

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Т. Г. ШЕВЧЕНКО

На правах рукописи

РЫЖАКОВ Андрей Николаевич

УДК 620.17:539.3

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ТРЕЩИН В Твёрдых ПОЛИМЕРАХ ПРИ
ИМПУЛЬСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Специальность: 01.02.04. – механика деформируемого
твёрдого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Киев 1993

18 27.067

Работа выполнена в Симферопольском государственном университете им. М. В. Фрунзе

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор
В. И. Савченко.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
А. А. Каминский
кандидат физико-математических наук, доцент
Т. Ю. Кепич

Ведущая организация – Институт электросварки им. Е. О. Патона АН Украины

Защита состоится "29" сентября 1993г. в часов на заседании специализированного совета К 068.18.09 в Киевском государственном университете им. Т. Г. Шевченко по адресу: 252127, Киев-127, проспект им. академика В. Глушкова, 6, механико-математический факультет КГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета.

Автореферат разослан "12" августа 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета *М. Ковальчук* Ковальчук В. Ф.

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00815197 (V)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основной причиной хрупкого разрушения элементов конструкций под воздействием импульсных нагрузок является лавинообразный рост трещин, развивающихся из первоначальных дефектов. Наиболее опасной, с точки зрения возможности начала процесса разрушения, является растягивающая нагрузка. Математическое описание процесса инициирования и развития трещины под действием волны растяжения получено только для некоторых задач, причем лишь в идеализированной постановке, не учитывающей в должной мере реальное физическое поведение материала в области вершины трещины. Теоретические решения, полученные в рамках идеализированной модели хрупкого разрушения не могут объяснить: 1) наблюдаемую в эксперименте зависимость величины критического коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от скорости нагружения; 2) особенности кинетики магистральной трещины; 3) возникновение микроразрушений перед фронтом движущейся трещины и их влияние на процесс ее развития. До сих пор не разработан четкий критерий старта и распространения магистральной трещины при динамическом нагружении. Поэтому, несмотря на трудности, связанные с регистрацией быстрораспространяющихся трещин и сопутствующих им полей напряжений, актуально экспериментальное исследование процесса развития одиночной трещины, инициированной импульсным нагружением, направленное на изучение зависимости протекания процесса разрушения от параметров импульса нагрузки; выявление взаимосвязей между величинами, характеризующими процесс трещинообразования на различных его этапах.

Анализ экспериментальных данных даст возможность построить физически обоснованную модель процесса разрушения под действием волны растяжения и использовать ее в дальнейшем для оценки работоспособности элементов конструкций при импульсном режиме нагружения.

Цель работы состоит в изучении закономерностей развития магистральной трещины при воздействии на нее импульса растяжения. Для достижения намеченной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработана методика экспериментального исследования процесса растягивания и распространения магистральной трещины в твердых полимерах, инициированной импульсным растяжением с варьируемой в широких пределах скоростью деформирования;

- исследованы взаимосвязи между параметрами, описывающими процесс разрушения на различных его этапах;
- сформулирован критерий стагивания и распространения трещины;
- предложена физически обоснованная энергетическая модель развития трещины, учитывающая реальное поведение материала и поля напряжений в области фронта разрушения;
- исследованы закономерности образования микроразрушений перед вершиной трещины.

Методика исследований. Поставленные в работе задачи решались методами высокоскоростной фотографии и фотоэлектронной регистрации в сочетании с поляризационно-оптическим методом и методом каустик. Микромеханика разрушения исследовалась посредством фрактографического анализа поверхностей разрушения.

Исследования проводились на образцах из полиметилметакрилата ПММА и отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20 МГГА, находящихся в стеклообразном состоянии.

Научная новизна.

1. Разработана методика и оригинальные устройства для экспериментального исследования процесса стагивания и распространения трещины в твердых полимерах при симметричном импульсном растяжении с варьируемыми амплитудно-временными параметрами импульса нагружения.
2. Проведено экспериментальное исследование изменения коэффициента интенсивности напряжений в вершине стационарной и распространяющейся трещины, инициированной импульсом растяжения. Установлено, что значение коэффициента интенсивности напряжений в данный момент времени определяется не только действующим на берега трещины растягивающим напряжением и скоростью деформации, но и всей предисторией нагружения.
3. Для случаев стационарной и движущейся с постоянной скоростью трещины предложена модель изменения в ее вершине коэффициента интенсивности напряжений под действием симметричного импульса растяжения. Приведены оценочные расчеты.
4. Сформулирован критерий стагивания и распространения магистральной трещины.
5. Предложена методика оценки эффективной энергии, затраченной на образование поверхности разрушения. Установлено, что

по мере распространения трещины величина эффективной поверхностной энергии возрастает.

6. Проведено экспериментальное исследование кинетики роста трещины. Получены данные, свидетельствующие об определяющей зависимости средней скорости трещины от скорости стока энергии в ее вершину. Установлено, что средняя скорость трещины не зависит от величины наблюдаемого КИН.

