

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

**СМИРНОВ Иван Валерьевич**

**ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ  
УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена на кафедре теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН,  
профессор ПЕТРОВ Юрий Викторович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
АБРАМЯН Андрей Карэнович  
(Институт проблем машиноведения РАН, главный  
научный сотрудник)

доктор физико-математических наук,  
доцент МОРОЗОВ Виктор Александрович  
(Санкт-Петербургский государственный университет,  
заведующий кафедрой физической механики)

Ведущая организация:

Петербургский государственный университет путей  
сообщения

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2013 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.232.30 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “\_\_\_” апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Кустова Е.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Для расчета прочности конструкционных материалов и элементов конструкций инженеру необходимо знать максимально допустимые параметры внешнего воздействия, при которых не будет происходить разрушение. При статических нагрузках или достаточно медленном изменении интенсивности воздействия хорошо себя зарекомендовал принцип критической величины напряжения. В случае квазистатического воздействия величина критического напряжения принимается константой материала и может быть определена в простых модельных испытаниях, которые, как правило, утверждены в системе общепринятых стандартов. Однако при импульсных воздействиях или достаточно быстром изменении каких-либо параметров воздействия принцип введения постоянного критического напряжения не работает. В таких случаях на прочность материала существенно влияет скорость и длительность ввода энергии. Поскольку разнообразие динамических нагрузок довольно широко, то для каждой нагрузки исследователь должен продумывать новую модельную схему испытаний и определять новые значения параметров разрушающего воздействия. Это приводит к многочисленным испытаниям материала в широком диапазоне скоростей деформации.

Понятно, что при решении тех или иных задач механики разрушения необходимо выбирать наиболее адекватный критерий разрушения. Критерий должен соответствовать рассматриваемой задаче, а также иметь ясные физический смысл и форму записи, которые позволяют его использовать проектировщику непосредственно "на местах". Более того, все используемые в критерии механические характеристики должны быть доступны в научной и инженерной литературе.

Очевидно, что теоретические подходы должны опираться на эмпирические данные. Развитие техники и электроники привело к большому росту и разнообразию экспериментальных работ. Однако нередко ситуация, когда даже при аналогичных условиях эксперимента экспериментальные данные расходятся, а то и вовсе противоречат друг другу. Особенно этот факт наблюдается при рассмотрении нестационарных процессов.

Количество работ по теме вышеобозначенных проблем уже давно перевалило за десятки тысяч. Сформировалось множество направлений от задач распространения трещин в композитах до задач защиты сооружений от террористических атак. В данной работе внимание сосредоточено на определении величин параметров прочности конструкционных материалов в широком диапазоне скоростей ввода энергии в образец исследуемого материала, а также исследованием динамики трещин в пластинах хрупкого или

квасихрупкого материала при растягивающей моде коэффициента интенсивности напряжений.

**Актуальность темы** обусловлена необходимостью разработки универсальных и эффективных инженерных средств оценки прочности конструкционных материалов и элементов конструкций, применимых для любых типов нагрузки, а также противоречием накопившихся экспериментальных данных по распространению трещин в номинально хрупких материалах.

**Предметом исследования** является поведение зависимости характеристик прочности материалов от скорости воздействия на образец (скоростные зависимости прочности), а также старт и распространение быстрых трещин.

**Цель работы** – разработка расчетных схем для определения характеристик прочности конструкционных материалов в широком диапазоне скоростей воздействия на основе общего универсального принципа инкубационного времени, а также исследование динамики развития трещин в случае хрупкого и квазихрупкого разрушения при различных условиях воздействия.

В работе решаются следующие задачи:

1) разработка простых и эффективных расчетных схем для оценки характеристик разрушения (прочности при динамическом растяжении и откольной прочности, прочности при динамическом сжатии, работы разрушения при динамическом трехточечном изгибе), пригодных для применения на практике для широкого диапазона скоростей деформации;

2) экспериментальное исследование динамики распространения фронта трещины и каустики у фронта трещины в пластинах органического стекла при медленной и импульсной нагрузке.

**На защиту выносятся** следующие результаты:

- Определение зависимости откольной прочности материала от скорости деформации;
- Объяснение эффектов роста, стабилизации и уменьшения откольных напряжений на диаграмме Откольная прочность/Скорость деформации;
- Определение скоростной зависимости прочности бетонов и горных пород при динамическом раскалывании по схеме Бразильского теста;
- Определение скоростной зависимости прочности бетонов и горных пород при динамическом сжатии (по схеме Кольского);

- Определение скоростной зависимости работы затраченной до момента старта разрушения бетонов и горных пород при динамическом трехточечном изгибе (по модифицированной схеме Кольского);
- Результаты экспериментальных исследований распространения трещины в пластинах ПММА с надрезом при медленном растяжении;
- Результаты экспериментальных исследований распространения трещины в пластинах ПММА с разрезом при импульсном давлении, локализованном на берегах разреза.

