

05;12

## Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата

© С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, А.Ю. Петров

Научно-исследовательский институт математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета, 198904 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: satroshe@atr.ipme.ru

(Поступило в Редакцию 29 января 2001 г. В окончательной редакции 9 июля 2001 г.)

Экспериментально исследовано распространение трещины в полиметилметакрилате при ударных воздействиях, создаваемых импульсным магнитным полем. Проведен анализ характера разрушения в зависимости от удаления от вершины трещины и построена диаграмма. Проведена оценка поверхностной энергии разрушения. Определены углы наклона мезотрещин и их связь с характером разрушения.

### Введение

При приложении достаточно больших растягивающих усилий стеклообразные полимеры могут быть хрупкими и разрушаться. Хрупкое разрушение характеризуется однородностью деформации вплоть до разрушения, которое происходит путем быстрого прорастания трещины поперек образца, т. е. в плоскости, нормальной к приложенной растягивающей силе. Отсутствуют существенное уменьшение площади поперечного сечения в плоскости разрушения и остаточная продольная деформация обеих половин разрушенного образца. Природа разрушения зависит от условий эксперимента. Хрупкое разрушение вязкоупругих материалов наблюдают при достаточно низких температурах и малых временах воздействия или высоких скоростях деформации.

### Материалы и методика эксперимента

Одним из преимуществ стеклообразных полимеров, таких как полиметилметакрилат (ПММА), является их прозрачность, которая дает возможность видеть движущиеся трещины и контролировать его.

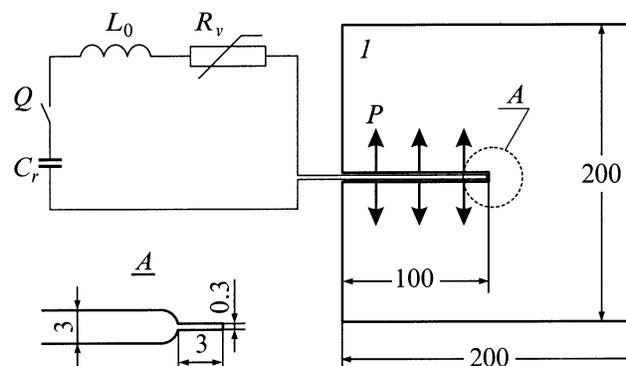
Определение характера разрушения при динамическом нагружении, создаваемом с использованием магнитно-импульсного способа формирования нагрузки, проводилось на образцах из ПММА. Схема нагружения, как и в работе [1], обеспечивала равномерно распределенное по берегам трещины давление. Опыты проводились при пороговых импульсах нагрузки.

Экспериментальному изучению были подвергнуты образцы из оргстекла, имеющего механические характеристики:  $c_1 = 1970$  м/с,  $c_2 = 1130$  м/с,  $K_{Ic} = 1.47$  МПа · м<sup>1/2</sup>, где  $c_1, c_2$  — продольная и поперечная скорости упругих волн;  $K_{Ic}$  — предельный коэффициент интенсивности при статическом нагружении.

Схема нагружения и размеры образца приведены на рис. 1. Методика изготовления образцов состояла в следующем. В плоской заготовке из ПММА толщиной 10 мм изготавлился паз шириной 3 мм и длиной 100 мм. В вершине паза осуществлялся пропил

глубиной около 3 мм и шириной 0.3 мм. Исследовалось развитие трещины из вершины этого пропила при приложении к образцу импульса давления, равномерно распределенного по длине паза. Импульс давления формировался плоской токопроводящей шиной шириной 10 мм из медной фольги толщиной 250 мкм. Генератор импульсных токов разряжался в колебательном режиме с периодом колебаний  $T \sim 5.5-6$  мкс и постоянной времени затухания около  $T_1 = 1-4$  мкс. Амплитуда импульса тока варьировалась в диапазоне 150–300 кА, что соответствует амплитуде напряжения в нагрузке от 140 до 320 МПа. Регистрация тока производилась поясом Роговского с пассивным RC-интегратором с постоянной интегрирования 68 мкс на осциллографе С9-8.

