

можно оценить величиной

$$(6) \quad \pi R^2 \int_0^l F(z) dz$$

где  $R$  — радиус электрода. Сила (6) приложена в области больших температур. В ненагретой части столба жидкости неоднородность поля не успевает устанавливаться вследствие того, что время релаксации  $\epsilon / 4\pi\sigma \gg \tau \sim 0.1$  сек.

Во время движения границы горячей жидкости интегральная величина (6) меняется слабо, так как уменьшение градиента  $k$  компенсируется увеличением верхнего предела (области приложения сил). Следовательно, силу, действующую на столб жидкости, можно считать приближенно сохраняющейся.

Если допустить, что нагретая жидкость достигает нижнего электрода за счет течения под действием силы (6), то оценки с подстановкой численных значений параметров, использованных в работе [2], дают  $v_* \sim 30$  см/сек. Этот результат по порядку величины согласуется с экспериментальным и показывает, что в указанных электрогидродинамических явлениях электрическая сила  $F$ , обусловленная неоднородностью электропроводности среды, может играть основную роль.

Поступила 9 II 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Остроумов Г. А.* Некоторые гидродинамические явления, сопровождающие прохождение тока через изолирующие жидкости. *ЖЭТФ*, 1956, т. 30, вып. 2.
2. *Байбулатов Ф. Х., Минин В. Ф., Смирнов А. В.* О теплообмене в диэлектрической жидкости. *ПМТФ*, 1972, № 1.
3. *Плауде К. К., Грислис В. Я., Пуятс В. В., Мейерс А. Э.* Теплообмен в непроводящих жидкостях в однородном электростатическом поле. *Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. н.*, 1968, № 6.
4. *Пуятс В. В.* О гидродинамической неустойчивости диэлектрических жидкостей в электростатическом поле. *Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. н.*, 1969, № 2.
5. *Остроумов Г. А.* К вопросу о гидродинамике электрических разрядов. *Ж. техн. физ.*, 1954, т. 24, вып. 10.
6. *Gross M. J., Porter J. E.* Electrically induced convection in dielectric liquids. *Nature*, 1966, vol. 212, No. 5068.
7. *Сканави Г. И.* Физика диэлектриков. М.— Л., Гостехиздат, 1949.
8. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М., «Наука», 1966.

УДК 620.178.7 : [669.14/.15 + 669.71]

#### О КОЛИЧЕСТВЕННОМ ОПИСАНИИ ОТКОЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

*Б. А. Тарасов*

(Москва)

Экспериментальные данные по отколу в оргстекле и алюминии АМг-6, полученные при ударном нагружении образца, представляются в виде приближенной аналитической зависимости, связывающей степень повреждения с величиной приложенного напряжения в прямоугольном импульсе и временем его действия.

В твердом теле, подвергнутом кратковременному интенсивному нагружению ударом или взрывом, возникают растягивающие напряжения, приводящие к его разрушению. Наблюдаемая в опытах степень повреждения зависит от амплитуды и длительности приложенной нагрузки [1,2]. С уменьшением времени приложения нагрузки возрастает разница между значением напряжения, вызывающего образование локальных очагов разрушения, и напряжения, образующего откол.

В данной работе сталкивались пластины разной толщины из исследуемого материала и находились пороговые значения скорости удара, соответствующие двум ви-

дам повреждения: локальным повреждениям в виде пор или изолированных трещин малых размеров и отколу (смыканию локальных повреждений в откольную трещину). Регистрация повреждений производилась визуально, при небольшом оптическом увеличении. Учитываемые локальные повреждения в оргстекле имели характерные размеры (0.02—0.05) мм, в алюминии — (0.05—0.10) мм. Регистрируемые повреждения располагались в окрестности плоскости, отстоящей от задней поверхности образца на расстоянии, равном толщине ударника. Разрушения у края образца, в области, охваченной боковой разгрузкой, не учитывались. Пластины имели форму диска диаметра 50 мм. Пары пластин из алюминия имели толщину 3—5 и 5—10 мм, из оргстекла — 1—2, 2—4 и 2.8—7 мм. Направление приложения нагрузки в образцах из алюминия совпадало с направлением технологической прокатки.

