

05;12

## Исследование динамики трещин в пластинах полиметилметакрилата при квазистатических и динамических нагрузках

© И.В. Смирнов, Ю.В. Судьенков

Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ivansmirnov@math.spbu.ru, sudenkov@land.ru

(Поступило в Редакцию 4 марта 2011 г. В окончательной редакции 12 мая 2011 г.)

Представлены результаты экспериментов по исследованию распространения трещины в пластинах из полиметилметакрилата при различных типах нагружения. Показано, что нестабильное поведение трещины наблюдается как при квазистатических, так и при импульсных воздействиях. Установлено, что время распространения трещины может существенно превышать длительность внешнего импульсного воздействия.

Зачастую сопоставление многочисленных результатов квазистатических и динамических исследований [1–6] процессов развития трещин в материалах представляет значительные трудности, так как эти данные получены в различных центрах при существенно различающихся методах регистрации распространения трещин и на материалах с не совсем одинаковыми механическими параметрами. В этой связи не всегда удается объективно оценить различия и сходства процессов развития трещин при различных типах нагружения, что затрудняет построение адекватной модели разрушения материалов.

В рамках классических моделей механики трещин [7] ускорение трещины является монотонной функцией времени, однако данные экспериментов демонстрируют нестабильный характер распространения трещины. Например, результаты квазистатических испытаний пластин из полиметилметакрилата (ПММА) показали, что при достижении скоростью трещины некоторого критического значения дальнейшее развитие трещины носит неустойчивый характер [3,5]. Более того, при воздействии импульсных давлений на берегах разреза в пластине ПММА с длительностями порядка и более  $10 \mu\text{s}$  [4] наблюдается только скачкообразное продвижение фронта трещины.

Вследствие этого представляют интерес исследования динамики фронта трещины в ПММА при квазистатических нагрузках, а также при импульсных воздействиях микро- и субмикросекундного диапазонов длительностей и сопоставление результатов исследований, проведенных на одном материале по единой методике регистрации трещины.

Все исследования проводились на образцах из ПММА с плотностью  $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$ , продольной скоростью звука  $C_L = 2750 \pm 25 \text{ m/s}$ , поперечной скоростью звука  $C_{TR} = 1400 \pm 25 \text{ m/s}$ , модулем упругости  $E = 5.9 \text{ GPa}$ .

В квазистатических испытаниях на растяжение использовались плоские гантелеобразные образцы с размерами рабочей части  $70 \times 18 \times 2.6 \text{ mm}$ . Для инициации трещины в середине рабочей части образца делался надрез лезвием бритвы.

Для динамических испытаний изготавливались пластины с размерами  $125 \times 105 \times 8.5 \text{ mm}$ . Для имитации трещины посередине образца был сделан пропил длиной  $40 \text{ mm}$  и шириной  $0.3 \text{ mm}$ .

Квазистатические испытания образцов производились на разрывной установке Р-0.5. Растяжение происходило с постоянной скоростью движения захватов  $5$  и  $10 \text{ mm/min}$ . Схема эксперимента представлена на рис. 1, а.

