

ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ ПРИ ОТКОЛЕ В МЕДИ, АЛЮМИНИИ И СТАЛИ

В. И. Романченко, Г. В. Степанов

(Киев)

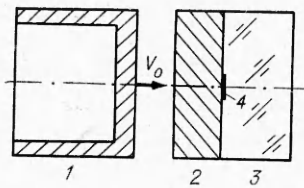
Интенсивные импульсные нагрузки ударного и взрывного характера, имеющие широкое применение в ряде областей современной техники, приводят к возникновению в материале конструкций специфического вида разрушения, называемого отколом, вызванного появлением растягивающих напряжений при взаимодействии встречных волн нагрузки [1—4].

В связи с этим представляет практический интерес исследование работоспособности материалов, выявление тех условий, при которых они не разрушаются под действием импульсных нагрузок. Самостоятельный научный интерес к исследованию откола обусловлен возможностью установления связи прочность — время при кратковременном воздействии (до 10^{-7} с) высоких уровней напряжений.

Развитие средств нагружения и методов регистрации параметров за фронтом ударных волн (именно там и происходит откол), применение непрерывных методов регистрации [5—8] позволяют продвинуться в этом направлении. Существенным прогрессом, с точки зрения авторов, явились исследования [9] с помощью лазерных интерферометров, которые позволили экспериментально зарегистрировать профили волн в процессе нагружения и определить по ним силовые и временные характеристики откольного разрушения. Однако использование акустического приближения авторами этой работы при обработке экспериментальных данных следует считать, по-видимому, лишь первым шагом для получения необходимой информации. В диапазоне давлений до 150 кбар, как известно, ударные волны в большинстве конструкционных материалов имеют упругоупругоупругую структуру, для которой характерно наличие упругой части — упругого предвестника и пластической волны, распространяющихся с разными скоростями. Акустическое приближение не учитывает это обстоятельство и может внести значительную погрешность, особенно при определении временных параметров нагрузки [8]. Кроме того, для численного счета различных задач, связанных с распространением упругоупругоупругих волн и разрушением тел (например, [10]), необходимо знание экспериментально определяемых свойств материалов, используемых в этих задачах в качестве параметров. Поэтому при обработке экспериментов следует использовать соответствующие модели среды.

В данной работе приводятся методика и результаты определения силовых и временных характеристик нагрузки при откольном разрушении меди, алюминиевого сплава В95 и стали, подвергнутых воздействию плоских ударных волн интенсивностью до 160 кбар. Материал рассматривается как упругоупругоупругое тело при нагружении и разгрузке.

Вследствие практической невозможности регистрации параметров нагрузки в области откола о них судили по изменению состояния на границе раздела испытуемого материала с материалом малой динамической жесткости. Схема эксперимента представлена на фиг. 1. Ударник 1 диаметром 90 мм разгонялся в пневмопороховой установке, обеспечивавшей высокую плоскостность соударения, до скорости V_0 около 900 м/с; t — x и p — U -диаграммы взаимодействия волн в образце 2 представлены на фиг. 2 (t — время, x — координата, p — напряжение, нормальное к фронту волны, U — массовая скорость). Точкам в p — U -плоскости соответствуют области на t — x -диаграмме. Для создания встречных волн разгрузки в образце, способных при взаимодействии вызвать разрушение, материал ударника должен иметь меньшую или близкую динамическую жесткость по отношению к образцу, «мягкий» материал 3 (фиг. 2) — значительно меньшую динамическую жесткость. По этой причине ударник



Ф и г. 1

изготавливали из алюминия либо из стали, в качестве «мягкого» материала использовали оргстекло. Для регистрации применяли диэлектрический датчик 4, позволявший непрерывно регистрировать изменение давления за фронтом ударных волн в течение длительного времени (около 10 мкс) [8]. Типичная осциллограмма опыта и фотография образца с отколом приведены на фиг. 3, а, б. Профиль напряжения на границе раздела образец — оргстекло, как следует из $t-x$ - и $p-U$ -диаграмм, приведен на фиг. 4. Момент времени t_1 соответствует приходу ударной волны на границу раздела, t_2 — приходу волны разгрузки от тыльной поверхности ударника, момент t_3 связан с достижением критических напряжений $\sigma_{кр}$ в плоскости откола (под критическими подразумеваются максимальные растягивающие напряжения). Зная величины напряжений в точках 1, 5, 6, ударные адиабаты и изэнтропы разгрузки соответствующих материалов, можно определить величину напряжений $\sigma_{кр}$ при разрушении. Как видно из фиг. 2, при пренебрежении искривлением характеристик в течение промежутка времени $\Delta t = t_3 - t_2$ в плоскости откола происходит изменение напряжений от давления ударного сжатия p_a до критической величины напряжений растяжения. Таким образом, по осциллограмме можно оценить среднюю скорость изменения нагрузки в плоскости откола