7. Предложена физически обоснованная энергетическая модель распространения одиночной магистральной трещины, учитывающая реальное поведение материала и полей напряжений в области фронта разрушения.

8. Проведено фрактографическое исследование поверхности разрушения, образующейся при распространении трещины инициированной импульсным растяжением. Установлено наличие осцилляций удельной плотности раскрывшихся микродефектов. Выявлена их корреляция с изменением ускорения магистральной трещины. Получены экспериментальные факты, свидетельствующие об идентичности механизмов протекания процесса разрушения на микрои макроуровнях.

Практическая ценность. Разработанные методика экспериментального исследования процесса распространения в твердых полимерах трещины, инициированной импульсным растяжением с варьируемыми амплитудой и скоростью деформации, и устройство для инициирования и наблюдения трещин позволяют исследовать зависимость величин, характеризующих процесс стагнации и распространения магистральной трещины от амплитудно-временных параметров импульса растяжения. Сопоставление и анализ полученных экспериментальных данных позволяет строить физически обоснованную модель процесса трещинообразования.

На основе полученных экспериментальных данных развиты теоретические представления о формировании зоны перенапряжений в области вершины стационарной и движущейся с постоянной скоростью трещины, исследование которых позволяет: 1) оценить с достаточной точностью в произвольный момент времени величину коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины при воздействии на нее импульса растяжения произвольной формы; 2) определить момент стагнации трещины; 3) оценить затраты энергии на образование поверхности разрушения при минимальном использовании средств ЭВМ; 4) прогнозировать разрушение материалов при воздействии на

них кратковременных интенсивных нагрузок.

Диссертационная работа выполнена в Проблемной научно-исследовательской лаборатории динамических процессов Симферопольского госуниверситета.

Выводы настоящей работы могут быть использованы в организациях, занимающихся изучением динамической прочности и разрушения материалов под воздействием кратковременных интенсивных нагрузок.

Достоверность полученных результатов экспериментальных подтверждается сопоставлением их с данными других авторов, результатами численных расчетов методом конечных элементов, выполненными в Проблемной лаборатории СГУ.

Достоверность развитых в работе теоретических представлений подтверждается хорошим соответствием полученных на их основе оценок величин коэффициента интенсивности напряжений и удельной эффективной поверхностной энергии с имеющимися экспериментальными данными.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на всесоюзной научной школе по динамическим процессам в горных породах (Симферополь, 1987-1990 г.г.), на III Всесоюзном симпозиуме по механике разрушения (г. Киев, 1990г.), на Международной конференции "Сварные конструкции" (г. Киев, 1990г.), на семинаре "Проблемы механики" под руководством член-корреспондента АН Украины Улитко А.Т. (Киев, 1993 г.), на научных семинарах кафедры прикладной математики и Проблемной научно-исследовательской лаборатории СГУ им. М. В. Фрунзе.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 128 страниц машинописного текста, 52 рисунка на 33 страницах, 3 таблицы и список литературы из наименований на 3 страницах.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Методика исследования процесса распространения трещины в твердых полимерах при импульсном растяжении, использующая новые устройства для инициирования и наблюдения трещин и установку для регистрации амплитудно-временных параметров инициирующего трещи-

- ну импульса растяжения.
2. Результаты экспериментального исследования напряжённого состояния вблизи вершины стационарной и движущейся трещины, нагружаемой различными по форме и длительности импульсами растяжения. Экспериментально показано, что мгновенное значение коэффициента интенсивности напряжений определяется скоростью деформации и формой инициирующего импульса, то есть всей предисторией нагружения.
 3. Энергетическая модель формирования зоны перенапряжения в области вершины стационарной и движущейся с постоянной скоростью трещины при воздействии на неё симметричного импульса растяжения.
 4. Критерий срагивания и распространения трещины.
 5. Методика оценки удельной эффективной поверхностной энергии при динамическом разрушении.
 6. Результаты экспериментального исследования кинетики роста трещины. Установлено влияние изменения скорости деформации в импульсе нагружения на среднюю скорость распространения трещины.
 7. Результаты фрактографического исследования поверхности разрушения. Установлено наличие осциллирующей поверхностной плотности микротрещин, выявлена их корреляция с изменением ускорения магистральной трещины. Обнаружена зависимость динамической микропрочности сплошного материала от скорости нагружения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования. Кратко изложено содержание диссертации и сформулированы основные положения, выносившиеся на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы по взаимодействию волн напряжений со стационарной трещиной и динамическому разрушению. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований полей напряжений, формирующихся в области вершины стационарной трещины при воздействии на неё импульсного нагружения — различного характера. Рассмотрен круг задач о распространении магистральной трещины, инициированной как статическим, так и динамическим нагружением. Рассмотрены различные концепции и

критерии разрушения. Обсуждено влияние энергоснабжения трещины и энергетических потерь на ограничение предельной скорости её роста. Приведены результаты исследований взаимосвязи величин, характеризующих процесс трещинообразования: текущего и критического значения коэффициента интенсивности напряжений, скорости трещины, параметров импульса нагружения. Изложены методики и результаты фрактографических исследований поверхности разрушения твёрдых полимеров.