**Методы исследования** базируются на апробированных физических моделях.

Для построения скоростных зависимостей прочностных параметров материалов используется критерий инкубационного времени.

В экспериментальных исследованиях динамики быстрых трещин в пластинах используется методика щелевой развертки теневого изображения. Квазистатическое растяжение пластин с надрезом осуществляется с помощью разрывной машины, а динамическое воздействие на берегах разреза в пластине осуществляется с помощью электрического взрыва проволоочки.

**Достоверность результатов** основана на сопоставлении расчетных кривых с экспериментальными данными других авторов. Для каждой расчетной схемы дается оценка области применения.

В экспериментах используются зарекомендовавшие себя методики регистрации трещины. Результаты экспериментальных исследований сравниваются с результатами других авторов.

**Научная новизна и практическая ценность** работы заключается в том, что предложены простые расчетные схемы для определения параметров прочности материала при динамическом воздействии. Знание скоростной зависимости той или иной характеристики прочности позволяет определить пороговые значения параметров разрушающего/неразрушающего воздействия для заданной скорости деформирования. Более того, построение скоростных зависимостей прочности материала на основе простых расчетов позволяет существенно сократить количество необходимых экспериментов. Использование критерия инкубационного времени позволяет объяснить эффекты, наблюдаемые на диаграмме прочность/скорость деформирования, например, стабилизацию откольной прочности, без предположения о достижении теоретической прочности материала.

В работе впервые в рамках одного исследования получены экспериментальные результаты по распространению быстрых трещин и при медленном и при динамическом характере воздействия, на одном и том же материале, с применением одних и тех же методик регистрации параметров,

характеризующих процесс распространения трещины. Впервые получена временная развертка каустики у вершины трещины. Полученные результаты позволяют объяснить и “объединить” различия в характере распространения трещины, наблюдаемые различными исследователями. Результаты могут быть полезны для развития теории трещин.

**Апробация работы** проводилась на научных семинарах и международных конференциях. Результаты, выносимые на защиту, были представлены для обсуждения на XVIII Всероссийской школе-конференции молодых ученых и студентов “Математическое моделирование в естественных науках” (Пермь, 2009); 7<sup>th</sup> International Symposium on Impact Engineering (Warsaw, 2010); XX, XXI и XXII Международной научной школе им. академика С.А. Христиановича “Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках” (Алушта, 2010, 2011, 2012); Международной научно-технической конференции “Прочность материалов и элементов конструкций” (Киев, 2010); XXIV Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций/ Методы граничных и конечных элементов» (Санкт-Петербург, 2011); XXXIX Summer School – Conference “Advanced Problems in Mechanic” (St. Petersburg, 2011); Third International Workshop “PROTECT2011: Performance, Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading” (Lugano, 2011); Sino-Russian Bilateral Scientific Seminar on Dynamic Behaviour of Structural and Functional Materials (Sanya, 2011); Международной конференции по механике “Шестые Поляховские чтения” (Санкт-Петербург, 2012); 19<sup>th</sup> European Conference on Fracture (Kazan, 2012); конференции-семинаре “Актуальные направления в механике сплошных сред” (Санкт-Петербург, 2012); научном семинаре секции прочности и пластичности им. акад. Н.Н. Давиденкова в Доме Учёных г. Санкт-Петербург; научном семинаре ИПМаш РАН; научных семинарах кафедры теории упругости мат.-мех. факультета СПбГУ.

**Публикации автора** по теме диссертации представлены работами [1-12], в том числе статьи [1-4] в журналах рекомендованных ВАК РФ.

В работах [1, 2, 4, 9, 11] Ю.В. Петрову принадлежат постановка задач и модификации критерия инкубационного времени. В работах [1, 2, 10] А.А. Уткину принадлежит вывод пороговых соотношений для параметров импульса воздействия, участие в проведении расчетов. В работах [4, 11] А.М. Брагову, А.Ю. Константинову, Д.А. Ламзину и А.К. Ломунову принадлежат результаты экспериментов, а Б.Л. Карихалу разработка фибробетона CARDIFRC. В работах [3, 5-9, 12] Ю.В. Судьенков принимал участие в разработке и реализации экспериментальных методик, проведении экспериментов и анализе результатов.

В работах [5, 7, 8] Б.Н. Семенову и Б.А. Зимину принадлежат результаты численного моделирования.