В случае колебательного режима разряда конденсаторной батареи на плоские медные шины, минимальное сечение которых выбрано по предельно допустимому для меди значению интеграла действия и при отношении ширины шин к зазору  $b/h \geq 10$ , можно считать распределение давления равномерным [2] и определить его величину при не очень сильном затухании по следующей



**Рис. 1.** Принципиальная схема установки и испытуемый образец.  $P$  — нагрузка на образец;  $C, L_0$  — емкость и собственная индуктивность генератора импульсных токов (ГИТ);  $Q$  — коммутатор. Все размеры указаны в мм.

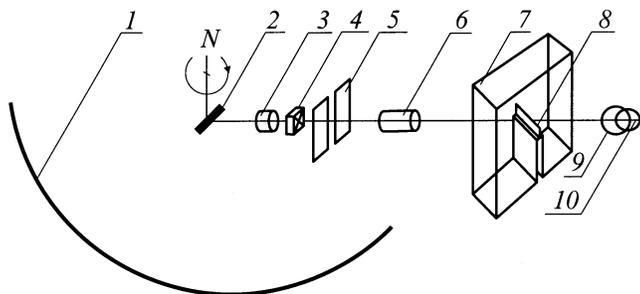
формуле

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{2t}{T_1}\right) \sin^2\left(2\pi \frac{t}{T}\right). \quad (1)$$

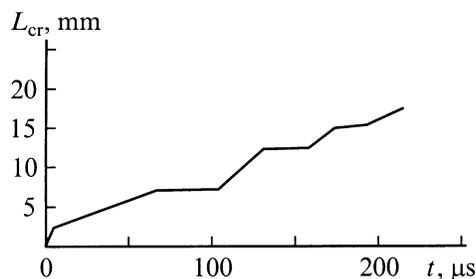
В момент времени  $t_m = \arctg(2\pi T_1/T)T/2/\pi$  значение давления достигает своей максимальной величины

$$P_m = P_0 \exp(-2t_m/T_1)/(1 + T^2/T_1^2/4/\pi^2).$$

На рис. 2 приведена схема визуализации процесса развития трещины при приложении импульсной нагрузки. В качестве фоторегистратора использована скоростная камера типа СФР-2, оптическая схема которого была собрана в режиме фотохронографа. Источником света служила импульсная лампа-вспышка типа ИФП-120. Испытуемый образец 7 устанавливался таким образом, что на пленке 1 строится изображение вырезаемой регулируемой оптической щелью 5 части исследуемого объекта. Это изображение с помощью вращающегося зеркала 2 переносится на фильмный путь. На пленке фиксируется изменение освещенности, вызванное перекрытием оптического канала продвигающейся трещиной. Граница раздела зон разной освещенности (разной оптической плотности изображения) является границей раздела: разрушенный материал–цельный материал. Для синхронизации процесса продвижения трещины с моментом приложения нагрузки с помощью световода в поле зрения камеры выведено из разрядного промежутка.



**Рис. 2.** Оптическая схема регистрации: 1 — фотопленка, 2 — зеркало, 3 и 6 — система фотообъективов, 4 — затвор, 5 — регулируемая щель, 7 — образец, 8 — движущаяся трещина, 9 — лампа-вспышка ИФП-120, 10 — световод.



**Рис. 3.** Типичная СФР-грамма роста трещины.

Были проведены испытания 10 образцов. При этом период колебаний  $T$  составлял  $5.6 \mu\text{s}$ , постоянная времени затухания  $T_1 = 4.2 \mu\text{s}$ , а амплитуда импульса давления  $P_m$  варьировалась от 140 до 320 МПа. Результаты обработки типичной картины продвижения трещины (СФР-граммы) приведены на рис. 3.

## Результаты и их обсуждение

1. Разрушение при импульсном нагружении и. Следует отметить ступенчатый характер движения трещины. До первой паузы в своем росте трещина успевает пройти 9–12 мм. В начальный момент движения скорость трещины в зависимости от условий нагружения лежит в интервале 100–500 м/с. При приложении нагрузки, превышающей пороговое значение, начальная часть пройденного до первой остановки расстояния составляет несколько миллиметров и проходит со скоростью 420–450 м/с. Оставшаяся часть проходит с существенно меньшей скоростью порядка 100 м/с.

Момент начала паузы в движении трещины коррелирует со временем прохода волной нагрузки двойного расстояния от берегов трещины до границы образца. Испытание на образце меньшего размера подтверждает это наблюдение. Остановку движения трещины можно объяснить приходом к вершине трещины отраженных от границы образца волн.