В результате анализа литературы сделаны выводы, характеризующие современное состояние динамической механики разрушения:

1. Основным объектом её рассмотрения в рамках идеализированной модели хрупкого разрушения является развитие прямолинейной трещины в упругой плоскости. При воздействии на трещину волны нагрузки в её вершине возникают поля напряжений, при асимптотическом описании которых используются коэффициенты интенсивности напряжений. Процесс разрушения предполагается происходящим непосредственно в самой вершине трещины. Расход энергии на образование новой поверхности полагается константой для данного материала, однозначно связанной с критическим значением коэффициента интенсивности напряжений. На основе последнего допущения выводятся критерии старта, остановки и распространения трещины.

2. Результаты большинства теоретических исследований по динамике разрушения имеют ограниченную область применимости из-за идеализированной постановки задач, сложной формы записи полученных выражений, требующих применения ЭМ для проведения расчётов.

3. Разнообразные фактические данные по распространению трещины далеко не всегда соответствуют следствиям из идеализированной модели: проявляется неоднозначность выводов ряда работ относительно критериев старта и остановки трещины; не всегда подтверждается однозначное соответствие между скоростью трещины и коэффициентом интенсивности напряжений; не исследовано с достаточной полнотой влияние зоны предразрушения на характер движения магистральной трещины.

Для преодоления выявленных противоречий особое значение могут иметь смешанные экспериментально-аналитические подходы, в которых критерии разрушения и взаимосвязи между параметрами, описывающими процесс динамического разрушения, выводятся из анализа экспериментальных данных. Полученные выводы могут быть использованы для уточнения идеализированной модели хрупкого раз-

рушения, совершенствования аналитических и численных методов анализа процесса трещинообразования при динамическом нагружении

Во второй главе рассматриваются вопросы разработки методики экспериментального исследования процесса динамического разрушения. Обоснован выбор метода инициирования трещины (воздействие на неё плоской симметричной волны растяжения), который позволяет создавать в образце поле напряжений, достаточное для начала процесса разрушения без предварительного статического нагружения; измерять амплитудно-временные параметры импульса нагружения воздействующего на трещину; регистрировать процесс трещинообразования от начала действия нагрузки на трещину до полного разрушения образца.

Обоснован выбор формы и размеров образцов, обеспечивающий устранение влияния отражённых от границ образца волн напряжений на процесс разрушения.

Разработаны два типа нагрузочных устройств для динамического инициирования трещины, которые, используя электромагнитное взаимодействие проводников с током и взрыв линейного заряда ВВ, генерируют в образце плоскую симметричную волну растяжения, распространяющуюся от граней образца к его центру. Разработана методика, позволяющая варьировать в широких пределах амплитуду и скорость деформирования в импульсе нагрузки.

Рассмотрены преимущества и недостатки высокоскоростной фотографии и фотоэлектронной регистрации в сочетании с поляризационно-оптическим методом и методом каустик в сравнении с другими способами исследования динамики трещин. Описаны методики определения динамического коэф. дифференциала интенсивности напряжений, скорости трещины и амплитудно-временных характеристик импульса нагружения по экспериментальным данным, полученным вышеперечисленными методами.

Приведены методики и результаты определения динамических механических и оптико-механических свойств материалов ПММА и ЭД-20МТГА.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования динамического разрушения, инициированного плоской осимметричной волной растяжения, проведено их обсуждение, разработана энергетическая модель формирования зоны перенапряжения в области вершины стационарной и движущейся трещины, предложен критерий старта и распространения трещины.

По разработанной методике проведены эксперименты по разрушению образцов при различных амплитудно-временных параметрах импульса нагрузки. Получены зависимости от времени T : коэффициента интенсивности напряжений $K_I(t)$ напряжения в нагружающем импульсе $\sigma(T)$; длины трещины $l(T)$; плотности микротрещин в единице площади поверхности разрушения ПММА $n(T)$ (рис. 1).

В соответствии с характером изменения во времени величин K_I , σ , l , n выделены три основных этапа процесса разрушения:

1. Взаимодействие волны растяжения со стационарной трещиной ($T < T_0$)
2. Стрэгивание трещины ($T_0 < T < T_{cr}$)
3. Распространение магистральной трещины ($T > T_{cr}$) (рис. 1).