**Работа состоит** из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 56 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 109 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В главе I** на основе краткого исторического обзора проводится анализ современных знаний о механике хрупкого разрушения по теме работы. Автор не ставил перед собой целью дать исчерпывающее описание существующих на сегодняшний день экспериментальных методов и данных, теорий, гипотез и концепций механики разрушения (тем более что количество работ в данной области исчисляется десятками тысяч публикаций), а лишь отмечает основные результаты изучения хрупкого разрушения, на которых основаны современные представления в механике разрушения.

Поскольку изучение разрушения в “бездефектных” средах и разрушения в телах с дефектами типа макротрещин развивались параллельно и независимо друг от друга, то исторические предпосылки сегодняшних представлений рассматриваются отдельно для каждой из областей. Однако в настоящее время не вызывает сомнения, что разрушение тел с макротрещинами и разрушения тел без заданных дефектов имеют как минимум общую физическую природу. Поэтому общий анализ разрушения с точки зрения характера нагрузки проводится в целом для двух областей механики разрушения.

**В главе II** на основе критерия инкубационного времени (Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А.) анализируются скоростные зависимости характеристик прочности материала для широкого диапазона скоростей деформации. В обобщенном виде данный критерий может быть представлен условием (Петров Ю.В.):

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left( \frac{F(t')}{F_c} \right)^\alpha dt' \geq 1 \quad (1),$$

где  $F(t)$  – интенсивность локального силового поля;  $F_c$  – статический предел локального силового поля;  $\tau$  – инкубационное время, связанное с динамикой подготавливающих разрыв процессов в структуре материала в результате нагрузки и характеризующее время разрушения;  $\alpha$  – характеристика чувствительности среды к уровню напряженности локального силового поля. Время и место разрушения определяется как момент и точка (среды) выполнения условия (1).

В работе рассматриваются различные схемы испытаний: откольное разрушение, динамическое сжатие, динамическое раскалывание (Бразильский тест), динамический трехточечный изгиб. В зависимости от истории изменения напряжений в образце для данного типа испытаний предлагаются расчетные схемы для определения значений динамической прочности материала. При этом в качестве динамической прочности рассматривается не величина напряжения при котором произошло разрушение, а величина инкубационного времени.

Путь применения критерия инкубационного времени заключается в следующем. Рассматривается история изменения напряжений в каждой точке образца (решается соответствующая задача или берутся экспериментальные диаграммы) в результате внешнего воздействия. Затем полученные напряжения подставляются в критерий (1), где статический предел прочности определяется экспериментально, а инкубационное время полуэмпирическим способом. Для этого необходимо знать хотя бы одно значение напряжения, при котором произошло разрушение при динамическом воздействии. После чего, варьируя значение инкубационного времени, нужно добиться наилучшего “наложения” расчетных кривых (которые были определены по условию (1) и истории напряжений) на экспериментальные значения напряжений.

Для задачи откольного разрушения критерий инкубационного времени может быть представлен в виде (Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А.)

$$J \geq J_c, \quad J = \int_{t-\tau}^t \sigma(x,s) ds \quad J_c = \sigma_c \tau \quad (2),$$

где  $J$  – локальный силовой импульс воздействия;  $J_c$  – критический импульс;  $\sigma(x,t)$  – напряжение в данной точке среды;  $\sigma_c$  – статический предел прочности на разрыв. История напряжений в сечении откола определяется с помощью решения задачи в одномерной постановке. Из соотношения (2) могут быть получены соотношения для пороговых (минимальных разрушающих) параметров импульса напряжений. Данные соотношения зависят от формы импульса.

На рис. 1а показаны зависимость амплитуды разрушающего импульса и соответствующего значения напряжений в сечении и в момент откола от длительности импульса для импульса в форме треугольника с участками роста и спада напряжений. В данном случае при воздействии пороговыми импульсами на образец напряжение в момент разрушения может быть равно нулю. При воздействии перегруженными импульсами значение “разрушающих” напряжений может быть равно амплитуде импульса напряжений.



На рис. 1b показаны экспериментальные данные из работы И.К. Красюка и др. (“Квантовая электроника”, 2003, 33/7) и соответствующие расчетные кривые (по критерию (2)) зависимости напряжений в момент откола в сечении откола от скорости деформации. Из рисунка видно, что при постоянных параметрах материала ( $\sigma_c$  и  $\tau$ ) мы можем получить различные зависимости для различных длительностей импульса напряжений. В зависимости от импульса воздействия при увеличении скорости деформации “откольные” напряжения могут расти, стабилизироваться или падать.