Обработка СФР-грамм позволила выявить экспериментальную зависимость времени старта трещины от амплитуды приложенной нагрузки. Чтобы сравнить полученную таким образом зависимость с расчетом в качестве математической модели была рассмотрена задача о нагружении берегов полубесконечной трещины нормально действующей нагрузкой. Решение такой задачи реально отражает реализуемую в опытах ситуацию до момента прихода в вершину трещины волн, отраженных от границ модели. Для использованных при проведении эксперимента образцов это время составило порядка  $100 \mu\text{s}$ . Значение коэффициента интенсивности напряжений для такой задачи имеет вид [3]

$$K_I(t) = \int_0^t \frac{\alpha P(s)}{\sqrt{t-s}} ds, \quad (2)$$

где  $\alpha = 2c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (c_1 \sqrt{\pi c_1})$ .

Так как при проведении экспериментов в нагрузке  $P(t)$  варьировалась только амплитуда, значения коэффициентов интенсивности отличаются только множителем. Максимальное значение коэффициента интенсивности достигается в момент времени  $t \approx 1.7 \mu\text{s}$  после начала нагружения.

Использование структурно-временного критерия [4] позволяет рассчитать наблюдаемую в эксперименте зависимость момента начала разрушения от амплитуды приложенного импульса. Этот критерий в рассматриваемом

случае можно записать в виде [5]

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t K_I(t') dt' \leq K_{Ic}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — инкубационное время, независимая характеристика материала.

Для данного материала  $\tau = 32 \mu\text{s}$ . Это значение было определено ранее из опытов [1]. Расчет показывает, что для реализуемой в опытах нагрузки минимальная разрушающая амплитуда  $P_m$  составляет 94.7 МПа. На рис. 4 представлена расчетная кривая зависимости амплитуды приложенного импульса от времени начала роста трещины. Кружками представлены экспериментальные результаты. Пунктир ( $t \approx 1.7 \mu\text{s}$ ) соответствует времени достижения коэффициентом интенсивности напряжений максимального значения. Время на графике отсчитывается от момента приложения нагрузки. Данные, полученные в эксперименте, показывают, что движение трещины начинается по истечении некоторого времени после того, как локальное силовое поле в кончике трещины — коэффициент интенсивности достигает максимума, т.е. на ниспадающей ветви его значений. Такое явление называется задержкой разрушения. Задержка разрушения наблюдалась в экспериментах при разрушении отколом [6], а также при разрушении образцов с трещинами [7]. Ее величина — это время, прошедшее с момента достижения локальным силовым полем максимального значения до момента разрушения. Задержка разрушения находит объяснение в рамках структурно-временного подхода, в то время как применение для анализа разрушения концепции критического коэффициента интенсивности напряжений не позволяет объяснить этого явления. На рис. 4 задержка разрушения представляет собой расстояние от расчетной кривой или экспериментальной точки до пунктирной линии.

2. Поверхностная энергия разрушения. Поверхностная энергия является мерой сопротивления материала разрушению. Она является более общим показателем предельных свойств материала при разрушении, чем прочность, так как не зависит от локальных

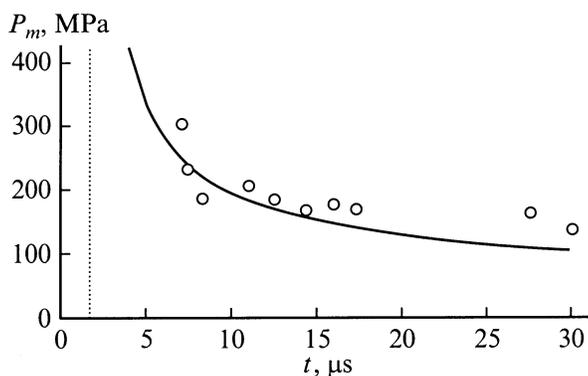


Рис. 4. Зависимость амплитуды приложенного импульса  $P_m$  от времени до начала разрушения.

