

Марка стали	Титан (α -фаза)	Сталь 30ХГСА	Сталь X18H10T	Титан BT-14
$\frac{m^*}{m_0}$	18,5	20	5	10

вила соответственно 16 и 13%. Из таблицы (значений m^*/m_0) и данных работы [3] можно видеть, что внешнее поле $E_{ст}$ зависит от эффективной массы электрона.

Принципиальное отличие полученного результата от известной зависимости $E_{ст}$ от массы свободного электрона m_0 в классических электронно-инерционных опытах [5], возможно, связано с тем, что в опытах Толмена—Стьюарта и Барнета решетка ускорялась относительно носителей тока как целое, без локальных возмущений. Это приводило к тому, что инертные свойства носителей тока в кристалле определялись массой свободного электрона m_0 . В условиях распространения по неподвижному кристаллу локального возмущения кристаллического потенциала инерционные свойства носителей тока, как показали эксперименты, зависят от эффективной массы носителей тока, описывающей взаимодействие электронов с кристаллическим потенциалом.

Поступила 22 I 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеев В. И., Иванов А. Г. ЭДС при ударном сжатии вещества.— УФН, 1976, т. 119, с. 75.
2. Минеев В. И., Иванов А. Г., Лисицын Ю. В. и др. ЭДС при ударном сжатии лантаноидов.— ЖЭТФ, 1974, т. 61, с. 254.
3. Кашаев Ю. Г., Новиков С. А., Симицын В. А. Об использовании электронно-инерционного эффекта при ударном нагружении для измерения деформации стержней.— ПМТФ, 1977, № 2.
4. Кашаев Ю. Г. Способ измерения параметров ударного процесса на металлическом образце. Авт. свид. № 620849. Бюл. изобр., 1978, № 31.
5. Цидильковский П. М. Электроны и дырки в поле сил инерции.— УФН, 1975, т. 115, с. 321.
6. Материалы в машиностроении. Т. 1. М., Машиностроение, 1965.
7. Dault J. G.— In: Progress in low temperature physics. Vol. 1. Amsterdam, 1955.
8. Петушков В. Г. О выборе образца для высокоскоростных испытаний на растяжение.— Проблемы прочности, 1970, № 4.
9. Hauser F. E. Techniques for measuring stress-strain relations at high strain rates.— Exptl Mech., 1968, vol. 6, N 8.
10. Таблицы физических величин. М., Атомиздат, 1976.

УДК 532.593 : 620.172

О РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВЗРЫВОМ ЛИСТОВОГО ЗАРЯДА ВВ

В. К. Голубев, С. А. Новиков, Л. М. Симицына
(Москва)

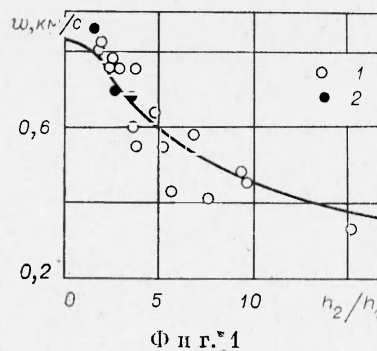
Нагружение взрывом листового заряда ВВ довольно широко применяется в практике взрывных экспериментов. Это, например, упрочнение и сварка взрывом [1], исследование разрушения металлов при отколе [2—4]. Совмещение этого простого метода нагружения с расчетом течения нагружаемого материала позволило получить сравнительные результаты по откольному разрушению ряда металлов и полимеров, которые, в свою очередь, могут быть сопоставлены с результатами, полученными при других условиях импульсного механического нагружения (взрыв блока ВВ, удар пластиной).

Постановка экспериментов по нагружению пластин взрывом листового заряда пластического ВВ и реализующаяся при этом схема распространения волн приведены в работе [2]. Образцы исследуемых металлов нарезаются из соответствующих прутковых материалов, пластмасс — из листовых. Размеры нагружаемой поверхности образцов выбирались со значительным запасом для устранения влияния боковой разгрузки и начальной нестационарной зоны нагружения на процесс откольного разрушения. Инициирование нагружающего заряда проводилось посредством генератора линейной детонационной волны из перфорированного пластического ВВ [5]. После нагружения визуально наблюдался характер откольного разрушения и измерялась толщина откольного слоя.