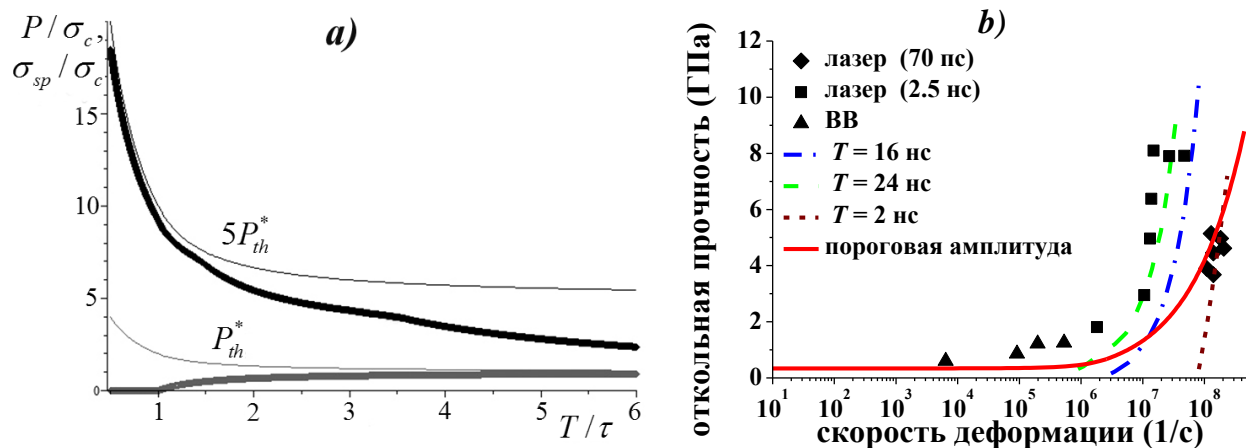


Рисунок 1. a) Зависимость амплитуды импульса  $P$  и откольной прочности  $\sigma_{sp}$  (напряжения в момент разрушения в сечении откола) от длительности импульса  $T$ . Нижняя тонкая кривая – пороговая амплитуда, верхняя тонкая кривая – перегруженная амплитуда в пять раз. Нижняя жирная кривая – значения откольной прочности при пороговых амплитудах, верхняя жирная кривая – значения откольной прочности при перегрузке в пять раз. b) Откольная прочность сплава АМгбМ при различной скорости деформации. Точки – экспериментальные результаты (Красюк И.К. и др.). Кривые – расчет по критерию (2): сплошная кривая – значение пороговой амплитуды импульса; штриховые кривые – значения “откольных” напряжений для различной длительностей импульса.

Условия экспериментов по методу Кольского и его модификаций позволяют получить простые определяющие соотношения для критического напряжения  $\sigma^*$  в зависимости от скорости роста нагрузки  $\dot{\sigma}$  (деформации  $\dot{\epsilon}$ ). При динамическом сжатии по методу Кольского соотношения имеют следующую форму

$$\sigma_{compr}^* = \sigma(t^*) = \begin{cases} \sigma_c^{compr} + \dot{\sigma} \cdot \tau / 2 = \sigma_c^{compr} + E \cdot \dot{\epsilon} \cdot \tau / 2, & \text{при } t^* \geq \tau \\ \sqrt{2E \cdot \dot{\epsilon} \cdot \sigma_c^{compr} \cdot \tau}, & \text{при } t^* < \tau \end{cases} \quad (3)$$

где  $\sigma_c^{compr}$  – статическая прочность на сжатие,  $\tau$  – инкубационное время разрушения материала при сжатии,  $t^*$  – время разрушения материала.

При динамическом раскалывании по схеме Бразильского теста соотношения имеют следующую форму

$$\sigma_{tensile}^* = \sigma(t^*) = \begin{cases} \sigma_c^{tensile} + \dot{\sigma} \cdot \tau / 2 = \sigma_c^{tensile} + E \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \tau / 2, & \text{при } t^* \geq \tau \\ \sqrt{2E \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \sigma_c^{tensile} \cdot \tau}, & \text{при } t^* < \tau \end{cases} \quad (4),$$

где  $\sigma_c^{tensile}$  – статическая прочность при растяжении,  $\tau$  – инкубационное время разрушения материала при растяжении.