В течении первого этапа происходит формирование зоны перенапряжения в вершине стационарной трещины. Из характера зависимостей $K_I = K_I(T)$ и $\sigma = \sigma(T)$ установлено, что на первом этапе изменение во времени величины $K_I(T)$ отражает все временные особенности импульса $\sigma(T)$. Получены зависимости $K_I = K_I(\sigma)$ (рис. 2). Установлено, что их нелинейный характер детерминирован резкими изменениями скорости деформирования в импульсе нагружения. Причиной этому могут быть инерционные эффекты, проявляющиеся при формировании зоны перенапряжения, связанные с тем, что при полученных в эксперименте скоростях нагружения время обмена информацией между вершинами трещины нельзя считать бесконечно малым. На основе полученных экспериментальных данных разработана энергетическая модель формирования зоны перенапряжения в области вершины стационарной трещины. Модель базируется на следующих допущениях:

1. Деформация образца с трещиной при его динамическом нагружении осуществляется в соответствии с представлениями линейной механики разрушения.

2. Зона перенапряжения в области вершины трещины формируется за счёт энергии волны растяжения, падающей на свободную поверхность трещины со скоростью продольной волны C_L и стекающей затем в её вершину со скоростью волны Рэлея C_R .

3. Характерный размер зоны перенапряжения в плоскости образца $R = R(T)$ по мере сброса энергии со свободных поверхностей трещины увеличивается прямо пропорционально T с некоторой скоростью C_* , равной по порядку величины скорости распространения упругих волн в материале образца: $R = C_* \cdot T$.

4. Связь между энергией $E_{ct}(T)$, переданной в зону перенапряжения и коэффициентом интенсивности напряжений принимается в виде:

$$\mathcal{E}_{\text{ст}}(\tau) = A \frac{d}{E} K_I^2(\tau) c_* \tau \quad (1)$$

Для того, чтобы в рамках данной модели исследовать формирование зоны перенапряжений при воздействии на трещину симметричного импульса растяжения произвольной формы, предложено аппроксимировать графическую зависимость $\sigma = \sigma(\tau)$ ломаной линией.

Основу оценочного расчёта составляет вычисление энергии $\mathcal{E}_{\text{ст}}(\tau)$ сброшенной в вершину трещины с её берегов к моменту времени τ при заданной скорости нарастания нагрузки. Поскольку энергия, содержащаяся в единице объёма образца при воздействии на него импульса растяжения $\sigma(\tau)$ определяется как:

$$d\mathcal{E}_{\text{ст}} = \frac{(1+\nu)}{2E} \sigma^2(\tau) dV = \frac{(1+\nu)}{2E} \sigma^2(\tau) dL dC, d\tau \quad (2)$$

то величина $\mathcal{E}_{\text{ст}}$ может быть определена интегрированием (2) по времени и длине трещины. Пределы интегрирования находятся из анализа физики стока энергии. Подставляя выражение для $\mathcal{E}_{\text{ст}}(\tau)$ в (1) можно получить формулы для нахождения коэффициента интенсивности напряжений. В случае импульса нагружения в виде двузвенной ломаной они имеют вид (рис. 3):

$$\begin{aligned} \tau < \frac{L_0}{c_R} ; K_I(\tau) &= \psi(c) \dot{\sigma}_1 \tau^{3/2} \\ \frac{L_0}{c_R} < \tau < \tau_1 ; K_I(\tau) &= \psi(c) \dot{\sigma}_1 \left\{ \frac{1}{\tau} [\tau^4 - X_0^4] \right\}^{1/2} \\ 0 < \tau - \tau_1 < \frac{L_0}{c_R} ; K_I(\tau) &= \psi(c) \left\{ \frac{1}{\tau} [(\tau^4 - X_0^4) \dot{\sigma}_1^2 + 4 \dot{\sigma}_1 \cdot \right. \\ &\cdot (\dot{\sigma}_2 - \dot{\sigma}_1) (\tau_1^3 \tau - \frac{\tau_1^4}{2} + \tau^3 (\frac{\tau_1}{2} - \tau_1))] + (\dot{\sigma}_2 - \dot{\sigma}_1)^2 (\tau - \tau_1)^4 \left. \right\}^{1/2} \\ \tau - \tau_1 > \frac{L_0}{c_R} ; K_I(\tau) &= \psi(c) \cdot \left\{ \frac{1}{\tau} [(\tau^4 - X_0^4) \dot{\sigma}_1^2 + \dot{\sigma}_1 \cdot \right. \\ &\cdot (\dot{\sigma}_2 - \dot{\sigma}_1) (2(\tau^4 - X_0^4) - 4\tau_1(\tau^3 - X_0^3) + 4\frac{\tau_1^3 L_0}{c_R}) + (\dot{\sigma}_2 - \dot{\sigma}_1)^2 \cdot \\ &(\tau - \tau_1)^4 - (X_0 - \tau_1)^4 \left. \right\}^{1/2} ; \psi(c) = \left(\frac{(1+\nu)}{24A} \frac{c_1 c_R}{c_*} \right)^{1/2} \quad (3) \\ X_0 &= \tau - L_0 / c_R \end{aligned}$$

где ψ — коэффициент Пуассона; E — модуль Гюгса; d — толщина образца; $\dot{\sigma}_1$ — скорость нарастания напряжений в импульсе нагрузки при $\tau < \tau_1$; $\dot{\sigma}_2$ — при $\tau > \tau_1$. Константа A находилась из условия наилучшего соответствия оценочного расчёта данным эксперимента: для ЭД-20 $A \approx 3 \cdot 10^{-2}$.