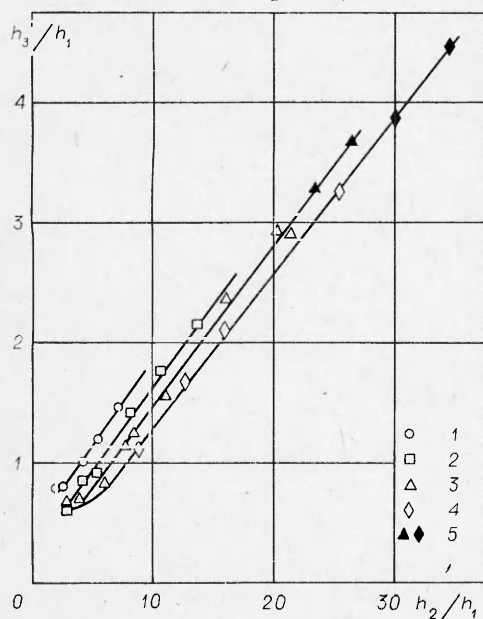
Численный расчет поля течения в продуктах взрыва и в нагружаемых материалах проводился методом характеристик. Использованный метод расчета подробно описан в работах [6, 7]. Изэнтропа расширения продуктов взрыва принималась в виде кубической политропы, а уравнения состояния исследуемых материалов без учета эффектов прочности и изменения энтропии во фронте ударной волны принимались в виде известных линейных $D-u$ -соотношений между волновыми и массовыми скоростями, причем допускалась их экстраполяция в область отрицательных давлений. В расчетах определялись максимальное отрицательное давление p в плоскости, соответствующей откольному разрушению, и градиент давления $\Delta p/\Delta l$ в растягивающем импульсе, форма которого в данном случае близка к треугольной. Сопоставление этих параметров, характеризующих разрушающий импульс растяжения, успешно проводилось в работе [8] при нагружении ряда металлов взрывом блока ВВ.

На фиг. 1 приведены расчетная зависимость скорости свободной поверхности, нагружаемой взрывом листового заряда ВВ алюминиевой пластины, от безразмерной толщины пластины h_2/h_1 (h_1 — толщина слоя ВВ, h_2 — толщина алюминиевой пластины) и результаты измерения скоростей тонких искусственных отколов (1 — алюминиевый сплав АМц [2], 2 — алюминиевый сплав АМг [3]). Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов указывает на возможность применения используемого метода расчета для пластичных металлов и полимеров. В случае нагружения металлов, обладающих значительной сдвиговой прочностью, затухание ударной волны при ее распространении по материалу будет более интенсивным, и расчет может дать лишь верхнюю оценку для амплитуды выходящей на свободную поверхность пластины ударной волны.

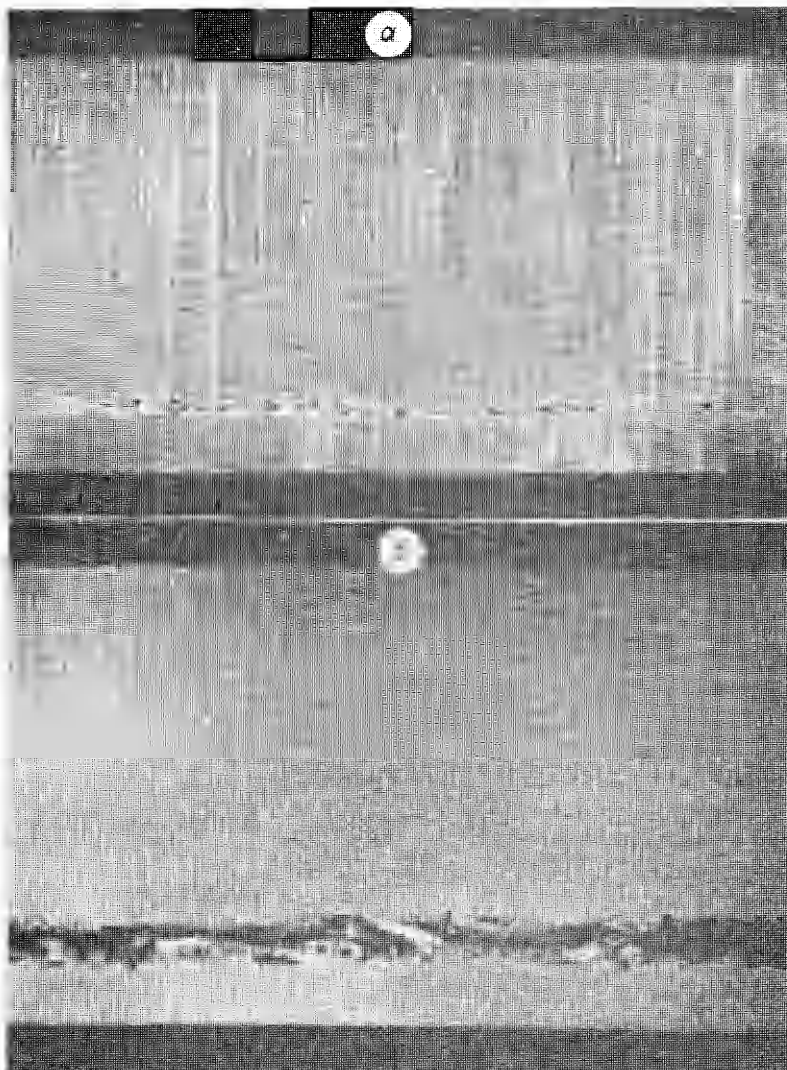
На фиг. 2 приведены результаты экспериментов с алюминием