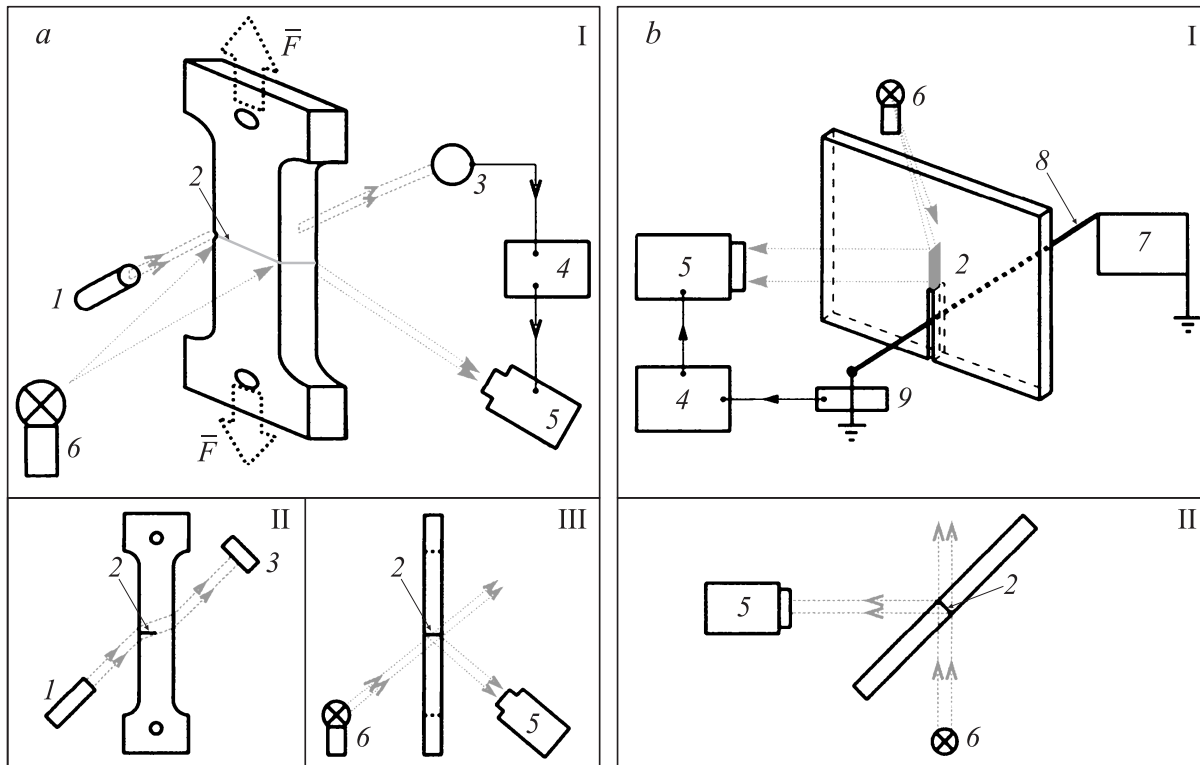
Регистрация движения трещины осуществлялась стрик-камерой К008 по методу щелевой развертки изображения [8]. Синхронизация камеры производилась сигналом с фотоприемника, регистрирующего изменение интенсивности проходящего через образец излучения лазера при старте трещины.

Схема экспериментов по динамическому нагружению пластин с разрезом приведена на рис. 1, б. Локализованный импульс давления создавался за счет электрического взрыва проволоочки ( $\varnothing 0.18 \text{ mm}$ ) между берегов разреза. Емкость конденсатора установки для электрического взрыва  $C = 10 \mu\text{F}$ , напряжение заряда  $U \leq 25 \text{ kV}$ , энергия  $E \leq 312 \text{ J}$ . Проволочка размещалась перпендикулярно плоскости пластины на расстоянии  $23 \text{ mm}$  от нижней грани образца. Синхронизация стрик-камеры осуществлялась сигналом с датчика тока (9).

Параметры импульса воздействия были определены в серии отдельных экспериментов. Длительность колоколообразного импульса давления составляла  $T = 0.9 \pm 0.1 \mu\text{s}$  при длительности фронта  $T_{\text{pf}} \approx 0.2 \mu\text{s}$ .

На рис. 2, а представлена траектория движения фронта трещины при квазистатическом нагружении. Траектории соответствует развертка изменения интенсивности света, отраженного от поверхности движущейся трещины.

Скорость движения фронта трещины, полученная дифференцированием траектории, демонстрирует два характерных участка (рис. 2, б). Первый участок соответствует достаточно монотонному росту скорости фронта трещины. При достижении критического значения скорости  $V_c$  происходит резкая смена плавного характера изменения скорости трещины на хаотический скачкообразный, что соответствует началу второго участка.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: *a* — квазистатические испытания (I — общий вид схемы, II — схема синхронизации, III — оптическая схема регистрации трещины); *b* — динамические испытания (I — общий вид, II — вид сверху образца). 1 — лазер, 2 — трещина, 3 — фотоприемник, 4 — генератор импульсов, 5 — стрик-камера, 6 — осветитель, 7 — установка ЭВП, 8 — взрываемая проволока, 9 — датчик тока.

Подобная зависимость скорости распространения трещины была получена также и в работах [3,9]. Например, в работе [3], в которой скорость трещины определялась по изменению электрического сопротивления алюминиевого слоя, напыленного на поверхность образца, было показано, что осцилляции фронта трещины коррелируют с профилем поверхности разрушения, а критическая скорость перехода на нестабильный режим  $V_c = 0.34C_R$  не зависит от геометрии, толщины образца и приложенной нагрузки ( $C_R$  — скорость волны Рэлея). В отличие от этого в наших экспериментах наблюдались два значения критической скорости  $V_c = 0.28C_R$  и  $V_c = 0.34C_R$  для двух значений скоростей нагружения (5 и 10 mm/min).

Сопоставление траектории трещины и поверхности разрушения (рис 2, *a*) показывает, что начало нестабильного поведения трещины соответствует началу ребристой структуры поверхности с расстоянием между ребрами порядка 1 mm. При этом наиболее выраженные частоты осцилляций скорости фронта трещины находятся в диапазоне 500–600 kHz.