характеристик материала и характера механического воздействия. Расхождение между теоретическими и экспериментальными величинами поверхностной энергии разрушения и внешний вид поверхностей разрушения приводит к выводу, что материал под влиянием локального напряжения при вершине трещины ведет себя как пластичный, а не хрупкий, несмотря на то, что макроскопические свойства материала характеризуют его как хрупкий. Интересно сопоставить поведение полимеров и металлов. При комнатной температуре наблюдается сходство соотношений между теоретической и экспериментальной поверхностной энергией разрушения для полиметилметакрилата и стали [8], что обусловлено аналогичной локальной реакцией ПММА и стали. Механизм рассеяния энергии в обоих случаях заключается в наложении напряжений сдвига и диффузии, но природа диффузии и характеристик энергетического поля, в котором происходит рассеяние энергии, у этих двух материалов резко различается. Процесс рассеяния энергии в стали происходит вследствие движения дислокаций в кристаллической решетке металла, в то время как в полимере рассеяние происходит вследствие перемещения сегментов в поле сил Ван-дер-Ваальса, действующих со стороны соседних молекул. По величине удельной поверхностной энергии можно судить, что неупругие процессы происходят в вершине трещины под влиянием высокой концентрации локальных напряжений. В этом отношении поведение стеклообразного полимера более сходно с поведением металла.

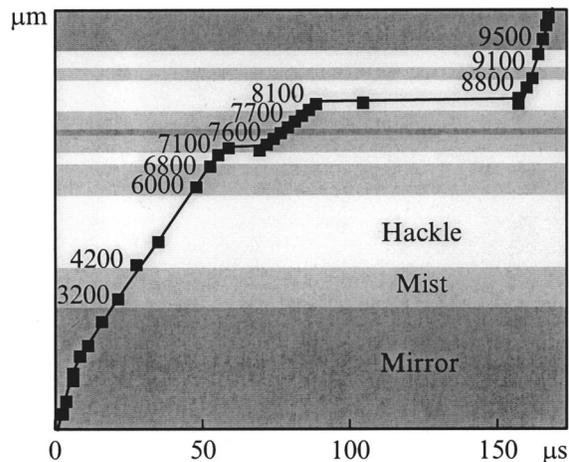
Процессы, происходящие при разрушении твердых тел, находят отражение в характере поверхности разрушения. Изучая эту поверхность, можно получить данные, выявляющие механизм разрушения, что может стать основой теоретических исследований прочностных свойств материала.

Область, образуемая при медленном развитии трещины от источника разрушения при растяжении образца, является гладкой и обладает высокой отражательной способностью. Эту область называют зеркальной зоной или областями с трещинами "серебра" — тонкими прослойками сильнодеформированного, частично расслоившегося материала, способного зеркально отражать свет [9]. За пределами зеркальной области, или области медленного роста трещины, имеется переходная зона, которая обычно представляет собой просто область с увеличенной шероховатостью на поверхности разрушения. В образцах с надрезом эта область более обширна, чем в образцах без надреза, и испещрена неровными линиями, ориентированными в направлении распространения трещины. Следующая область содержит ряд геометрических фигур, похожих главным образом на параболы и гиперболы [10]. Они возникают, когда из дефекта, лежащего перед фронтом первичной растущей трещины, начинает расти вторичная трещина. Вторичная трещина распространяется равномерно в виде системы концентрических окружностей, расходящихся радиально

от многочисленных локальных дефектов, которые активизируются распространяющейся волной напряжения и при пересечении с первичной трещиной образуют параболы [11], если скорости роста трещин равны. Дефект, из которого возникает вторичная трещина, оказывается фокусом параболы. Небольшая разница в уровнях двух распространяющихся разрушений делает эти фигуры видимыми и обуславливает значительное поглощение энергии. Особенности поверхностей разрушения отражают главные деформационные процессы, на которые расходуется энергия разрушения. За пределами этой области уровень напряжения и скорость распространения трещины увеличиваются и происходит высокоскоростное (взрывоподобное) разрушение. В работе [12] было обнаружено, что в этом случае наблюдаются различные звездообразные структуры на поверхности разрушения. Трещины распространялись с более или менее одинаковой скоростью. В условиях высокого динамического перенапряжения многие дефекты действуют одновременно, и материал подвергается хрупкому разрушению независимо от его поведения при статическом нагружении. Было обнаружено [13], что скорость разрушения ПММА возрастает с увеличением расстояния от источника разрушения и ее максимальные значения лежат в пределах между 400 и 700 м/с. Эти величины зависят от статической нагрузки в момент разрушения, причем с ее ростом скорость повышается. Кроме того, одной и той же скорости разрушения не обязательно соответствует один и тот же вид поверхности разрушения. Он зависит также от скорости и истории нагружения образца.