Фиг. 1



Фиг. 2



Ф и г. 3

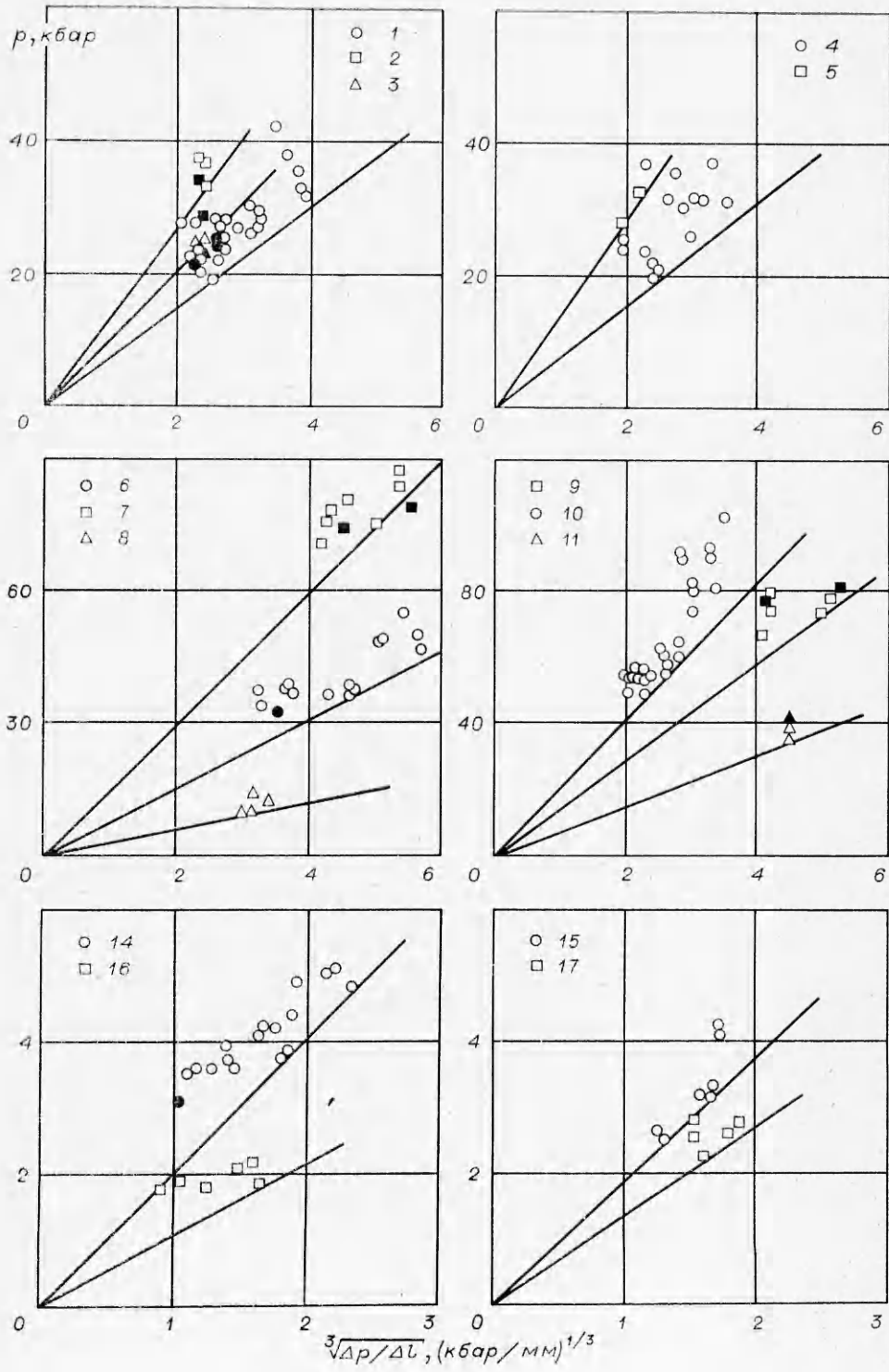
АД1 (h_3 — толщина первого откольного слоя (среднее значение толщины, определяемое не менее чем по десяти измерениям), 1 — $h_2 = 2$ мм, 2 — 4 мм, 3 — 8 мм, 4 — 12 мм, 5 — отсутствие визуально наблюдаемого расслоения), указывающие на существование масштабного эффекта при откольном разрушении алюминия, наблюдавшегося также в экспериментах по соударению алюминиевых пластин [9, 10]. Аналогичный эффект наблюдался и для других исследованных в работе материалов. Полученные линейной экстраполяцией значения h_3 , соответствующие на фиг. 2 отсутствию визуально наблюдаемого расслоения, соответствуют наиболее ослабленным к отколу сечениям. Это подтверждается при более детальном рассмотрении шлифов под микроскопом. На фиг. 3, а ($h_1 = 0,34$ мм, $h_2 = 8$ мм) в образце наблюдается уже полностью сформировавшаяся зона откольного разрушения, хотя расслоение, т. е. откол, происходит лишь при последующем увеличении интенсивности нагружения (фиг. 3, б, $h_1 = 0,37$ мм, $h_2 = 8$ мм).