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_0 = \frac{|p_a| + |\sigma_{кр}|}{\Delta t}$$

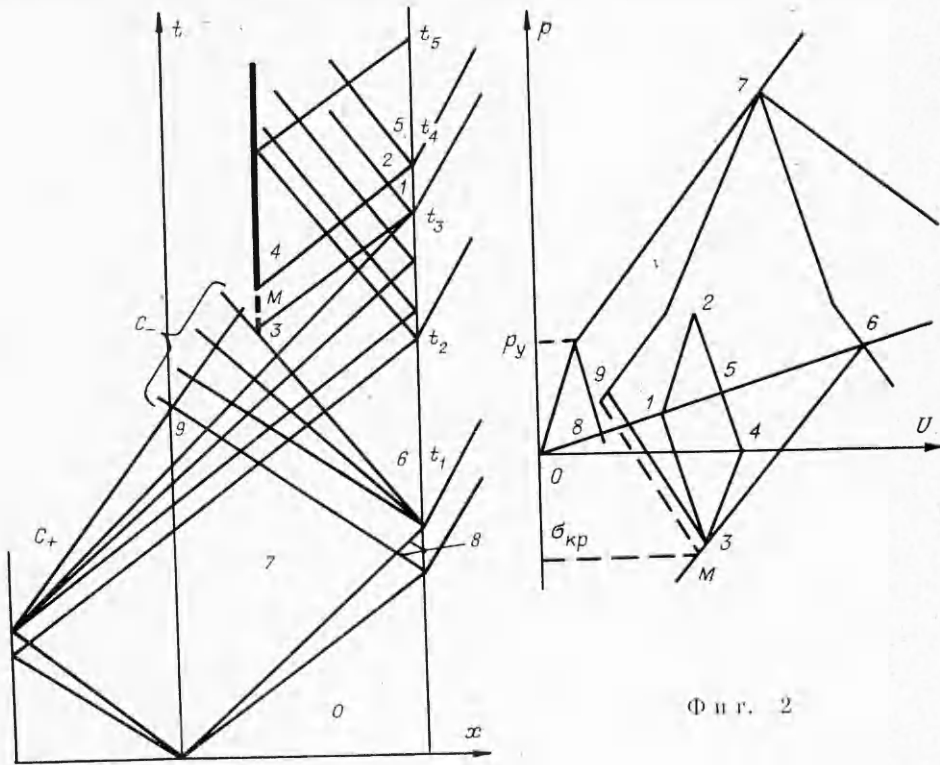
и скорость деформации

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho D^2} \left(\frac{dp}{dt}\right)_0,$$

где ρ — плотность; D — скорость ударной волны.

Как показали эксперименты, ударная волна в стали и алюминии имеет четкую упругопластическую конфигурацию. Поскольку измеряемые напряжения сравнимы с пределом упругости по Гюгонио p_y , поведение материалов описывалось теорией упругопластического деформирования. При нагружении материал вначале деформируется упруго до точки А (фиг. 5), далее пластически до точки В, соответствующей давлению ударного сжатия, при разгрузке из точки В — упруго на участке ВС, затем пластически до величины критических напряжений. Линия АВ превышает линию гидродинамического сжатия на $(2/3)\sigma_T = \text{const}$, т. е. принята схема идеальной упругопластичности материала (эффектом Баушингера пренебрегается). Величины напряжений в упругой и пластической волнах рассчитывали по известному соотношению $\Delta p = \rho D \Delta U$. В упругой области для стали $D = 6,1$ км/с, для алюминия $D = 6,4$ км/с, в пластической области соответственно 5,05 и 5,5 км/с. У меди не было обнаружено упругих свойств даже при небольших давлениях ударного сжатия, поэтому для нее была принята модель гидродинамической сжимаемости с $D = 4,15$ км/с. В качестве скоростей пластических волн в алюминии и меди взяты их средние значения в исследованном интервале давлений. Отклонение от среднего не превышало 5% для обоих металлов.

