

6. М. А. Могилевский, С. А. Бордзиловский, Н. Н. Горшков. ФГВ, 1978, 14, 6, 110.
7. Н. В. Губарева, Т. М. Соболенко, Т. С. Тесленко. ФГВ, 1977, 13, 4, 636.
8. А. А. Дерибас, В. Ф. Нестеренко и др. ФГВ, 1979, 15, 2, 126.
9. G. R. Cowan. Trans. Met. Soc. AIME, 1965, 233, 1120.
10. M. F. Rose, T. L. Berger, M. C. Inman. Trans. Met. Soc. AIME, 1967, 239, 12, 1998.
11. М. П. Бондарь, А. А. Дерибас, В. А. Симонов. ФГВ, 1975, 11, 3, 435.
12. T. Mori, T. Mura. Acta Met., 1978, 26, 8, 1199.

## ДОКРИТИЧЕСКАЯ СТАДИЯ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

А. М. Молодец, А. Н. Дремин  
(Черноголовка)

Кинетические теории прочности описывают экспериментальные результаты (квазистатические данные) при временах воздействия  $\geq 10^{-3}$  с [1]. Описание откольного разрушения (откола), протекающего за  $\leq 10^{-6}$  с, должно в предельном случае согласовываться с результатами квазистатических исследований прочности. Однако существующие временные схемы откола [2] не допускают корреляции откольных и квазистатических данных [3]. Во многих работах процесс откола предлагается разграничивать на стадии [4–9]. В [5] предлагается рассматривать четыре стадии в процессе откола, а в [6, 7] две. Таким образом, вопрос о количестве стадий и, следовательно, об их характеристиках и условиях перехода от одной стадии к другой остается открытым.

В настоящей работе процесс откола разграничивается на докритическую и закритическую стадии и предлагается описание докритической стадии откола в полиметилметакрилате (ПММА), согласующееся с результатами квазистатических исследований прочности этого материала.

Рассмотрим волновые взаимодействия (рис. 1) при плоском соударении пластин — ударника толщиной  $h_1$  с мишенью толщиной  $h_2$  ( $h_2 > h_1$ ) в  $h-t$ -координатах ( $h$  — лагранжева одномерная координата,  $t$  — время). В момент соударения ( $t=0$ ) в обе пластины пойдут ударные

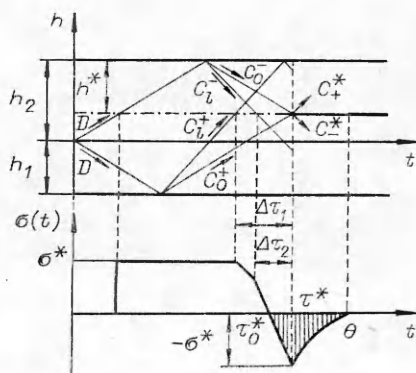


Рис. 1.

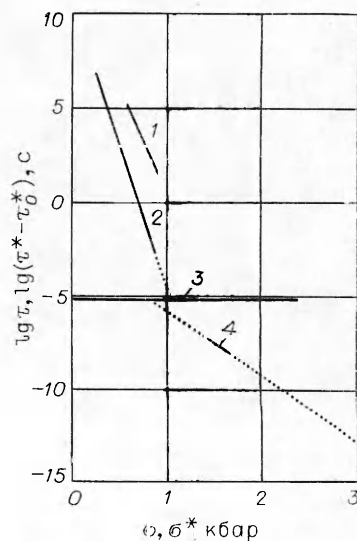


Рис. 2.

