явлений, вызванных сильными волнами, необходимо знать законы распространения, затухания и отражения сильных ударных волн.

Таблица 3

	Скорость, км/сек						
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Cu→Cu</i>							
L_K/d_0	0,92	1,50	1,98	2,40	2,65	2,83	3,00
b/d_0	1,10	1,90	2,52	3,10	3,55	4,05	4,45
b/L_K	1,20	1,27	1,27	1,29	1,35	1,43	1,48
<i>Al→Al</i>							
L_K/d_0	0,85	1,30	1,68	2,00	2,30	2,50	2,70
b/d_0	1,05	1,77	2,35	2,87	3,35	3,75	4,15
b/L_K	1,24	1,31	1,40	1,43	1,43	1,50	1,53
<i>Cm-3→Cm-3</i>							
L_K/d_0	0,60	1,15	1,53	1,82	2,05	2,23	2,40
b/d_0	0,75	1,50	2,10	2,55	3,00	3,40	3,80
b/L_K	1,25	1,30	1,37	1,40	1,46	1,53	1,58
<i>Cm-3→Pb</i>							
L_K/d_0	2,20	2,85	3,10	2,23	3,35	3,50	3,60
b/d_0	2,72	3,70	4,26	4,74	5,16	5,52	5,86
b/L_K	1,20	1,30	1,37	1,45	1,52	1,57	1,60

Обычно под сильными ударными волнами в металлах понимают волны напряжений, движение среды за которыми можно описывать уравнениями гидродинамики, т. е. рассматривать среду как идеальную сжимаемую жидкость. Для большинства металлов давление на фронте таких волн порядка 0,2–0,3 Мбар.

Несмотря на значительное количество экспериментальных работ по исследованию механизма откола, его количественные критерии до сих пор не выявлены. Явление откола описывается лишь в основном качественно. Такое состояние вопроса при описании этого важного явления связано с большими математическими трудностями, возникающими при попытке учета даже только основных факторов, влияющих на процесс откола, а также с тем, что еще не до конца ясна физика процесса, в частности, неясно, каким образом происходит взаимодействие боковых волн разгрузки с ударным фронтом.

Особенно сильны различия в оценке величин критических разрушающих напряжений $P_{кр}$, полученных разными авторами. Эти различия можно объяснить сложностью процесса откола, разной методикой проведения экспериментов, а также тем, что пригодные для анализа эксперименты и теория основаны на распространении плоских ударных волн, возникающих при подрыве плоского заряда или в результате удара плоских пластин бесконечных размеров; при этом исключаются из рассмотрения боковые волны разрежения. Такая идеализация приводит к определенным ошибкам.

Для определения $P_{кр}$ большинством авторов используется метод, основанный на измерении скорости движения тыльной поверхности преграды при выходе на нее ударной волны [7, 8]. Разработано несколько методов измерения скорости свободной поверхности: метод скоростного фотографирования, варианты емкостного метода, метод электроконтактных датчиков.

Наличие у материала прочности приводит к тому, что после отражения ударной волны от свободной поверхности преграды скорость свободной поверхности убывает от максимального значения W_0 до некоторого значения W_1 , при котором происходит откол. Разность этих скоростей и определяет величину критических разрушающих напряжений

$$P_{кр} = \rho_0 C_0 \frac{W_0 - W_1}{2}$$

Значения $P_{кр}$, полученные различными авторами для ряда металлов, приведены в табл. 4.

Таблица 4

№ п.п.	Схема опыта	Источники	Толщина пластинки, мм	Толщина преграды, мм	$P_{кр}$
1	Удар медной пластиной по преграде из меди со скоростью 2,7 км/сек	8	2,0	10,0	78,0
2	Удар медной пластиной по преграде из меди со скоростью 2,4 км/сек	8	5,0	10,0	150,0
3	Подрыв заряда на медном цилиндре	2	—	—	35,5
4	Подрыв заряда на стальном цилиндре	8	—	13,0	55
5	Нагружение взрывом цилиндров:				
	Сталь V-10	7	—	—	48,0
6	Сталь 45	7	—	—	24,5
7	Медь М-1	7	—	—	13,5
8	Алюминий	7	—	—	14,5
9	Свинец	7	—	—	6,0
10	Сталь 40X	8	—	20,0	29,0
11	Сталь 45	8	—	20,0	21,5
12	Сталь 45	—	—	—	29,4

Расчеты $P_{кр}$ показывают, что величина критических разрушающих напряжений для металлов в случае подрыва или удара не является постоянной характеристикой прочности материала, а меняется в достаточно широких пределах в зависимости от градиента (от скорости деформирования) или от времени разрушения. Предельное значение динамической прочности материала определяется, очевидно, положением минимума кривой расширения для металла в области отрицательных давлений, т. е. его теоретической прочностью.