Так как при разрушении материал начинает деформироваться в обратном направлении (было растяжение, начинается сжатие), то более быстрое распространение по толщине откольного слоя упругой части откольного импульса приводит к его смещению относительно волны разгрузки, представленной семейством C_+ -характеристик, в результате чего



Ф и г. 2

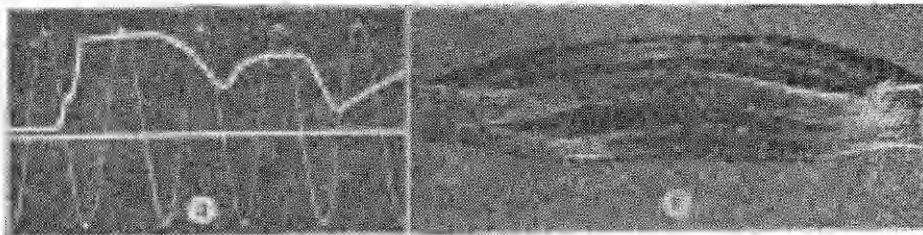
происходит более раннее изменение напряжения, и напряжение на границе раздела образец — оргстекло p_1 оказывается завышенным по сравнению с тем, которое соответствовало бы $\sigma_{кр}$ в точке M . Тогда величину $\sigma_{кр}$ представим в виде суммы

$$\sigma_{кр} = \sigma_3 + \Delta\sigma,$$

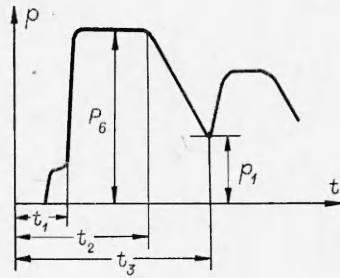
где σ_3 — величина растягивающих напряжений в точке 3 , для ее вычисления использовали формулу

$$\sigma_3 = (\alpha p_1 + p_6 + \rho D_{II}(U_1 - U_6))/(1 + \alpha), \quad \alpha = D_{II}/D_U,$$

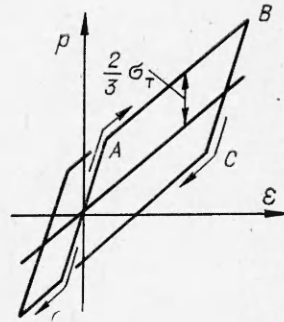
справедливую при $\sigma_{кр} < 2p_y$ и $p_a > 2p_y$, в противном случае линии $6-3$ и $1-3$ (см. фиг. 2) являются билинейными; D_U и D_{II} — скорости упругой и пластической волн в исследуемом материале; U_1 и U_6 — массовые скорости в «мягком» материале при давлениях соответственно p_1 и p_6 (для оргстекла принимали совпадение изэнтропы разгрузки с ударной адиабатой в $p-U$ -координатах, сведения о сжимаемости оргстекла взя-



Ф и г. 3



Ф и г. 4



Ф и г. 5

ты из работы [11]); $\Delta\sigma$ — изменение напряжений при переходе от точки Z к точке M :

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{dp}{dt} \right)_n \delta \left(\frac{1}{C_n} - \frac{1}{D_y} \right),$$

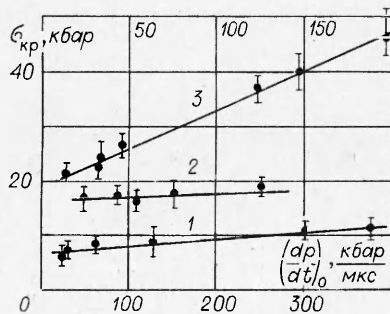
где $(dp/dt)_n$ — скорость изменения напряжений вдоль «хвостовой» C_- -характеристики; $(dp/dt)_n = (|p_6| + |\sigma_3|)/0,5 \Delta t$; C_n — скорость распространения возмущений вдоль C_+ -характеристики, проходящей через точку M (ее величину определяли экспериментально по осциллограмме опыта. Обычно она близка к скорости пластической волны); δ — толщина откола.