волны со скоростью  $D$  и амплитудами  $\sigma^*$ , которые отразятся от свободных поверхностей в виде волн разгрузки  $C_l^- \div C_0^-$  и  $C_l^+ \div C_0^+$ . В плоскости (откольной), находящейся в мишени на расстоянии  $h^* = h_1$  от ее свободной поверхности, размытие волн разрежения по времени составит  $\Delta\tau_1$  для  $C_l^+ \div C_0^+$  и  $\Delta\tau_2$  для  $C_l^- \div C_0^-$ . На рис. 1:  $C_l^\pm$  и  $C_0^\pm$  — скорости распространения первого и последнего возмущений в волнах разгрузки. В твердых телах при  $\sigma^* \sim 50$  кбар  $D \sim C_0$ , где  $C_0$  — объемная скорость звука. Примем  $C_0^\pm = \text{const} = C_0$ ,  $C_l^\pm = \text{const} = C_l$ , тогда  $\Delta\tau_2 = h_1(C_0^{-1} - C_l^{-1})$ ,  $\Delta\tau_1 = h_2(C_0^{-1} - C_l^{-1})$ . Построим зависимость (профиль) напряжений  $\sigma$  от времени  $t$  в плоскости откола. В координатах  $\sigma - t$  представим форму волн разгрузки прямыми линиями. Следуя [2], но учитывая размытие  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$ , построим участок профиля  $\sigma(t)$  до момента  $\tau^*$ . В течение  $\Delta\tau_2$  скорость изменения напряжения  $d\sigma/dt$  определяется суммой  $(-\sigma^*/\Delta\tau_1 - \sigma^*/\Delta\tau_2)$  или

$$d\sigma/dt = -\sigma^*(1/h_1 + 1/h_2)(1/C_0 - 1/C_l)^{-1}. \quad (1)$$

Будем под плоскостью откола подразумевать слой толщиной  $\delta$ , серединой которого находится на расстоянии  $h^*$  от свободной поверхности мишени, а к его внешним границам примыкает монолитный материал. При условии  $\delta \ll h^*$  напряжения на границах мало различаются, и в первом приближении можно считать их одинаковыми в течение всего процесса откола.

В соответствии с [6] профиль отрицательного напряжения в плоскости откола имеет вид огибающей заштрихованного участка на рис. 1. Новизна построения рис. 1 по сравнению с [6, 10] заключается в том, что время фронта волны растяжения  $\tau^* - \tau_0^*$  рассматривается зависящим от координаты.

В [10] экспериментально показано, что образование несплошностей при отколе в ПММА начинается во фронте волны растяжения. В соответствии с результатами [10] определим, пользуясь терминологией [11], докритическую стадию откола, как процесс накопления повреждений, протекающий от момента  $\tau_0^*$ , когда  $\sigma(\tau_0^*) = 0$  до  $\tau^*$ , когда  $\sigma(\tau^*) = -\sigma^*$ , критическое состояние, характеризуемое откольной прочностью  $-\sigma^*$ , и закритическую стадию, протекающую от момента  $\tau^*$  до окончательного разделения образца в момент  $\theta$ . На рис. 1 волновые построения выполнены до момента  $\tau^*$ ,  $C_+^*$  и  $C_-^*$  — возмущения, обусловленные началом закритической стадии. В принятой схеме описание откола сводится к установлению закономерностей формирования критического состояния и установлению закона движения границ слоя  $\delta$  на закритической стадии. Для описания докритической стадии откола воспользуемся функцией поврежденности  $\varphi$  из [12]. Рассмотрим докритическую стадию на примере ПММА. Проводя аналогию с [13], примем, что для скорости роста  $\varphi$  в ПММА справедливо соотношение

$$d\varphi/dt = B \exp(\xi\sigma), \quad (2)$$

где  $\sigma = \sigma(t)$  — отрицательное напряжение в плоскости откола, принимаемое здесь и далее положительным;  $\tau_0^* \leq t \leq \tau^*$  (см. рис. 1);  $B, \xi$  — константы;  $\varphi(0) = 0$ ;  $\varphi(\sigma^*) = 1$ . Кроме этого запишем

$$d\sigma/dt = \rho_0 C_0^2 \dot{\varepsilon} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформирования;  $\rho_0$  — плотность материала. Поделив (2) на (3) и интегрируя по  $\sigma$  получившееся выражение с учетом  $\varphi(0) = 0$ ,  $\varphi(\sigma^*) = 1$ , в предположении  $\exp(\xi\sigma^*) \gg 1$ , а затем логарифмируя результат интегрирования, получим для критического состояния откола

$$\sigma^* = (\xi \lg e)^{-1} \lg \dot{\varepsilon} + (\xi \lg e)^{-1} \lg(\rho_0 C_0^2 \cdot \xi / B), \quad (4)$$

где  $\lg e = 0,434$ .