Расчет растягивающего напряжения  $\sigma$  и времени его действия в сечении откола  $\tau$  производился по формулам

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho c v$$

$$\tau = \begin{cases} 2(h_1 - h_2)/c, & h_1 < 2h_2 \\ 2h_2/c, & h_1 \geq 2h_2 \end{cases}$$

где  $\rho$  — плотность вещества,  $c$  — скорость звука,  $v$  — скорость удара,  $h_1$  — толщина образца,  $h_2$  — толщина ударника. В расчетах использованы следующие значения постоянных:  $\rho = 2.64 \text{ г/см}^3$ ,  $c = 5.92 \text{ км/сек}$  для алюминия;  $\rho = 1.18 \text{ г/см}^3$ ,  $c = 2.68 \text{ км/сек}$  для оргстекла.

Результаты отдельных опытов приведены в табл. 1. В табл. 2 представлены пороговые значения скорости  $v_1$  и соответствующего ей напряжения  $\sigma_1$ , связанные с образованием локальных повреждений, а также  $v_2$  и  $\sigma_2$ , связанные с образованием откола.

Таблица 1

Степень повреждения	Пары пластин из оргстекла	$v$ , м/сек	Пары пластин из алюминия АМГ-6	$v$ , м/сек
Нет повреждений	1—2	67.5, 88, 92	3—5	255, 262
	2—4	77.5, 89.5	5—10	142, 145, 162, 170
	2.8—7	79, 83.5		
Локальные повреждения	1—2	95.5, 97.4, 104, 108, 114, 116, 127	3—5	290, 295, 335, 360
	2—4	89, 90, 102	5—10	180, 188, 193, 220, 237
	2.8—7	89, 95, 98.5		
Откол	1—2	134, 147, 153	3—5	390, 465
	2—4	108, 125.5, 128	5—10	220, 265, 290, 305, 325
	2.8—7	101, 109, 131		

Таблица 2

Материал	$\tau$ , мксек	$v_1$ , м/сек	$v_2$ , м/сек	$\sigma_1$ , кбар	$\sigma_2$ , кбар
Оргстекло	0.75	94±2	130±4	1.48±0.03	2.06±0.06
	1.49	89±1	105±3	1.41±0.02	1.66±0.05
	2.09	86±3	100±2	1.36±0.05	1.58±0.03
Алюминий АМГ-6	0.68	275±15	375±15	21.4±1.2	29.2±1.2
	1.70	175±5	230±10	13.6±0.4	17.9±0.8

Значения  $v_1$  и  $v_2$  определены как средние арифметические между крайними значениями колонок табл. 1. Ошибка в измерении скорости  $\sim 1\%$ . Табл. 2 показывает, что  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  являются монотонно убывающими функциями  $\tau$ , причем

$$\sigma_2(\tau_1) > \sigma_1(\tau_1), \quad \sigma_2(\tau_1) - \sigma_1(\tau_1) > \sigma_2(\tau_2) - \sigma_1(\tau_2)$$

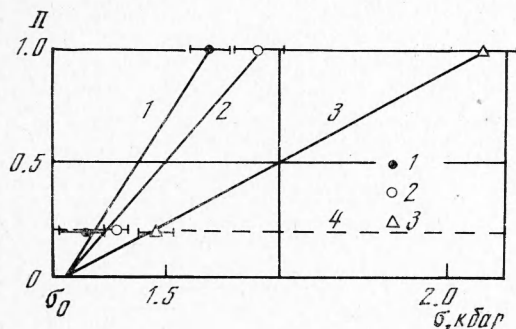
если  $\tau_2 > \tau_1$ .