При динамическом трехточечном изгибе балок с надрезом по модифицированной схеме Кольского соотношения для работы, затраченной до разрушения, имеют форму

$$W_d = \begin{cases} \frac{(6\tau k^2 S W_c v)^{2/3}}{2kS}, & t^* < \tau \\ \frac{(3\tau kv + \sqrt{3} \sqrt{-(\tau kv)^2 + 24kS W_c})^2}{72kS}, & t^* \geq \tau \end{cases} \quad (5),$$

где  $W_c$  – удельная работа, затраченная до разрушения при квазистатической нагрузке,  $\tau$  – инкубационное время разрушения материала при трехточечном изгибе балки с U-образным вырезом,  $k$  – коэффициент пропорциональности между приложенной силой и прогибом,  $S$  – площадь поперечного сечения образца,  $v$  – скорость прогиба.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости для динамического сжатия и раскалывания фибробетона CARDIFRC.

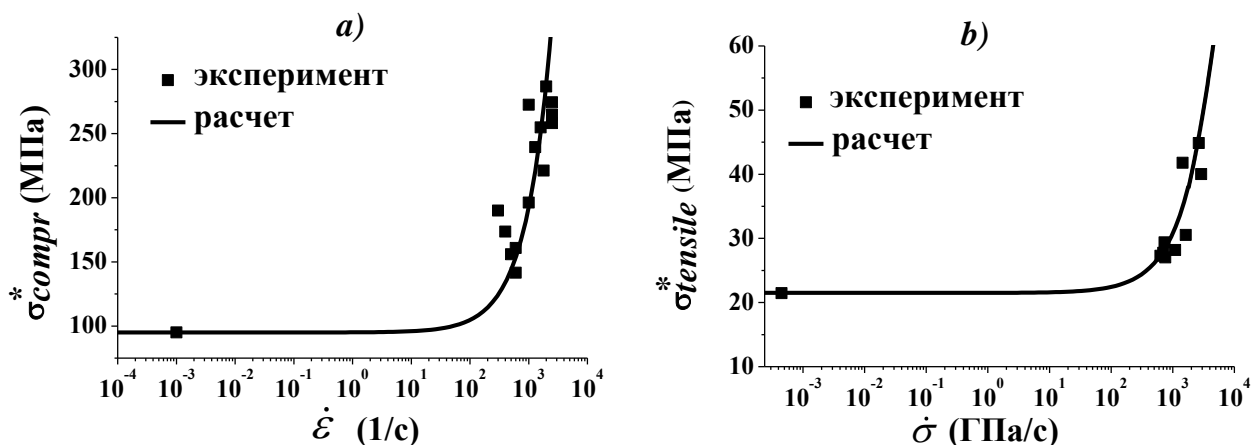


Рисунок 2.1. Предельные напряжения фибробетона CARDIFRC в зависимости от скорости деформации (напряжения); точки – эксперимент (Брагов А.М. и др.); сплошная кривая – расчет по критерию (1). *a)* динамическое сжатие ( $\sigma_c^{compr} = 95$  МПа,  $\tau = 15$  мкс); *b)* динамическое раскалывание ( $\sigma_c^{tensile} = 21.5$  МПа и  $\tau = 15.8$  мкс).

Таким образом, в главе II показано, что скоростная зависимость прочности может рассматриваться не как функция определяющая прочность материала, а как расчетная характеристика, которая определяется историей нагружения. При этом для построения соответствующей зависимости достаточно знать критическое напряжение при квазистатических испытаниях, критическое напряжение для какого-либо одного значения скорости деформации при динамических испытаниях, историю нагружения (параметры импульса напряжений) и время разрушения.

В главе III представлены результаты и анализ экспериментальных исследований динамики распространения трещины в пластинах полиметилметакрилата при медленной и импульсной нагрузке.

В испытаниях при медленном растяжении использовались плоские гантелеобразные образцы из литьевого полиметилметакрилата с размерами рабочей части  $93 \times 35$  мм и толщиной 5 мм. Для инициации трещины в середине рабочей части образца делался надрез лезвием бритвы глубиной 0.4-1.2 мм. Испытания образцов производились на разрывной установке P-0,5. Растяжение происходило с постоянной скоростью движения захватов 5, 20 и 50 мм/мин.

Для динамических испытаний были изготовлены пластины с размерами  $200 \times 200$  и  $98 \times 128$  мм, толщиной 5, 8 и 10 мм. Для имитации трещины посередине образца был сделан пропил длиной 50 мм и шириной 0.5 мм. В вершине пропила делался надрез лезвием бритвы 0.4-1.2 мм. Динамическая нагрузка создавалась с помощью электрического взрыва проволоочки между берегов разреза.

Регистрация трещины производилась по методу щелевой развертки изображения с помощью стрик камеры. В экспериментах регистрировалась либо траектория трещины, либо каустика у фронта трещины, рис.3.