$h_1; h_2, \text{ мм}$	$W, \text{ м/с}$	$\sigma^*, \text{ кбар}$	$\lg \xi, 1/c$	$\xi, 1/\text{кбар}$	$B, 1/c$
1; 2	$\frac{92+95,5}{2}$	1,58	с 6,012		$10^{3,06}$
2; 4	$\frac{89,5+89}{2}$	1,5	5,712	8,55	
2,8; 7	$\frac{83,5+89}{2}$	1,45	5,56		

В таблице представлены данные по зарождающемуся отколу в органическом стекле (ПММА) из [3] и результат их обработки. Откольная прочность вычислялась по формуле  $\sigma^* = 0,5 \rho_0 C_0 W$ , где  $W$  — скорость соударения пластин. В качестве  $C_0$  и  $C_1$  использованы данные по вязкоупругому поведению ПММА из [14]:  $C_0 = 2,85 \text{ км/с}$  (получено экстраполяцией результатов [14] к нулевому значению скорости соударения),  $C_1 = 3,03 \div 3,055 \text{ км/с}$  при  $0,5 W = 0,0863 \div 0,0938 \text{ км/с}$ . Для вычисления  $\xi$  использовалась формула (1). В этой же таблице приведены коэффициенты, входящие в соотношение (2), которые определены после того, как через точки 1 ÷ 2 проведена методом наименьших квадратов прямая в соответствии с соотношением (4).

Заменив производную  $d\sigma/dt$  на  $\sigma^*/(\tau^* - \tau_0^*)$ , с помощью (3) запишем (4) в виде

$$\lg(\tau^* - \tau_0^*) = -(\xi \lg e) \sigma^* + \lg(\sigma^* \cdot \xi / B) \quad (5)$$

Эта зависимость со значениями констант из таблицы представлена на рис. 2, 4. Сплошной участок кривой лежит в области экспериментальных значений откольной прочности из [3]. Зависимость (5) связывает время докритической стадии откола с откольной прочностью и формально может быть сопоставлена с зависимостью долговечности от напряжения при одноосном квазистатическом нагружении из [15].

Сопоставляя временные зависимости прочности при откольном и квазистатическом разрушениях, можно учитывать различие напряженного состояния [3], характер процесса (изотермический и адиабатический), предысторию нагружения при отколе [16], область применимости эмпирических соотношений для описания разрушения [3, 9, 15] и, наконец, сопоставлять конкретные материалы. Для ПММА показано [17, 18], что при квазистатическом нагружении разрушение идет главным образом под действием наибольших растягивающих напряжений.

Процессу откольного разрушения предшествует ударное сжатие материала, в результате которого ко времени разрушения изменяется температура материала и возможны структурные изменения. При рассмотрении откола в первом приближении эти эффекты обычно не рассматриваются [3, 10].

Зависимость долговечности  $\tau$  от напряжения  $\sigma$  при постоянной температуре и одноосном растяжении

$$\tau = A \exp(-\alpha\sigma) \quad (6)$$

хорошо описывает экспериментальные данные при квазистатическом нагружении [15]. На рис. 2, 1, 2 в полулогарифмических координатах представлены данные по долговечности при комнатной температуре для ПММА соответственно из [19] и [15]. Область применимости соотношения (6) ограничена как со стороны больших, так и со стороны малых времен [1]. В [15] указывается, что в области значений  $\tau \sim 10^{-6} \text{ с}$  можно ожидать существенных отклонений от указанной зависимости. Определим границу экстраполяции (6) из следующих соображений. При квазистатических испытаниях  $\tau \geq 10^{-3} \text{ с}$ , длина рабочей части образца