Зависимости $K_I = K_I(\tau)$ рассчитанные по формулам (3) для наблюдаемых в эксперименте зависимостей $\sigma = \sigma(\tau)$, совпадают с экспериментально полученными значениями $K_I(\tau)$ и с результатами численного

расчёта методом конечных элементов с использованием \int -интеграла с относительной погрешностью в среднем не выше 10%. Это доказывает правильность предложенной модели формирования зоны перенапряжения. Из анализа энергетической модели следует, что механический смысл коэффициента интенсивности напряжений состоит в том, что его квадрат пропорционален средней плотности энергии, сконцентрированной в зоне перенапряжения, и никак не связан с работой по приращению длины трещины.

Экспериментально установлено, что при $T = \tau_c$ начинается уменьшение скорости нарастания коэффициента интенсивности напряжений $K_I(t)$ при продолжающемся увеличении скорости деформации $\dot{\epsilon}(t)$, что говорит о расходовании части поступающей в вершину трещины энергии на образование поверхности разрушения. Таким образом, начало второго этапа процесса разрушения идентифицировано с уменьшением скорости нарастания коэффициента интенсивности напряжений в момент времени $T = \tau_c$, при этом величины $K_I(t)$ и $\sigma(t)$ достигают своих критических значений $K_I(\tau_c) = K_{Ic}$ и $\sigma(\tau_c) = \sigma_c$. В результате экспериментов выполненных на образцах из ЭД-20 получены зависимости критических параметров K_{Ic} , σ_c , τ_c от эффективной скорости деформации $\bar{\epsilon} = \frac{1}{E} \sum_i \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\sigma_c} \dot{\sigma}_i$, где i -й индекс относится к узлам аппроксимирующей $\sigma(t)$ ломаной линии рис.5. Из приведенных зависимостей следует, что при динамическом нагружении K_{Ic} , σ_c , τ_c являются функциями процесса и не являются константами материала. Следовательно, ни одна из этих величин не может служить критерием стратификации трещины. Экспериментально установлено, что единственной величиной, постоянной для данного материала, является:

$$\epsilon_{ст}^{KP} = A \frac{d}{E} K_{Ic}^2 c_* \tau_c \quad (4)$$

которая, согласно (1) имеет физический смысл энергии, переданной в область вершины трещины к моменту начала её подрастания. Таким образом, величина $\epsilon_{ст}(\tau_c) = \epsilon_{ст}^{KP}$ может быть принята за критерий стратификации трещины. Для ЭД-20МТФА $\epsilon_{ст}^{KP} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Из найденного критерия стратификации следует однозначный вывод о возрастании K_{Ic} и σ_c с ростом скорости нагружения, так как из условия постоянства $\epsilon_{ст}^{KP}$ следует уменьшение τ_c с ростом $\dot{\sigma}$ (поток энергии в вершину трещины возрастает), а уменьшение величины τ_c приводит, согласно (1), к увеличению K_{Ic} . Таким образом, из (4) следует вывод об уменьшении времени жизни наг-

руженных связей в области вершины трещины при увеличении интенсивности растягивающих усилий, что совпадает с основным выводом термофлуктуационной теории.

Обсуждены границы применимости разработанной методики. Показано, что из зависимостей энергетической модели и критерия старта трещины может быть получено выражение вида $F\left(\frac{L_0}{c_R}\right) \cdot \dot{\epsilon}^{cr} = const$ ставящее в соответствие каждой длине трещины L_0 некоторую скорость деформации $\dot{\epsilon}_{cr}$ при которой динамические эффекты не оказывают влияния на величины критических параметров и для их нахождения можно использовать статические зависимости.

На основе выдвинутого энергетического критерия разрушения дано качественное объяснение поведения $K_I(T)$ в вершине движущейся магистральной трещины. На основе анализа зависимости $K_I(\tau_{cr} < T < \tau_m)$ и сопоставления её с данными по кинетике распространения трещины показано, что на данном временном промежутке, благодаря увеличившейся скорости трещины, вся вновь поступающая в её вершину энергия идёт на образование свободной поверхности, а снижение $K_I(T)$ объясняется уменьшением плотности ранее сброшенной в вершину трещины энергии в соответствии с (1). Установлено, что при распространении трещины выполняется соотношение $K_{Ic}^2 \tau_c \leq K_{Im}^2 \tau_m$ что позволяет считать (4) критерием не только срагивания, но и распространения трещины. Дальнейший рост значений $K_I(T)$ при $T > \tau_m$ говорит о возрастании потока энергии в вершину трещины настолько, что вся поступающая энергия не успевает реализовываться непосредственно на фронте разрушения, в результате чего создаются условия для образования зоны предразрушения.