В процессе разрушения основное количество энергии затрачивается на пластическую деформацию в источниках разрушения. Источники разрушения обычно представляют собой фокусы парабол, в которых происходит значительная деформация. Чем более шероховата поверхность разрушения, тем более высокая энергия затрачена на распространение трещин. По виду поверхностей разрушения можно судить об особенностях механизмов поглощения энергии. При инициировании дефекта большая часть энергии поглощается вследствие пластической деформации. Как упоминалось выше, в зеркальной зоне разрушения — зоне скола, соответствующей медленной скорости продвижения трещины, поверхность разрушения является относительно гладкой. Для поддержания процесса продвижения трещины в этой области требуется относительно небольшая энергия.

Следующая область увеличенной шероховатости состоит из хаотично расположенных геометрических фигур неправильной остроугольной формы с большой дисперсией характерных размеров. За этой областью поверхность разрушения ПММА становится подобной фактуре металлов при вязком (чашечном) разрушении. Большое число чашек в виде парабол требует большей затраты энергии для распространения трещины. Рост поглощаемой энергии на поверхности разрушения приводит к увеличению размеров чашек, что и свидетельствует об уменьшении доли вязкости в изломе.



**Рис. 5.** Диаграмма распределения вида излома (зеркальный — mirror; шероховатый — mist; параболический, чашечный — hackle) в зависимости от длительности нагружения и расстояния от надреза. Цифры — расстояние, пройденное трещиной.

Области параболических структур в ПММА аналогичны участкам чашечного разрушения вязкой стали. Чашечка в стали имеет кратер, вблизи вершины которого заметен сдвиг материала. При возникновении трещин на поверхности появляются параболические ямки (чашки) в стали, аналогичные тем, что наблюдаются в ПММА. Классическим видом разрушения ПММА является парабола [13]. Механизм ее образования дает представление обо всем процессе разрушения: возникновение разрушения, прерывистое развитие процесса, дальнейшее инициирование разрушения в местах дефектов, возникновение вторичных разрушений и их связь с фронтом главной трещины, распространяющейся обычно на различных уровнях.

3. Характер разрушения. В работе проанализирован характер разрушения ПММА в результате динамического нагружения. Построена диаграмма распределения вида излома от длины проросшей из вершины надреза трещины (по вертикали) и длительности импульса (по горизонтали) (рис. 5). По мере распространения трещины из вершины надреза характер разрушения меняется — скол, квазискол, чашечный излом (аналогично терминологии для металлов), что отвечает зеркальной области, участкам увеличенной шероховатости и параболической или чашечной областям соответственно. При дальнейшем распространении трещины эти основные виды изломов периодически чередуются. Типичные виды изломов представлены на рис. 6. Смена характера разрушения отчетливо наблюдается на этом же рисунке. С увеличением расстояния от вершины надреза размер чашечек уменьшается согласно схеме, представленной на рис. 6 от 32 до 13 мкм. Зная диаметр чашек и удельную поверхностную энергию разрушения ПММА [8], равную  $\gamma = 2.1 \cdot 10^2 \text{ J/mm}^2$ , можно подсчитать энергию разрушения ПММА, приходящуюся на среднюю чашку излома,