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Материал	ρ , г/см ³	c_0 , км/с	λ	h_1 , мм	h_2 , мм	γ_{\min} , Дж/см ²
1	Алюминий АД1	2,71	5,25	1,39	0,3—2,6	2—12	1,25
2	Алюм. спл. Д16 (зак.)	2,78	—	—	0,5—1,8	10	7,10
3	Алюм. спл. Д16 (отж.)	—	—	—	0,4—1,1	10	2,65
4	Алюм. спл. АМц [2]	2,73	—	—	0,5—2,2	2—15	1,21
5	Алюм. спл. АМг [3]	2,64	—	—	3—5	8	6,53
6	Медь М1	8,93	3,95	1,50	0,3—1,5	2—12	0,60
7	Никель НП2	8,86	4,62	1,52	0,3—1,6	2—4	2,97
8	Свинец ПС1	11,3	2,03	1,52	0,3—0,5	8—12	0,11
9	Сталь Ст. 3	7,85	4,57	1,49	0,3—1,6	2—4	3,30
10	Сталь Ст. 3 [3, 4]	—	—	—	3—5	5—40	9,15
11	Чугун СЧ18-36	—	—	—	0,5—0,8	4	0,43
12	Сталь 12Х18Н10Т	7,80	—	—	0,8—2,6	2—4	>35
13	Титаны ВТ3, ВТ14	4,51	5,22	0,77	0,8—2,6	2—4	>47
14	Фторопласт-4	2,19	1,53	1,95	0,3—0,6	3—15	0,28
15	Плексиглас	1,18	2,59	1,51	0,3—0,9	10—20	0,15
16	Полиэтилен	0,92	2,05	1,95	0,3—0,6	5—20	0,05
17	Текстолит ПТ	1,36	2,65	1,49	0,3—0,5	10—15	0,05

Исходные данные, использованные в расчетах, и диапазоны изменения значений h_1 и h_2 приведены в табл. 1 (ρ — плотность, c_0 , λ — коэффициенты линейных $D-u$ -соотношений), а результаты расчетной обработки экспериментальных данных приведены на фиг. 4 (цифры на фиг. соответствуют номерам материалов в табл. 1) в координатах ($\sqrt[3]{\Delta p/\Delta l}$, p). Выбор координат обусловлен попыткой провести систематизацию полученных результатов на основании предложенного в работе [11] энергетического критерия откольного разрушения, представляющего собой уравнение баланса энергии при разрушении. Применительно к результатам данной работы энергетический критерий откола представляется в виде $p^3/(\Delta p/\Delta l) = 6\sigma_s^2 \gamma$, т. е. запас упругой энергии в импульсе растяжения приравнивается работе γ , совершаемой при отрыве откольного слоя.