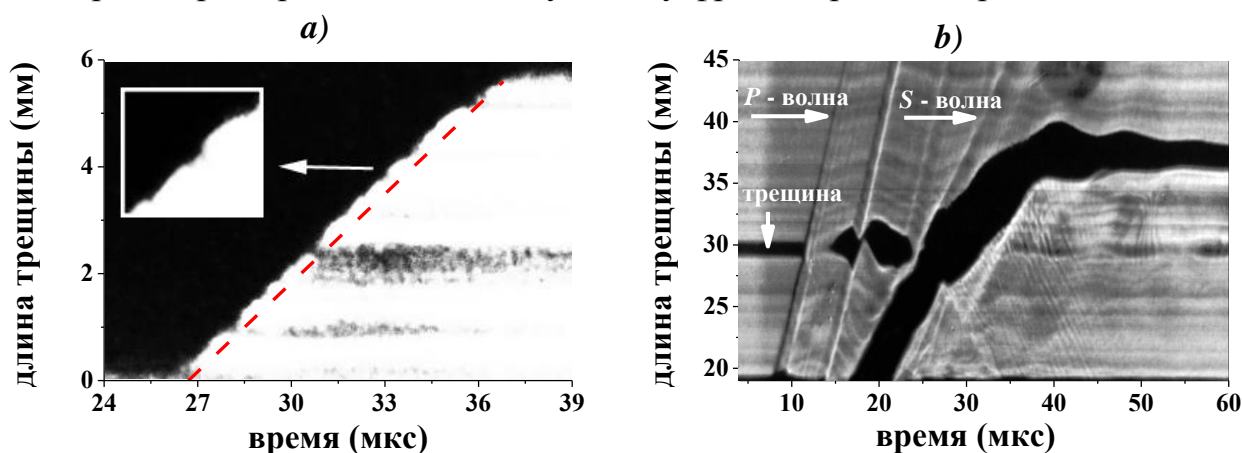


Рисунок 3. Распространение трещины при динамических испытаниях. *a)* щелевая развертка траектории фронта трещины; *b)* щелевая развертка кустики у вершины трещины.

Получено, что распространение участка фронта трещины носит скачкообразный характер для любого типа нагружения. Однако при квазистатической нагрузке средняя скорость трещины возрастает плавно до своего максимального значения (рис. 4а), а при импульсной нагрузке средняя скорость трещины принимает максимальное значение относительно мгновенно и затем постепенно убывает (рис. 4б).

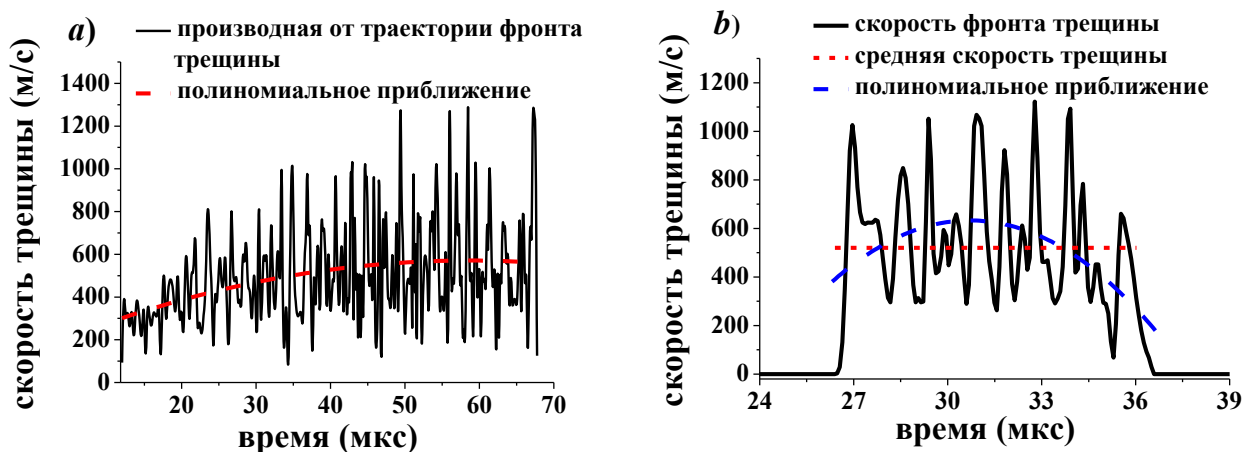


Рисунок 4. Скорость распространения фронта трещины в пластине ПММА. Штрих – средняя скорость (полиномиальная аппроксимация). а) при медленном растяжении; б) при импульсной нагрузке, локализованной на берегах разреза (точеный пунктир – отношение длины ко времени распространения трещины).