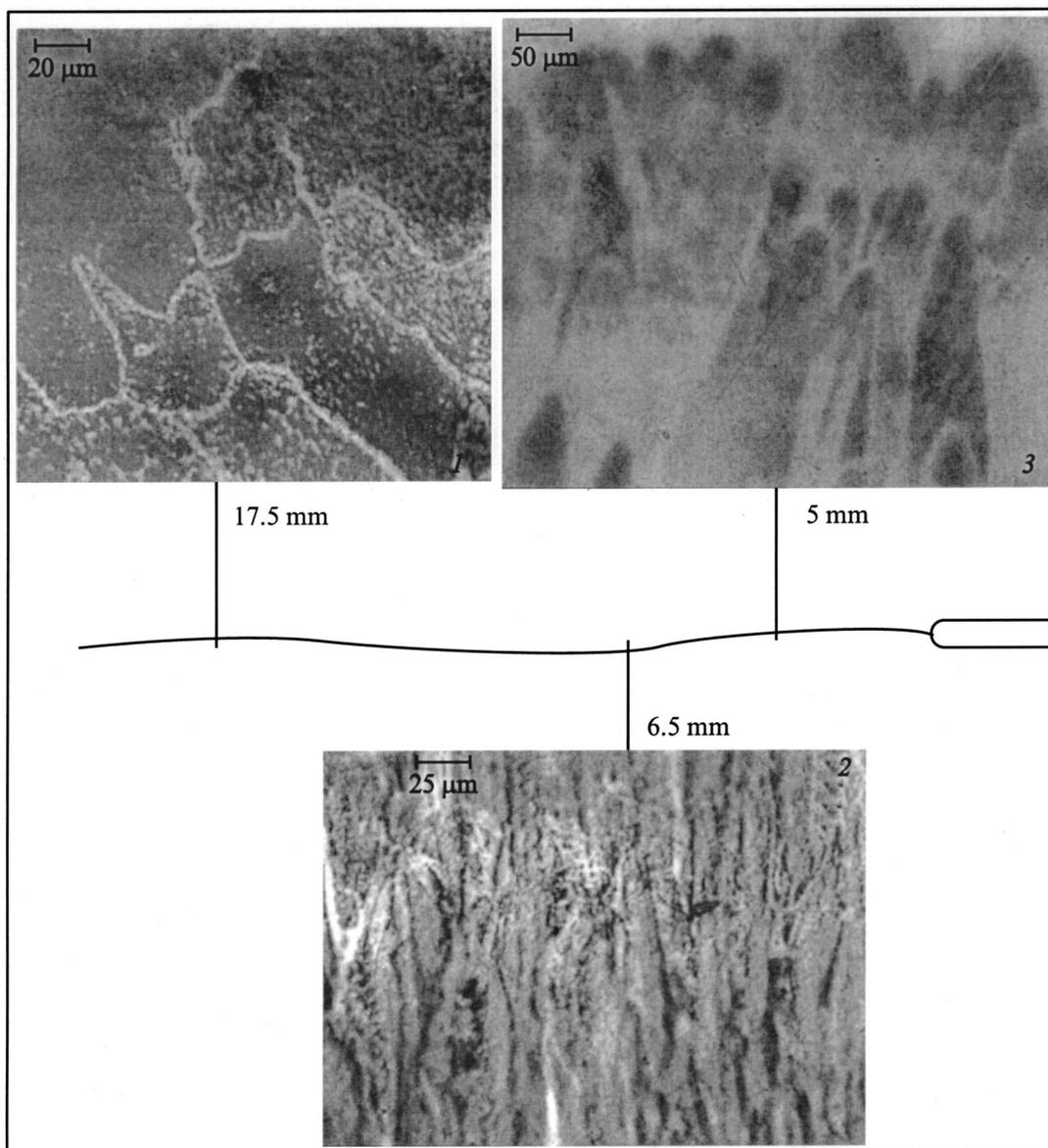


Рис. 6. Типичные виды изломов и их расположение вдоль трещины (1 — mirror, 2 — mist, 3 — hackle).

которая уменьшается по мере распространения трещины в глубину образца от  $17 \cdot 10^{-8}$  до  $2.8 \cdot 10^{-2}$  J. Результаты приведены в табл. 1.

Кроме того, вблизи вершины надреза в зеркальной части образца на поверхности разрушения была обнаружена небольшая трещина, идущая в глубину образца

Таблица 1. Энергия разрушения чашечного излома

Длина трещины, $L_{cr}$ , mm	Размер чашек, $d$ , $\mu\text{m}$	Скорость трещины, $V$ , m/s	Энергия разрушения, $E$ , J/cup
5.0	32	92.4	$17 \cdot 10^{-8}$
17.5	18	50.696	$5.3 \cdot 10^{-8}$
25.5	13	194.25	$2.8 \cdot 10^{-8}$

нормально к поверхности разрушения. На расстоянии примерно 10 mm от вершины надреза была обнаружена клиновидная трещина (рис. 7), зародившаяся на чашках. Трещина идет в глубину образца по нормали к поверхности разрушения. На расстоянии примерно 4.2 mm она начинает ветвиться (рис. 7) — перпендикулярно основной трещине отходят две ветви, направление распространения которых совпадает с фронтом магистральной трещины. Характер разрушения этой клиновидной трещины чашечный.

В то же время от основной трещины отходят мезотрещины (рис. 8), но их характер отличается от тех, что представлены в работах [5–10]. Угол наклона этих мезотрещин меняется немонотонно по мере удаления от вершины надреза. Результаты приведены в табл. 2.