По скорости изменения нагрузки в плоскости откола возможно определить время нарастания растягивающих напряжений от нуля до $\sigma_{кр}$

$$t_n = \sigma_{кр} \left/ \left(\frac{dp}{dt} \right)_o \right.$$

Непосредственное измерение t_p проводили в экспериментах по схеме «искусственного» откола, суть которой состоит в том, чтобы обеспечить в опыте нулевую прочность материала на растяжение в плоскости предполагаемого откола. Положение последней определяли в опыте со сплошным образцом, затем идентичный образец разрезали по плоскости откола и проводили такой же опыт. Сравнение осциллограмм с непрерывной записью параметров за фронтом ударной волны в том и другом случаях позволяет определить t_p экспериментально.

Результаты исследований приведены на фиг. 6 (1 — медь, 2 — алюминий, 3 — сталь, верхняя шкала для алюминия), а также в таблице. В таблице приводятся усредненные данные по 2—4 опытам. Время спада



Ф и г. 6

растягивающих напряжений от $\sigma_{кр}$ до нуля t_c определяли по времени достижения максимума давления в откольном импульсе. Варьирование скорости изменения нагрузки осуществляли путем изменения толщины пары ударник — образец и скорости соударения. Толщину слоя оргстекла выбирали так, чтобы волна разгрузки от его свободной поверхности не влияла на измерения. Максимальная толщина образцов, использованных в опытах, ограничена условием одномерности деформации в течение всего времени регистрации (t_4 на фиг. 2). Для определения

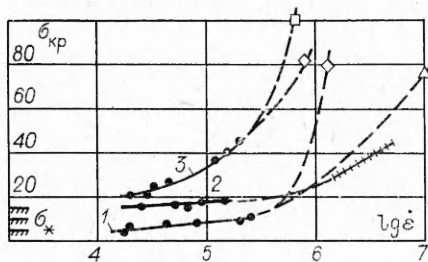
V_0 , м/с	Материал пары ударник-образец	Толщина, мм		$\left(\frac{dp}{dt}\right)_0$, кбар/мкс	t_p , мкс (расчет)	$\sigma_{кр} \sigma_*$, кбар	t_p , мкс («искусственный» откол)	t_c , мкс
		ударник	образец					
224	АЛ—СТ	10	15	—	—	15,2	—	—
358	СТ—СТ	2	10	238	0,16	37,2	—	0,1
383	АЛ—СТ	10	15	63	0,35	22,1	0,32	0,27
400	»	10	40	38,5	0,56	21,3	0,6	1,2
455	»	10	15	91,5	0,29	26,6	0,26	—
580	СТ—СТ	5	10	296	0,14	40,0	—	—
588	»	2	10	392	0,12	45,2	0,1—0,15	0,1
870	АЛ—СТ	10	40	67	0,37	24,5	—	~1
200	АЛ—АЛ	10	15	—	—	10,2	—	—
328	»	10	15	43	0,40	17,2	0,34	0,55
380	»	10	15	55	0,29	16,0	0,33	0,65
450	»	10	40	20,5	0,82	16,8	0,68	1,8
633	»	10	15	72	0,24	17,5	—	0,35
760	»	4,3	10	123	0,15	18,4	0,15	0,5
78	АЛ—М	10	15	—	—	5,5	—	—
163	»	10	15	28	0,21	5,9	0,19	1,9
225	»	10	15	32	0,23	7,3	0,25	2,0
400	»	10	15	65	0,13	8,45	0,1—0,15	1,0
533	СТ—М	2	10	300	0,034	10,2	—	0,45
762	АЛ—М	10	15	124	0,07	8,7	—	0,65
780	СТ—М	5	15	370	0,03	11,1	<0,1	0,37

Примечание. АЛ — алюминий, СТ — сталь, М — медь; в алюминии $p_y = 5,5$ кбар в стали $p_y = 9,5$ кбар.