Будем искать функцию  $\Pi$ , описывающую степень повреждения, исходя из следующих предположений: 1) существует значение напряжения  $\sigma_0$ , такое, что при  $\sigma < \sigma_0$

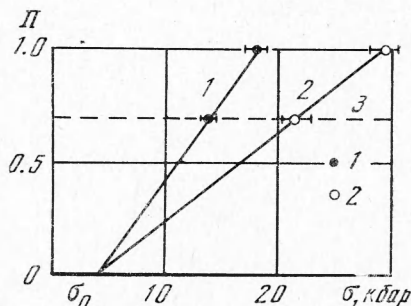
никаких повреждений не происходит независимо от времени действия нагрузки, т. е.  $\sigma_0$  есть статический предел прочности в условиях одномерной деформации; 2) наблюдаемые локальные повреждения не являются начальными, т. е. существуют повреждения при  $\sigma_0 < \sigma < \sigma_1$ . Допустим далее, что зависимость  $\Pi$  от  $\sigma$  можно описать линейным законом, тогда

$$(1) \quad \Pi = (\sigma / \sigma_0 - 1) (\sigma_2(\tau) / \sigma_0 - 1)^{-1}$$

Подставляя в (1)  $\sigma = \sigma_1(\tau)$ , находим оценочные значения  $\sigma_0$  и  $\Pi_1$  для каждой пары значений  $\tau$ . Для оргстекла средние значения, полученные из трех пар  $\tau$ ,  $\sigma_0 = 1.32$  кбар,  $\Pi_1 = 0.2$ . Для алюминия по одной паре значение  $\tau$  получено  $\sigma_0 = 4$  кбар,  $\Pi_1 = 0.69$ . Зависимость (1) с указанными значениями постоянных приведена на фиг. 1 (оргстекло) и 2 (алюминий).



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 1 линия 1 соответствует  $\tau = 2.09$  мксек, 2 —  $\tau = 1.49$  мксек, 3 —  $\tau = 0.75$  мксек, 4 —  $\Pi = 0.2$ , на фиг. 2 1 —  $\tau = 1.7$  мксек, 2 —  $\tau = 0.68$  мксек, 3 —  $\Pi = 0.69$ . Если значение  $\sigma_0$  известно заранее, то возможно более точное построение функции  $\Pi(\sigma)$ .

Графическое построение функции

$$a(\tau) = (\sigma_2(\tau) / \sigma_0 - 1)^{-1}$$

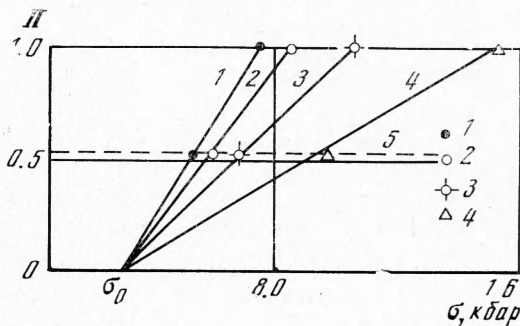
показывает, что для оргстекла имеет место линейная зависимость  $a = \alpha\tau$  ( $\alpha = 2.5$  мксек<sup>-1</sup>), для алюминия  $a = \alpha\tau^{2.3}$  ( $\alpha = 0.21$  мксек<sup>-2.3</sup>). Имеем

$$(2) \quad \Pi = \alpha\tau^n (\sigma / \sigma_0 - 1)$$

с указанными значениями постоянных.

Описанным методом произведена обработка экспериментальных данных по отколу в бериллии № 50А [2]. Степень повреждения в этих опытах определялась на основании изучения фотографий испытанных образцов. На фиг. 3 (1 —  $\tau = 0.79$  мксек, 2 —  $\tau = 0.394$  мксек, 3 —  $\tau = 0.201$  мксек, 4 —  $\tau = 0.043$  мксек, 5 —  $\Pi = 0.52$ ) данные приведены к  $\sigma_0$ , взятому равным упругому пределу Гюгонио (2.5 кбар [2]). Эксперимент согласуется с таким построением. Замеченная авторами [2] начальная стадия повреждения соответствует  $\Pi = 0.52$ . В формуле (2)  $n = 0.35$ .