Разработана энергетическая модель формирования зоны перенапряжения в области вершины трещины, движущейся с постоянной скоростью v (рис.3). При этом, кроме допущений I-3 делается ещё и следующее:

4. Область перенапряжения движется вместе с вершиной трещины и связь $K_I(T)$ с $\epsilon_{cr}(T)$ сохраняется в виде (1).

Полагая, что переданная в область вершины трещины энергия находится в зоне перенапряжения можно получить следующее выражение:

$$0 < T - \tau_{cr} < \frac{L_0}{c_R}; \quad K_{IT}(T) = \left\{ \frac{1}{Ac_R T} \left[\frac{E}{d} \epsilon(\tau_{cr}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(1+\nu)c_1}{24} (c_R \dot{\epsilon}_1^2 (\Phi^4 - X^4 - \tau_{cr}^4 + N^4) + c_R \dot{\epsilon}_1 (\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \cdot (2(\Phi^4 - X^4 - \tau_{cr}^4 + N^4) - 4T_1(\Phi^3 - X^3 - \tau_{cr}^3 + N^3)) \right) + \right.$$

$$+ c_R (\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1)^2 \left\{ (\Phi - T_1)^4 - (X - T_1)^4 - (\tau_{\text{стп}} - T_1)^4 + (N - T_1)^4 \right\} + \\ + \dot{\epsilon}_2^2 \left\{ (\dot{\epsilon}_2 T + T_1 (\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2))^4 (c_R - v) + v (\dot{\epsilon}_2 \tau_{\text{стп}} + T_1 (\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2))^4 - \right. \\ \left. - c_R (\dot{\epsilon}_2 \Phi + T_1 (\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2))^4 \right\} \left. \right\}^{1/2}; \quad \xi = v (T - \tau_c); \quad (5)$$

$$\Phi(T) = T - \xi/c_R; \quad X(T) = T - \frac{\xi + l_0}{c_R}; \quad N(T) = \tau_{\text{стп}} - \frac{l}{c_R}$$

Результаты вычисления $K_{I\Phi}(T)$ по формуле (5) приведены на рис. 4. Разность между квадратами вычисленного и экспериментально зарегистрированного значений коэффициентов интенсивности напряжений пропорциональна энергии затраченной на распространение трещины к моменту времени T. Затраты на процесс трещинообразования количественно выражает величина удельной эффективной поверхностной энергии $\gamma_{\text{эф}}$ (рис. 4):

$$\gamma_{\text{эф}} = \frac{A c_R}{v E} \frac{(T_{i+1} (K_{I\Phi i+1}^2 - K_{I\Phi i}^2) - T_i (K_{I\Phi i}^2 - K_{I\Phi i-1}^2))}{T_{i+1} - T_i} \quad (6)$$

Результаты расчётов показывают общую тенденцию к увеличению $\gamma_{\text{эф}}$ со временем, что объясняется увеличением количества микродефектов, развивающихся в зоне предразрушения, а так же ростом динамических потерь при увеличении скорости распространения трещины. Вычисленные значения $\gamma_{\text{эф}}$ лежат в пределах: $5 \cdot 10^{-4} - 15 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$.

Проведено обсуждение экспериментальных данных, касающихся кинетики распространения магистральной трещины и развития микродефектов перед её фронтом. Выявлен скачкообразный характер развития трещины при импульсном растяжении, заключающийся в чередовании состояния покоя и движения её вершины со скоростью не превышающей c_R . В исследуемых материалах длительность скачков составляет 1-3 мкс; а продолжительность остановки 0,5-2 мкс. Методом наименьших квадратов для каждого эксперимента была найдена "средняя по скачкам" скорость трещины v , которая в процессе развития трещины изменялась в пределах 280-500 м/с. Экспериментально установлено, что в образцах из ЭД-20МТФА увеличение v происходит скачком в момент резкого увеличения $\dot{\epsilon}$ в нагружающем импульсе; средняя скорость трещины, распространяющейся в ПММА изменяется непрерывно, а при аналогичном изменении $\dot{\epsilon}$ происходит увеличение \dot{v} (рис. 6, 7). Анализ полученных данных приводит к заключению об определяющей зависимости v от скорости поступления энергии в вершину трещины $\dot{\epsilon}_{\text{ст}}$, а не от величины $K_{I\Phi}$. Отличия в кинетике распространения трещины в образцах из ЭД-20 и ПММА объясняется различной степенью дефектности этих материа-

дов на микроуровне и, как следствие, различными возможностями в поглощении энергии, поступающей в вершину трещины.