На рис. 3, *a* представлен характерный участок траектории развития трещины, полученный при динамических нагружениях пластин ПММА с разрезом. На рисунке приведен участок траектории трещины, на которой гарантированно отсутствовало влияние упругих волн,

отраженных от боковых граней образца. При этом отметим, что при цилиндрической геометрии источника импульса давления воздействие отраженных волн вряд ли имеет определяющее влияние на развитие трещины. Тем не менее очевиден скачкообразный характер продвижения фронта трещины, при этом время распространения трещины оказывается существенно больше длительности импульса воздействия.

В отличие от квазистатических [5,9] и динамических [6,10] испытаний здесь наблюдается обратный порядок формирования характерных зон поверхности разрушения: грубо фрагментарная, чешуйчатая, параболическая, зеркальная.

На рис 3, *b* показано изменение скорости фронта трещины. Максимальные колебания скорости, так же как и в квазистатических испытаниях, приходятся на более шероховатую область поверхности разрушения и носят нерегулярный характер.

Средняя скорость распространения трещины в наших экспериментах как при квазистатических, так и при динамических испытаниях не превышала  $0.44C_R$ , но на скачках она могла приближаться к скорости волны Рэлея  $C_R$ .

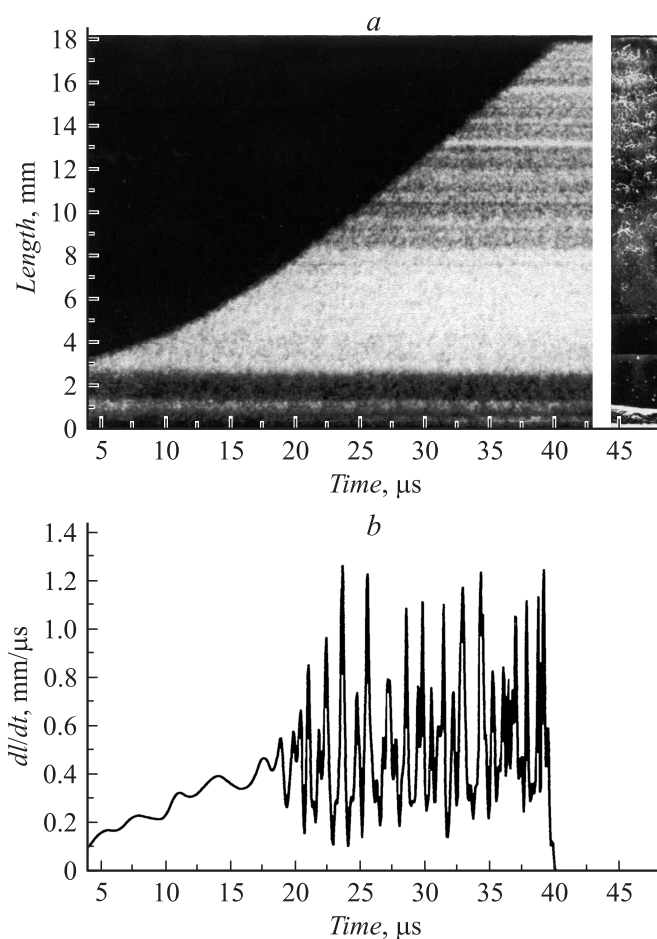
Таким образом, результаты исследований динамики трещины в пластинах из ПММА, полученные при единой методике регистрации, позволяют выделить сход-

ство и различие в этапах процесса разрушения при квазистатических и динамических воздействиях на хрупкие материалы.