Формула (2) приближенно описывает зависимость величины полученного повреждения от параметров набегающей волны напряжения прямоугольного профиля. Возможность ее применения для оценки накопления повреждений во времени в процессе разрушения определяется выполнением условия постоянства напряжения, что в работе [1] считалось заданным. В ранней стадии процесса разрушения, до образования макроскопических дефектов в виде пор ( $\Pi < (0.2-0.5)$ ), когда среда сохраняет сплошность, можно считать плотность вещества и скорость звука неизменными. Тогда напряжение в зоне разрушения для прямоугольной волны будет неизменным. На стадии макроскопического разрушения (развития и смыкания пор с образованием откольной трещины),



Фиг. 3

когда нарушается сплошность и поры служат локальными источниками волн разгрузки, допущение о постоянстве растягивающего напряжения в зоне разрушения менее оправданно.

Найденные значения показателя в формуле (2) ( $n \ll 1$ ) не соответствуют лавиноподобному механизму роста повреждений, который представляется вероятным для случая, когда напряжение растяжения сохраняется постоянным в процессе разрушения, и для которого  $n > 1$  ( $\partial\Pi / \partial t \sim t^{n-1}$ ).

Поступила 5 III 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Б. А. О временной зависимости прочности оргстекла при ударной нагрузке. Проблемы прочности, 1972, № 12.
2. Davison L., Stevens A. L. Continuum measures of spall damage. J. Appl. Phys. 1972, vol. 43, No. 3.

УДК 539.376

#### О РАЗРУШЕНИИ ВСЛЕДСТВИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

А. Ф. Никитенко, О. В. Соснин, Н. Г. Торшенов

(Новосибирск)

Приведены результаты экспериментов на ползучесть до разрушения при плоском напряженном состоянии и показано, что сформулированный ранее [1] энергетический подход к оценке длительности процесса до разрушения подтверждается экспериментально.

В [1] для одноосного напряженного состояния показано, что диаграммы  $A = A(t)$ , где  $A = \int_0^t \sigma \eta dt$ ,  $\eta$  — скорость деформации ползучести, для различных уровней напряжений подобны и что длительности процессов ползучести до разрушения  $t^*$  сопоставимы по их величинам удельным мощностям рассеяния  $W^\circ = \sigma \eta$  на установившихся стадиях

$$(1) \quad W_k^\circ / W_n^\circ = t_n^* / t_k^*$$

Ниже представлены результаты для плоского напряженного состояния — растяжения с кручением и сжатия с кручением.

Эксперименты проводились при  $T = 275^\circ \text{C}$  на трубчатых образцах наружным и внутренним диаметрами соответственно 20 и 18 мм и длиной рабочей части 80 мм. Образцы изготавливались из пруткового материала Д16Т в состоянии поставки и после изготовления термообработке не подвергались. Из каждого прутка выбранной партии было изготовлено по два образца, которые испытывались на ползучесть при растяжении с целью сопоставления разброса результатов из-за возможной разнородности прутков. Так были отобраны прутки, для которых разброс экспериментальных данных по деформациям не выходил из полосы  $\pm 10\%$  среднего значения.

Эксперименты на ползучесть были проведены в четыре серии.

Первая серия состояла из экспериментов на растяжение, сжатие и кручение, причем в экспериментах с кручением величина касательного напряжения  $\tau$  определялась из соотношения  $M = \tau S R_0$ , где  $M$  — внешний крутящий момент,  $S$  — площадь сечения образца,  $R_0$  — средний радиус кольцевого сечения. Большинство экспериментов доводилось до непосредственного разрушения образца, некоторые из них прекращались, когда процесс ползучести резко интенсифицировался, что могло быть связано с потерей устойчивости при сжатии или кручении. (Проведенные контрольные эксперименты с остановкой на различных уровнях третьей стадии показали, что гофрообразование и овалность на образцах появляются в третьей стадии ползучести непосредственно перед разрушением.) В процессе эксперимента измерялось осевое удлинение образца и угол закручивания, по которым определялись осевые деформации  $\varepsilon$  и сдвиги  $\gamma$ , а на