Получены диаграммы изменения коэффициента интенсивности напряжений у вершины трещины и соответствующее изменение скорости трещины, рис. 6. Значение коэффициента интенсивности напряжений в момент старта трещины при динамической нагрузке существенно превышает соответствующее значение для медленной нагрузки.

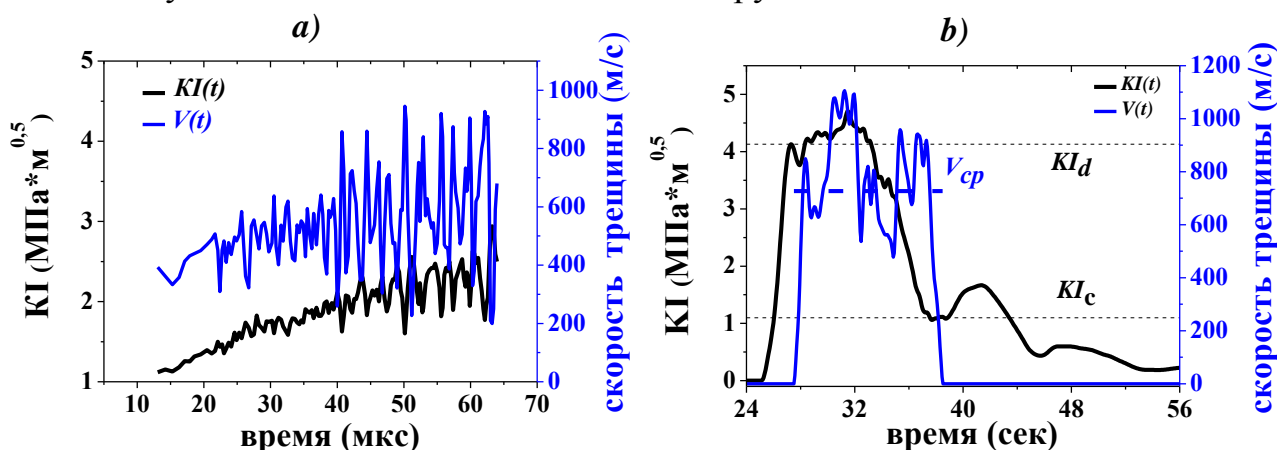


Рисунок 3.29. Динамический коэффициент интенсивности напряжений и соответствующая скорость трещины. а) при медленном растяжении пластины; б) при импульсной нагрузке на берегах разреза.

При динамических испытаниях диаметр каустики в вершине трещины начинает увеличиваться после прихода волны Рэлея, а трещина страгивается

только через несколько микросекунд, рис. 6b. При этом длина трещины зависит не только от величины заряда конденсаторной батареи установки для взрыва, но и толщины образца, рис. 7а. В целом, после старта трещины коэффициент интенсивности напряжений падает вместе со средней скоростью трещины. Зависимость средней скорости трещины от динамического коэффициента интенсивности ( $K$ - $v$  зависимость) представлена на рис. 7b.

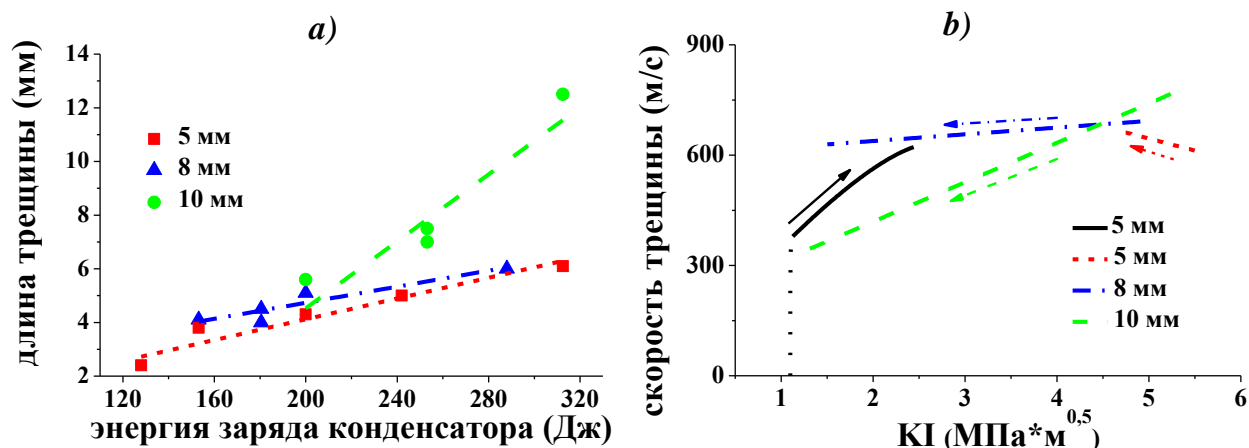


Рисунок 7. Параметры распространения трещины в пластинах различной толщины  $h$ . а) длина трещины в зависимости от энергии заряда конденсатора. б)  $K$ - $v$  зависимость для динамических испытаний при одинаковой энергии заряда конденсаторов (сплошная кривая – квазистатические испытания).