этого времени проделаны специальные опыты, в которых ударник брали достаточно толстым, что обеспечивало более ранний приход к датчику боковой разгрузки по сравнению с тыльной разгрузкой от ударника. Измеряли время начала спада давления за фронтом ударной волны, которое и принимали за время одномерности деформирования. Минимальную толщину образцов выбирали так, чтобы обеспечить затухание процессов, связанных с вязкостью материала. Известно [12], что влияние вязкости, обусловленной высокой скоростью деформирования, наиболее существенно вблизи от поверхности соударения. Экспериментальное изучение затухания упругого предвестника на малых толщинах в стали и алюминии [13, 14] позволило установить минимально допустимую толщину образцов в экспериментах, которая составляет 10 мм.

По мере уменьшения скорости соударения V_0 для каждого из металлов наступал момент, когда разрушение отсутствовало. Из осциллограмм для таких случаев определяли максимальные растягивающие напряжения в образце σ_* и время их действия. Контроль наличия или отсутствия разрушения производили наблюдением под микроскопом шлифов, приготовленных из подвергнутых нагружению образцов. Обычно 100-кратного увеличения оказывалось достаточно для обнаружения макротрещин. За величину σ_* принимали напряжение, при котором отсутствовала магистральная трещина.

Как видно из приведенных результатов, влияние скорости нагружения наиболее существенно в стали, в меньшей степени это относится к меди. Прочность алюминия (сплава В95) слабо зависит от скорости нагружения. Такая зависимость качественно наблюдается и в квазистатических испытаниях [8].



Ф и г. 7

Сопоставление полученных результатов с многочисленными данными других исследователей является достаточно сложным по той причине, что в большинстве работ прямые экспериментальные измерения профиля ударных волн, за редким исключением (например, [10]), не проводили. При этом необходимо отметить следующее.

Развитие откола в материалах происходит в результате взаимодействия двух встречных волн разгрузки. При использовании градиента напряжений или скорости изменения напряжений только за фронтом падающей волны в качестве временной характеристики не учитывается влияние этих параметров за фронтом отраженной волны разгрузки на характер изменения нагрузки в месте разрушения. Очевидно, что по мере распространения волны разгрузки по материалу скорость изменения давления и градиент давления в ней снижаются (характеристики расходятся), поэтому скорость изменения нагрузки в плоскости откола зависит от пути, пройденного как падающей, так и отраженной волной, т. е. от толщины пары ударник — образец и от толщины откола.

Из симметричной картины в области взаимодействия двух встречных волн разгрузки видно, что параметры состояния в двух симметрично расположенных точках, принадлежащих последним характеристикам S_+ - и S_- -семейств, совершенно идентичны. Условия для откола возникают одновременно на последней S_+ - и на последней S_- -характеристиках. Между этими точками условие разрушения выполняется, так как растягивающие напряжения здесь больше. Аналогичная картина имеет место и при несимметричном взаимодействии волн разгрузки. Этим можно объяснить наличие рыхлости, интенсивной трещиноватости в области, прилегающей к отколу, обнаруженной в ряде работ [15—17]. Из простых расчетов следует, что ширина области взаимодействия волн разгрузки при соударении пластин в зависимости от толщины ударника, образца и откола имеет размер порядка 1 мм. Растягивающие напряжения в точках, принадлежащих этой области, меняются от нуля до $-p_a$. Вследствие этого точность измерения толщины откола сильно влияет на расчет критических напряжений, определяемых в ряде работ по ее величине. Этим, а также отсутствием прямой регистрации профиля ударных волн в процессе откола можно объяснить значительный разброс экспериментальных данных для одинаковых материалов, отличающихся иногда на порядок [18, 19]. Использование осциллограмм с непрерывной записью изменения параметров состояния за фронтом ударных волн при надлежащем выборе модели поведения материала способно дать объективную информацию о величинах действовавших напряжений и временных параметрах нагрузки при откольном разрушении.

По порядку величины критических напряжений результаты настоящей работы согласуются с данными для стали в работах [2, 3, 20, 21], для меди — в [2, 9, 18], для алюминия — в [2, 9, 20, 22]. Результаты по алюминию [23], стали [24, 25] и меди [3, 25] и результаты настоящей работы показывают, что $\sigma_{кр}$ возрастает с ростом ϵ (фиг. 7). Асимптотой на оси σ является величина σ_* — напряжение, ниже которого откол в материале отсутствует в течение ~ 2 мкс. Точнее, отсутствует разделение тела на две части, хотя наблюдаются отдельные трещины в материале. Различие результатов данной работы и работы [9] можно объяснить раз-

ницей временных параметров, используемых для построения зависимости, а также возможным влиянием на измерения в [9] неоднородности течения за фронтом ударной волны.