Эксперимент показывает [8], что при подрыве заряда на поверхности медных преград толщиной 10—40 мм значения $P_{кр}$ колеблется в пределах 30—35 кбар, при этом скорость деформирования $\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ сек}^{-1}$. В случае удара пластинкой скорость деформирования увеличивается до 10^7 сек^{-1} , а $P_{кр}$ колеблется в пределах 70—150 кбар.

Систематизация экспериментальных исследований по изучению эффекта откола при соударении с бойками различной геометрии пред-

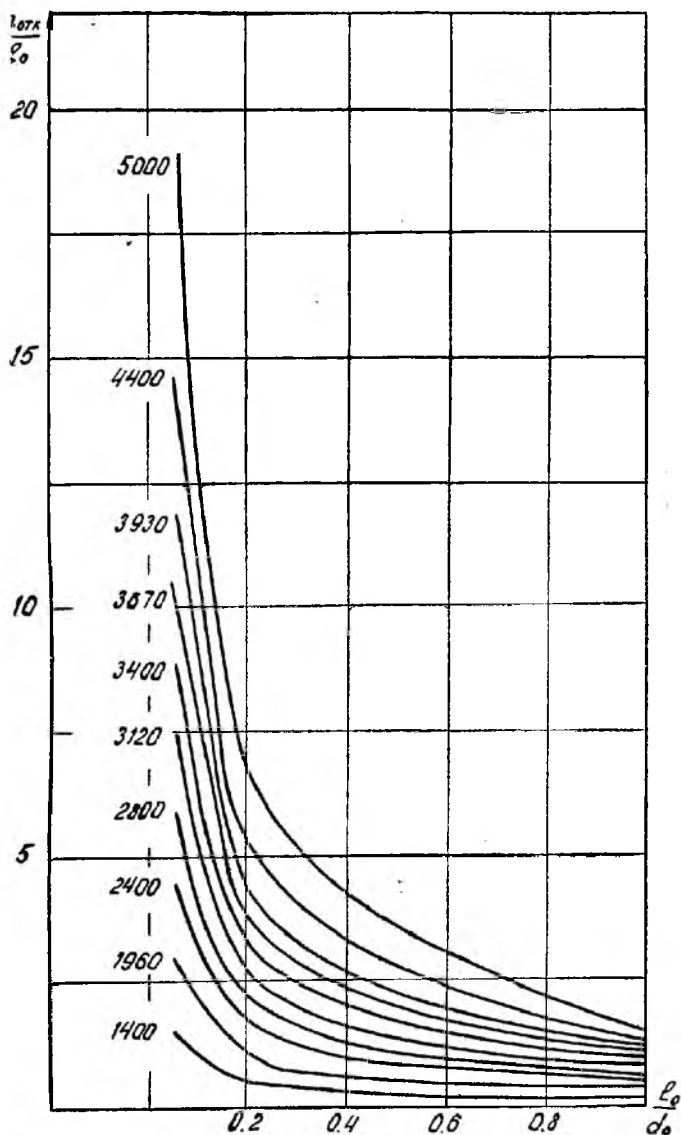


Рис. 7. Функции, связывающие относительную толщину откола с геометрией элемента для скорости удара 1400—5000 м/сек

ставлена в виде графика на рис. 7. Для стальных преград и бойков на рис. 7 построены функции, связывающие относительную толщину откола с геометрией бойка при постоянной кинетической энергии уда-

ра (l_0 —высота бойка, d_0 —диаметр). Функции построены для скоростей удара от 1400 до 6200 м/сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианкин Э. И., Степанов Ю. С. О глубине пробивания при ударе метеорных частиц. ИСЗ, в. 15, 1963.
 2. Альтшулер Л. В., Новиков С. А., Дивнов И. И. Связь критических разрушающих напряжений со временем разрушения при взрывном нагружении металлов ДАН СССР, т. 166, № 1, 1966.
 3. Белинский И. В., Христофоров Б. Д. О затухании плоской ударной волны в алюминии. ПМТФ, № 31, 1967.
 4. Fowles G. R. Attenuation of the Shock Wave produced in a Solid by a Flying Plate. J. Appl. Phys., v. 31, № 4, 1964.
 5. Chou P. C., Allison F. E. Strong plane Shock produced by Hypervelocity Impact and Late-Stage-Equivalence. J. Appl. Phys., v. 37, № 2, 1966.
 6. Козлов В. П. Два случая распространения ударной волны по металлу. ЖТФ, т. 36, в. 7, 1967.
 7. Вятман Ф. Ф., Иванов М. И., Иоффе Б. С. Сопротивление разрушению пластических металлов при импульсном нагружении. ФММ, т. 18, в. 5, 1964.
 8. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении. ФММ, т. 22, в. 4, 1961.
-