На образцах из ПММА проведено фрактографическое исследование поверхности разрушения. Установлено наличие осциллирующей поверхностной плотности микротрещин, выявлена их зависимость от изменения ускорения магистральной трещины (рис. 4). Уменьшение плотности микротрещин объясняется тем, что сразу после ускорения магистральной трещины большая часть поступающей энергии реализуется непосредственно в её вершине. Определены значения критического разрывного напряжения $\tilde{\sigma}_c$, при которых происходит раскрытие микротрещин из микродефектов, находящихся на различных расстояниях r от фронта исходной трещины. Выявлено уменьшение $\tilde{\sigma}_c$ при увеличении r . Поскольку имеет место уменьшение скорости роста нагрузки на месте возникновения микродефекта при увеличении r , то это означает, что, как и в случае магистральной трещины, критическое разрывное напряжение для микродефекта уменьшается с уменьшением скорости нарастания деформации в инициирующем его импульсе нагружения. Последнее указывает на идентичность протекающих процессов разрушения на микро- и макроуровнях.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика исследования процесса распространения трещин, инициированных плоской симметричной волной растяжения, с варьируемой в широких пределах скоростью нагружения.
2. Разработаны новые устройства для инициирования и наблюдения трещин.
3. Разработана методика регистрации амплитудно-временных параметров импульса растяжения, воздействующего на берега трещины.
4. Проведено экспериментальное исследование изменения коэффициента интенсивности напряжений в вершине стационарной и распространяющейся трещины, инициированной импульсным растяжением. Установлена определяющая зависимость коэффициента интенсивности напряжений от скорости деформации и формы нагружающего импульса. Предложено качественное объяснение характера напряжённого состояния в области вершины трещины после её стабилизации.
5. Разработана энергетическая модель формирования зоны перенапряжения в области вершины стационарной и распространяющейся с

постоянной скоростью трещины, инициированной импульсным растяжением. Получены выражения для оценки величины концентрации энергии и коэффициента интенсивности напряжений. Обсуждены границы применимости предложенной модели.

6. Сформулирован критерий срагивания и распространения трещины. Показано, что результаты полученные с его помощью могут быть интерпретированы в рамках термофлуктуационной теории Куркова-Гартеньева.

7. Предложена методика оценки удельной эффективной поверхностной энергии при динамическом разрушении.

8. Проведено экспериментальное исследование кинетики роста трещины. Установлено влияние изменения скорости деформации в импульсе растяжения на среднюю скорость распространения трещины.

9. Проведен фратографический анализ поверхностей разрушения. Выявлена корреляция осцилляций удельной поверхностной плотности микротрещин с изменением ускорения магистральной трещины. Установлена идентичность протекания процессов разрушения на микро- и макроуровнях.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Рыжак А. Н., Ульянов И. В. Исследование динамики разрушения горных пород. - В кн.: Тезисы докладов 6 Всесоюзной научной школы "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках". - Симферополь, 1987 г., с. 137.

2. Костандов Г. А., Рыжак А. Н. Слияние коллинеарных трещин. В кн.: Тезисы докладов 7 Всесоюзной научной школы "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках". - Симферополь, 1990 г., с. 175.

3. Костандов Г. А., Рыжак А. Н. Слияние двух трещин при динамическом нагружении. - В кн.: Тезисы докладов 3 Всесоюзной конференции по механике разрушения. т. I. "Трещиностойкость материалов и элементов конструкций". - Киев: Ин-т проблем прочности АН УССР, 1990 г., с. 109-110.

4. Костандов Г. А., Рыжак А. Н. Динамический разрыв перемычки между трещинами. - В кн.: Тезисы докладов международной конференции "Сварные конструкции". - Киев, 1990 г., с. 13.

5. Костандов Г. А., Белоркин С. И., Рыжак А. Н. Разрушение твердых полимеров при импульсном растяжении. - Проблемы прочности, 1992 г., № 7, с. 14-17.

Костандов

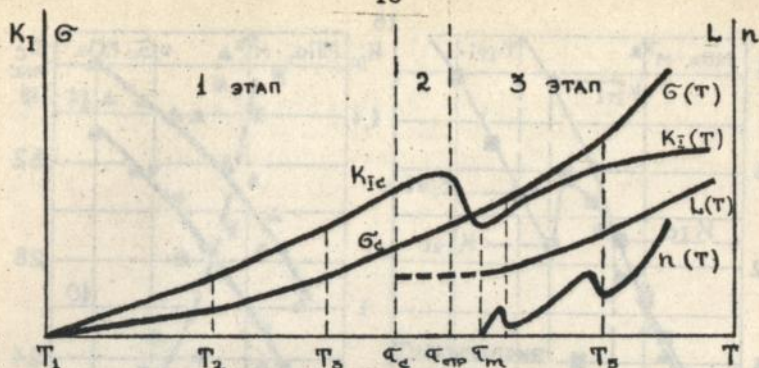


Рис. 1. Временные зависимости параметров, описывающих процесс разрушения.