Авторы выражают благодарность В. В. Астанину и Г. Т. Рудеку за помощь при проведении экспериментов.

Поступила 4 IX 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Butcher V. M., Barker L. M., Munson D. E., Lundergan V. M. Influence of stress history on time-dependent spall in metals.— AIAA J., 1964, N 2.
2. Витман Ф. Ф., Иванов М. И., Иоффе Б. С. Сопротивление разрушению пластичных материалов при импульсном нагружении.— ФММ, 1964, т. 18, вып. 5.
3. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении.— ФММ, 1966, т. 21, вып. 4.
4. Тарасов Б. А. О временной зависимости прочности оргстекла при ударной нагрузке.— Проблемы прочности, 1972, № 12.
5. Канель Г. И. Применение мanganитовых датчиков для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред. Препринт ИФХ АН СССР. Черноголовка, 1973 (ВИНИТИ, отдел научных фондов, № 477—74, от 28.11.1974 г.).
6. Златин И. А., Мочалов С. М., Пугачев Г. С., Брагов А. М. Лазерный дифференциальный интерферометр.— ЖТФ, 1973, 43, № 9.
7. Новиков С. А., Иванов А. Г. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности.— ПТЭ, 1963, № 1.
8. Степанов Г. В. Поведение конструкционных материалов в упругопластических волнах нагрузки. Киев, Наукова думка, 1978.
9. Златин И. А., Мочалов С. М., Пугачев Г. С., Брагов А. М. Временные закономерности процесса разрушения при интенсивных нагрузках.— ФТТ, 1974, т. 16, вып. 6.
10. Bertholf L. D., Buxton., et. al. Damage in steel plates from hypervelocity impact. II. Numerical results and spall measurement.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 9.
11. Schmidt D. N., Evans M. W. Shock wave compression of plexiglass in 2,5 to 20 kbar region.— Nature, 1965, vol. 206, p. 1348.
12. Кукуджанов В. Н. Распространение упругопластических волн в стержне с учетом влияния скорости деформации.— Труды ВЦ АН СССР, 1967.
13. Астанин В. В., Степанов Г. В., Романченко В. И. Сопротивление сдвигу в металлах за фронтом ударной волны.— В кн.: Тезисы докладов II Всес. симп. по импульсным давлениям. М., 1976.
14. Taylor J. W. Dislocation dynamics and dynamics yielding.— J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, p. 3146.
15. Адушкин В. В., Сухотин А. П. О разрушении твердой среды взрывом.— ПМТФ, 1964, № 4.
16. Butcher V. M. Spallation in 6061-T6 aluminum.— In: Symposium H. D. P. Paris, 1967.
17. Романченко В. И., Степанов Г. В. К вопросу о временной зависимости прочности твердых тел при отколе.— Проблемы прочности, 1978, № 3.
18. Smith J. H. Three low pressure spall thresholds in copper.— ASTM STP, 1963, vol. 336.
19. McQueen B. C., Marsh S. R. Ultimate yield strength of copper.— J. Appl. Phys., 1962, vol. 33, p. 654.
20. Райнхарт Д., Пирсон Д. Поведение металлов при импульсных нагрузках.— М., ИЛ, 1958.
21. Buchanan J. S., James H. J. Measurement of high intensity stress pulses.— Brit. J. Appl. Phys., 1959, vol. 10, p. 290.
22. Response of Metals to High Velocity Deformation. N. Y.— L., Interscience, 1960.
23. Новиков С. А., Синицына Л. М. О влиянии скорости деформирования при отколе на величину разрушающих напряжений.— ФММ, 1969, т. 28, № 6.
24. Скидмор И. Ударные волны в твердых телах.— Сб. пер. Механика, 1968, № 4.
25. Тарасов Ю. И. Исследование зависимости времени разрушения от растягивающей нагрузки для стали и меди.— ДАН СССР, 1965, т. 165, № 5.