Значительный разброс полученных результатов (фиг. 4) показывает, что они не могут быть однозначно представлены в виде четких зависимостей $p(\Delta p/\Delta l)$, что было сделано в работе [8]. Величина параметра γ , таким образом, может значительно и произвольным образом изменяться в экспериментах, проводимых с образцами, изготовленными из одного и того же материала. Так, для алюминия АД1 и фторопласта-4, с которыми было проведено довольно значительное число опытов, величина параметра γ изменяется в пределах 1,3—7,1 и 0,3—1,1 Дж/см² соответственно. Для сравнения исследованных материалов целесообразно, по-видимому, использовать нижнее значение параметра γ , которое можно получить для каждого из материалов, разграничивая зоны откольного разрушения и сохранения сплошности на фиг. 4. Величина минимальной эффективной энергии разрушения γ_{\min} будет в этом случае характеризовать необходимые, но недостаточные условия откольного разрушения исследованных материалов при аналогичных или сходных условиях импульсного механического нагружения. Полученные значения величины γ_{\min} приведены в табл. 1. Следует отметить, что образцы титана и стали 12Х18Н10Т толщиной до 4 мм не претерпевали откольного разрушения, а оценочные значения γ_{\min} для них получены, когда условно предполагалось наиболее ослабленным среднее сечение образца ($h_3 = h_2/2$). Для создания условий импульсного механического нагружения материалов использовалось пластическое ВВ, имеющее плотность 1,52 г/см³ и скорость детонации 7,8 км/с. При расчетной обработке экспериментальных результатов работ [2—4] расчет проводился для использованных в этих работах ВВ.



Ф и г. 4

Отметим некоторые особенности визуально наблюдаемого характера разрушения исследованных материалов. Для металлов, за исключением стали Ст. 3 и чугуна, внешний вид поверхности разрушения матовый, волокнистый, что указывает на вязкий характер их откольного разрушения. На поверхности разрушения Ст. 3 и чугуна в отраженном свете можно наблюдать отблески от плоскостей скола, что указывает на хрупкий характер разрушения. Следует отметить более грубый, рваный вид поверхности разрушения для полиэтилена, менее грубый для фторопласта и довольно ровный для плексигласа и текстолита, который разрушается по слоям связующего. В случае достаточной интенсивности выходящей на свободную поверхность ударной волны в плексигласе и текстолите наблюдался четко выраженный двойной откол, причем толщина второго откольного слоя не менее чем вдвое превышала толщину первого, а во фторопласте и полиэтилене за откольным слоем наблюдалась зона расслоенного материала. Для алюминия же, например, второй откольный слой имел примерно вдвое меньшую толщину, чем первый. Наблюдаемые эффекты объясняются в работе [12] с позиции кинетического подхода и связаны, по-видимому, с различием механизмов откольного разрушения хрупких и вязких материалов.

Представляется целесообразным сравнить результаты, полученные в данной работе, с результатами, полученными при других условиях импульсного механического нагружения. При нагружении ударом пластины форма растягивающего импульса близка к прямоугольной, а при нагружении взрывом листового заряда и блока ВВ — к треугольной. Энергетический критерий для этих случаев записывается соответственно в виде $p^2l = 2\rho c_0^2 \gamma$ и $p^2l = 6\rho c_0^2 \gamma$ (l — длина растягивающего импульса, в данной работе $l = h_3/\cos(\arcsin(c_0/D))$, где D — скорость детонации ВВ). Результаты по нагружению ударом пластины, взрывом блока ВВ и полученные в данной работе при нагружении взрывом листового заряда ВВ значения γ_{\min} приведены в табл. 2. Можно отметить различие в значениях определенной таким образом эффективной энергии разрушения, которое связано, по-видимому, в большей степени с изменением масштаба системы, чем с изменением других параметров нагружения (интенсивность нагружения, вид напряженно-деформированного состояния и др.). На это указывает также, например, повышение величины γ_{\min} до 9 Дж/см² для Ст. 3 [3, 4] при аналогичном используемому в данной работе методе нагружения и увеличении масштаба системы и снижение величины γ_{\min} для алюминия 6061-T6 до 1 Дж/см² [14] при нагружении ударом пластины и уменьшении масштаба. Столь существенная связь эффективной энергии откольного разрушения материалов с масштабом системы обусловлена, по-видимому, тем, что начальная стадия процесса разрушения — зарождение и развитие пор в случае вязкого либо трещин в случае хрупкого характера разрушения происходит в объеме, характерный размер которого сравним с размером нагружающего импульса растяжения [15]. Таким образом, можно предположить, что поглощенная на начальной стадии энергия пропорциональна масштабу системы, а поглощенная на конечной стадии, при слиянии повреждений в магистральную трещину, зависит от масштаба