$d \approx 20$  мм [1] и, следовательно, необходимым условием квазистатических испытаний является  $\tau \gg d/C$ , где  $C$  — скорость звука в стержнях (для ПММА  $C = 2,72$  км/с). Поэтому экстраполяция зависимости (6) в область, где  $\tau < d/C$ , неправомерна. На этом основании определим границу экстраполяции (6) в область малых времен (рис. 2, 3):

$$\lg \tau_r = \lg (d/C). \quad (7)$$

С другой стороны, откольные данные должны согласовываться с квазистатическими в окрестности  $\lg \tau_r$ , в которой заведомо справедливы данные по долговечности, т. е. вблизи линии 3 должна наблюдаться корреляция между соотношениями, описывающими временную зависимость откольной и квазистатической прочности. При сопоставлении откольных данных с квазистатическими для ПММА в [3] используется прямая 2, а в [10] — прямая 1 (см. рис. 2). Очевидно, это обусловлено тем, что в [3] и [10] исследовался откол в оргстекле разных марок.

С учетом сделанных замечаний сопоставим линию 4, описывающую откольные данные, с прямой 2, представляющей временную зависимость прочности ПММА. На рис. 2 видно, что экстраполяция линий 4 и 2 к линии 3 дают близкие значения напряжений. Экстраполяция кривой 4 к предельным временам ( $\tau^* - \tau_0^* = \tau_r = 10^{-13}$  с) дает значение откольной прочности  $\sigma_r^*(\tau_r) = 3,06$  кбар, что согласуется с оценкой теоретической прочности ПММА из [20]:  $\sigma_r = 3$  кбар. Совпадение результата экстраполяции кривой 4 к малым временам нагружения с теоретической прочностью находится в согласии с качественным результатом работы [9].

Таким образом, предлагаемое разделение процесса откольного разрушения на докритическую и закритическую стадии позволяет согласовать откольные данные для ПММА между собой и с результатами исследований долговечности этого материала.

Поступила в редакцию  
14/IX 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., Наука, 1974.
2. F. R. Tuler, V. M. Batchelor. *JFMA*, 1968, 4, 4, 431.
3. Б. А. Тарасов. Проблемы прочности, 1972, 12, 63.
4. T. W. Barbee, Jr. Sedman et al. *J. of Mater.*, 1972, 7, 3, 393.
5. D. R. Curran, D. A. Shockey, L. Seaman. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44, 9, 4025.
6. Н. А. Златин, Г. С. Пугачев и др. *ФТТ*, 1975, 17, 9, 2599.
7. А. Г. Иванов, В. Н. Мишеев. Докл. АН СССР, 1975, 220, 3, 575.
8. В. С. Никшифоровский. *ПМТФ*, 1976, 5, 150.
9. Ю. И. Федеенко. *ПМТФ*, 1977, 6, 154.
10. Л. Д. Воловец, Н. А. Златин, С. Г. Пугачев. Письма в ЖТФ, 1978, 4, 18, 4079, 4091.
11. Я. Б. Фридман. Механические свойства металлов. Т. 1. М., Машиностроение, 1974.
12. Л. М. Качанов. Основы механики разрушения. М., Наука, 1974.
13. С. Н. Журков, В. С. Куксенко, А. И. Слуцкер. Проблемы прочности 1971, 2, 45.
14. L. M. Barker, R. E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, 1970, 41, 4208.
15. С. Н. Журков, Э. Е. Томашевский. — В сб.: Некоторые проблемы прочности твердого тела. М., Изд-во АН СССР, 1959.
16. Б. М. Бучер и др. *РТК*, 1964, 6, 3.
17. Н. Н. Песчанская, В. А. Степанов. Механика полимеров, 1971, 1, 30.
18. В. А. Степанов, И. Е. Куров, В. В. Шпейзман. *ФТТ*, 1964, 6, 9, 2610.
19. Н. Н. Песчанская, В. А. Степанов. *ФТТ*, 1965, 7, 10, 2933.
20. П. П. Кобекко. Аморфные вещества. М.—Л., 1952.