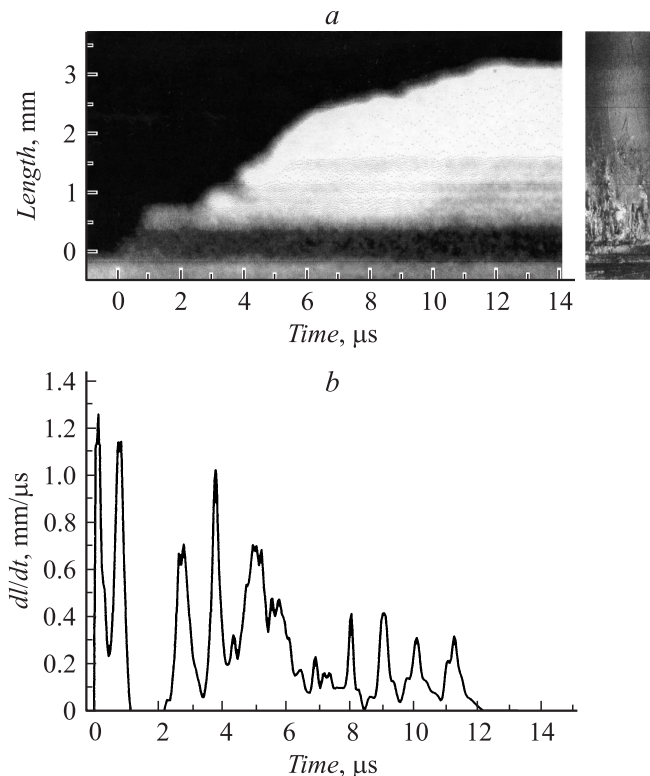
Эксперименты демонстрируют общее свойство квазистохастического поведения трещины при больших скоростях продвижения ее фронта и качественно совпадают с результатами, полученными другими авторами в работах [3,4], при отличающихся скоростях нагружения и существенно большей длительности импульса воздействия. Наши результаты подтверждают также, что скачки скорости фронта трещин коррелируют с изменениями структуры поверхности разрушения.

Наблюдаемая динамика развития трещины может быть связана с зоной предразрушения перед фронтом магистральной трещины [10–12], т.е. развитием ансамбля микроповреждений в области высокого напряжения. Характерный вид такой зоны микроповреждений после остановки трещины, зарегистрированный в ходе динамических испытаний, приведен на рис. 4.

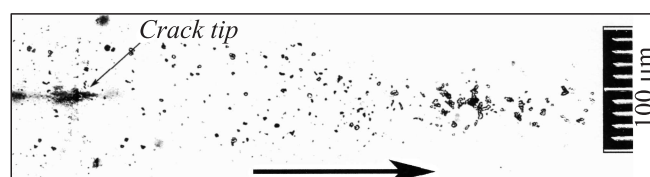
Обнаружено, что при импульсных нагружениях малой длительности время распространения трещины на поря-



**Рис. 2.** Распространение трещины при квазистатическом нагружении образцов: *a* — развертка движения трещины. Справа — вклейка фрактограммы соответствующей поверхности разрушения. *b* — скорость фронта трещины.



**Рис. 3.** Распространение трещины при локализованном импульсном нагружении на берегах разреза образца: *a* — развертка движения трещины. Справа — вклейка фрактограммы соответствующей поверхности разрушения. *b* — скорость фронта трещины.



**Рис. 4.** Область предразрушения перед фронтом трещины после ее остановки в случае динамического воздействия. Стрелка указывает направление развития трещины.

док превышает время воздействия на берега разреза, т.е. в отличие от квазистатики продвижение трещины может происходить за счет запасенной энергии деформации без постоянного подвода энергии извне.

По-видимому, при нагружениях с длительностями меньшими времен релаксации напряжений в зоне предразрушений и фронте трещины, динамика ее развития определяется взаимодействием нестационарных полей напряжений зоны предразрушений и полей напряжений, формируемым фронтом магистральной трещины.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 08-01-92201-ГФЕН-а, 09-08-00366-а, 10-01-00810-а).

## Список литературы

- [1] *Kalthoff J.F.* // Int. J. Fract. 1985. Vol. 27. P. 277–298.
- [2] *Ravi-Chandar K., Knauss W.G.* // Int. J. Fract. 1984. Vol. 25. P. 247–262.
- [3] *Fineberg J., Gross S.P., Marder M., Swinney H.L.* // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 45. N 10. P. 5146–5154.
- [4] *Костандов Ю.А., Федоркин С.И., Скоблин А.А.* // Заводская лаборатория. 1986. № 9. С. 65–67.
- [5] *Наймарк О.Б., Бараников В.А., Давыдова М.М., Плехов О.А., Уваров С.В.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 6. С. 67–77.
- [6] *Антрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 52–58.
- [7] *Freund L.B.* Dynamic Fracture Mechanics. Cambridge university press, 1998. 563 p.
- [8] *Дубовик А.С.* Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1964. 466 с.
- [9] *Döll W.* // J. Mater. Sci. 1975. Vol. 10. P. 935–942.
- [10] *Ravi-Chandar K., Knauss W.G.* // Int. J. Fract. 1984. Vol. 26. P. 65–80.
- [11] *Костандов Ю.А., Федоркин С.И.* // Пробл. прочности. 1990. № 2. С. 80–85.
- [12] *Лесковский А.М., Баскин Б.Л.* // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 6. С. 1157–1168.