Т а б л и ц а 2

Материал	Результаты данной работы	Нагружение взрывом блока ВВ	Нагружение ударом пластины	Материал	Результаты данной работы	Нагружение взрывом блока ВВ	Нагружение ударом пластины
Алюминий	1,3	1,7[8]	15[13]	Свинец	0,1	1,4—	1,6 —
Медь	0,6	4,4 —	24 —	Сталь Ст. 3	3,3		32 —
Никель	3,0	9,2 —	40 —	Плексиглас	0,15		0,65 [10]

в гораздо меньшей степени. На это указывает и более слабо выраженный (см. фиг. 2) по сравнению с чисто энергетическим [11] масштабный эффект при откольном разрушении, наблюдавшийся и в других работах [9, 10, 14].

Таким образом, получаемая из экспериментов по отколу эффективная энергия разрушения, смысл которой раскрывается в работе [16], хотя и может служить мерой сравнения условий откольного разрушения различных материалов при одинаковых условиях нагружения, но в большей степени характеризует свойства нагружаемой системы, чем собственно свойства материала. Значения энергии разрушения, характеризующие свойства материала, можно получить, если уменьшить масштаб системы или каким-либо образом экстраполировать имеющиеся результаты к условиям, когда разрушение локализуется в зоне с характерным размером порядка размера зерна. В этом смысле представляется интересным сравнение эффективной энергии откольного разрушения с получаемой в условиях плоской деформации энергией распространения единичной трещины G_{1c} . Приведенные в работе [17] значения G_{1c} для алюминия 7075-T6, низколегированных сталей и плексигласа составляют соответственно 0,8; 1 и 0,07 Дж/см² и, по-видимому, являются экстремальными для величины γ при уменьшении масштаба.

Поступила 31 I 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. М., Наука, 1972.
2. Ментешов Е. В., Ратников В. П. и др. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину.— ФГВ, 1967, № 2.
3. Рыбаков А. П., Ментешов Е. В., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на металлические пластины.— ФГВ, 1968, № 1.
4. Рыбаков А. П. Отколы в стали при нагружении с помощью взрыва листового заряда ВВ и удара пластиной.— ПМТФ, 1977, № 1.
5. Шалль Р. Физика детонации.— В кн.: Физика быстропотекающих процессов. Т. 2. М., Мир, 1971.
6. Erkman J. O. Explosively induced nonuniform oblique shocks.— Phys. Fluids, 1958, vol. 1, N 6.
7. Привалов Ю. М., Солоненко В. Р., Тарасов Б. А. Воздействие скользящей детонации на сжимаемую стенку.— ФГВ, 1976, № 3.
8. Breed V. R., Mader C. L., Venabl D. Technique for the determination of dynamic-tensile-strength characteristics.— J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, N 8.
9. Butcher V. M., Barker L. M., Munson D. E., Lundergan C. D. Influence of stress history on time-dependent spall in metals.— AIAA Journal, 1964, vol. 2, N 6.
10. Тарасов Б. А. О количественном описании откольных повреждений.— ПМТФ, 1973, № 6.
11. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении.— ФГВ, 1975, № 3.
12. Нпкнфоровекпй В. С. О кинетическом характере хрупкого разрушения твердых тел.— ПМТФ, 1976, № 5.
13. Новпков С. А., Голубев В. К., Соболев Ю. С., Спнпцын В. А. Влияние температуры на величину разрушающих напряжений при отколе в металлах.— В кн.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Вып. 11. Горький, изд. ГГУ, 1979.
14. Cohen L. J., Berkowitz H. M. Time-dependent fracture criteria for 6061-T6 aluminum under stress-wave loading in uniaxial strain.— Int. J. Fracture Mech., 1974, vol. 7, N 2.
15. Barbee T. W., Seaman L., Crewdson R., Curran D. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals.— J. Materials, 1972, vol. 7, N 3.
16. Фадеенко Ю. И. Временные критерии разрушения в динамике твердого тела.— В кн.: Динамические задачи механики сплошных сред. Вып. 32. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1977.
17. Авербах Б. Л. Некоторые физические аспекты разрушения.— В кн.: Разрушение. Т. 1. М., Мир, 1973.