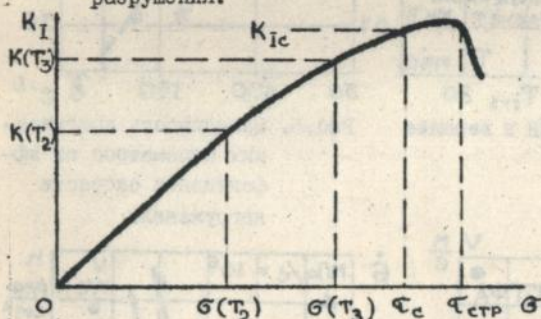


Рис. 2. Зависимость K_I от напряжений в импульсе растяжения.

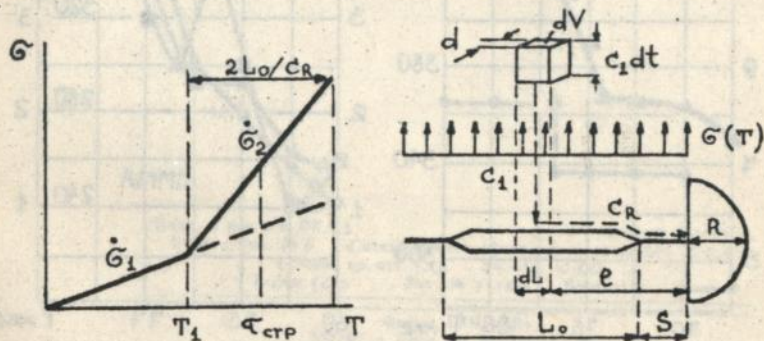


Рис. 3. Схема формирования зоны перенапряжения.

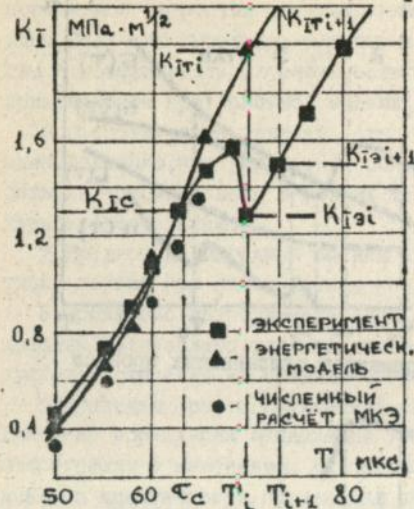


Рис. 4. Нарастание КИН в вершине трещины.

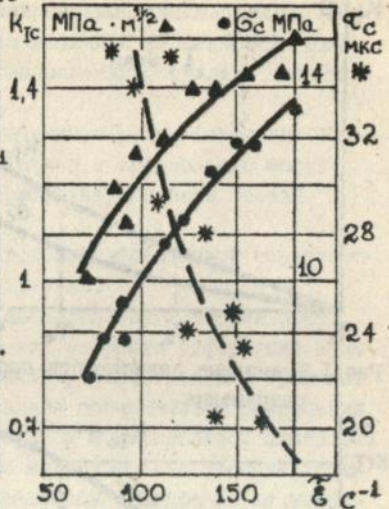


Рис. 5. Зависимость критических параметров от эффективной скорости нагружения.

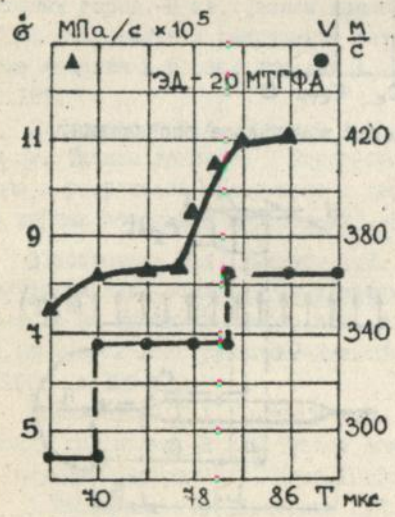


Рис. 6. Зависимость средней скорости трещины и параметра зоны предразрушения от скорости нагружения.

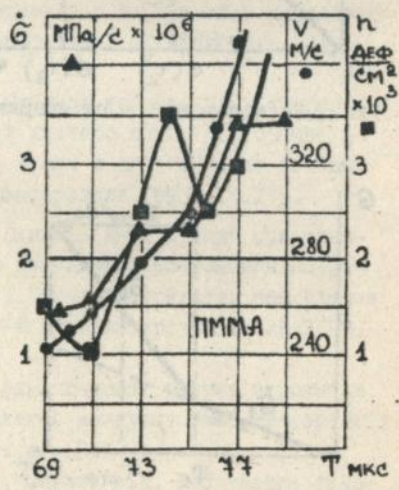


Рис. 7.

Бесплатно

Ав 27.861