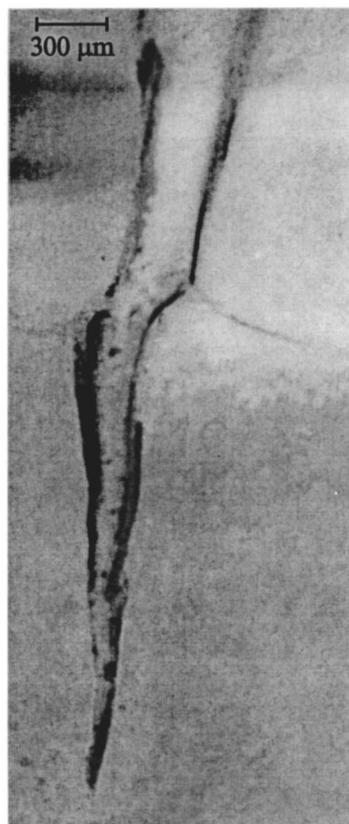


Рис. 7. Клиновидная трещина в ПММА.



Рис. 8. Ветвление мезотрещин в ПММА.

Кроме того, мезотрещины зарождаются в зеркальной и шероховатой областях. На участках чашечного или параболического излома они отсутствуют.

Таблица 2. Углы наклона мезотрещин

Длина трещины, $L_{cr}$ , mm	Угол наклона мезотрещины, °	Скорость распространения трещины, $V$ , m/s
1	32	271.6
3	33	119.8
6.5	29	70.58
7.1	19	58.95
7.6	28	62.27
27	26	126.79

Что касается скорости распространения трещины, то в отличие от данных, приведенных в работе [8], она ведет себя немонотонно с ростом расстояния от вершины надреза аналогично изменению характера разрушения.

## Заключение

Разработана методика визуализации процесса хрупкого разрушения при импульсном нагружении образцов из ПММА с макротрещинами.

Экспериментально определены особенности процесса хрупкого разрушения при нагружении импульсами микросекундной длительности пороговой амплитуды: 1) запаздывание начала движения трещины по отношению к моменту достижения приложенным напряжением порогового значения; 2) пропорциональность длины проросшей трещины амплитуде нагрузок, превышающих пороговые; 3) периодичность в характере поверхности разрушения ПММА при продвижении трещины до ее первой остановки; 4) построена диаграмма изменения характера разрушения с длительностью импульса нагружения и расстоянием от вершины надреза; 5) оценена поверхностная энергия разрушения, приходящаяся на чашку, которая связана с характерным размером фактуры материала; показано, что она уменьшается от  $17 \cdot 10^{-8}$  до  $2.8 \cdot 10^{-8}$  J/cm<sup>2</sup> с увеличением расстояния от вершины надреза; 6) установлено, что мезотрещины зарождаются только в местах зеркального и шероховатого излома и определены углы их наклона к направлению главной трещины, величины которых не зависят от скорости роста трещины и удаления от вершины надреза.

## Список литературы

- [1] Кривошеев С.И. Препринт. № 142. СПб.: ИПМаш РАН, 1997. 32 с.
- [2] Шнейерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
- [3] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М. 1974. 640 с.
- [4] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. № 5. С. 180–182.
- [5] Петров Ю.В., Уткин А.А. Механика разрушения. Теория и эксперимент. СПб.: Изд-во университета, 1995. С. 94–104.

- [6] *Златин Н.А., Пугачев Г.С., Мочалов С.М., Брагов А.М.* // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. С. 2599–2602.
- [7] *Shockey D.A., Erlich D.C., Kalthoff J.F., Homma H.* // Engng. Fracture Mech. 1986. Vol. 23. P. 311–319.
- [8] *Berry J.P.* // J. Polymer Sci. 1961. N 50. P. 107–112.
- [9] *Алешин В.И., Кувшинский Е.В.* // Механика полимеров. 1978. № 6. С. 989–992.
- [10] *Fineberg J., Marder M.* // Phys. Rev. 1999. Vol. 313. P. 1–108.
- [11] *Felner C.E.* Theoretical and Applied Mechanics Report. N 224. University Illinois, 1962. 35 p.
- [12] *Kies J.A., Sallivan A.M., Irwin G.R.* // J. Appl. Phys. 1950. Vol. 21. P. 716–823.
- [13] Fracture Processes in Polymeric Solids. New York; London; Sydney: International Publishers, 1970. 523 p.