Обсуждается, что противоречия между экспериментальными результатами различных авторов (см., например, *Knauss W.G. and Ravi-Chandar K, Int. J. Fract., 1985, 27.*; *Fineberg J., et al., Physical Review B, 1992, 45*) могут быть связаны с разрешающей способностью регистрирующей аппаратуры и используемых методов регистрации трещины, обработкой данных (рис. 8), а также от характера нагрузки (медленной или динамической, рис. 4).

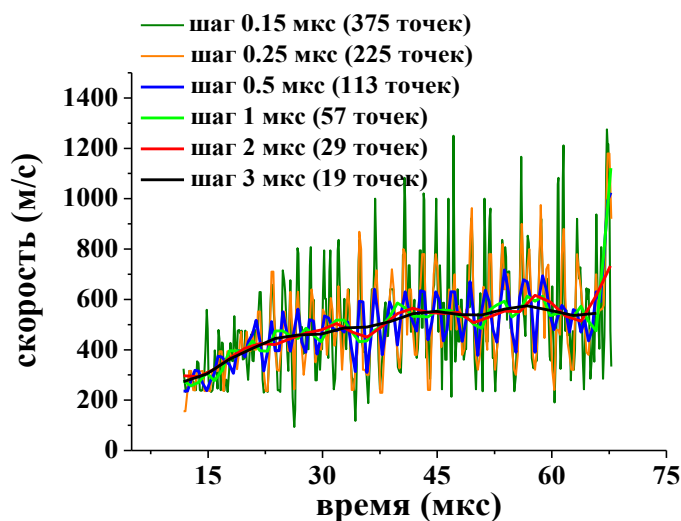


Рисунок 8. Скорость распространения фронта трещины при различном шаге дифференцирования траектории продвижения трещины.

Поскольку распространение трещины взаимосвязано со скоростью зарождения, развития и взаимодействия микродефектов в области вершины трещины, то в зависимости от частоты фиксирования положения трещины можно регистрировать “дискретность” процесса продвижения фронта трещины. Так, например, варьируя временной шаг дифференцирования положения трещины, мы получим различный характер скорости распространения трещины, рис. 8. Другими словами за счет увеличения шага дифференцирования мы “сглаживаем” траекторию трещины (равносильно предположению о гладкости поверхности трещины) и уменьшаем колебания скорости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. На основе подхода инкубационного времени разработана новая универсальная расчетная схема для определения прочностных характеристик материалов для широкого диапазона скоростей деформации. Схема может быть применена к анализу откольного разрушения, динамического сжатия по схеме Кольского, динамического раскалывания по схеме Бразильского теста, динамического трехточечного изгиба по модифицированной схеме Кольского.

2. Дана методика обработки экспериментальных данных. Проведено сравнение расчетов с экспериментальными результатами. Показано, что скоростная зависимость прочности материала может рассматриваться не как функция, определяющая динамическую прочность материала, а как расчетная характеристика.

3. Показано, что предложенный подход качественно объясняет и описывает ряд принципиальных эффектов динамического разрушения номинально хрупких сред. В частности, эффекты роста, стабилизации или уменьшения значений напряжений на диаграмме “откольные” напряжения/скорость деформации при увеличении скорости деформации.

4. Проведены эксперименты по исследованию динамики трещин в пластинах полиметилметакрилата при медленном растяжении пластин с надрезом и импульсной нагрузке локализованной на берегах разреза в пластине.

5. Получены траектории трещины и соответствующее изменение коэффициента интенсивности напряжений при разной интенсивности воздействия. Показано, что существующие противоречия о закономерностях развития трещины могут быть связаны с разрешающей способностью

регистрирующей аппаратуры, а также дальнейшей обработкой данных. Для адекватного анализа и сравнения результатов экспериментов необходимо введение масштабов и условий для констатации факта разрушения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах рекомендованных ВАК РФ:

1. Петров Ю.В. Смирнов И.В., Уткин А.А. *Об эффектах роста и стабилизации динамической прочности при кратковременных импульсных воздействиях* // Доклады академии наук. 2010. Т. 434. № 5. С. 627-630.

2. Петров Ю.В. Смирнов И.В., Уткин А.А. *Эффекты скоростной зависимости прочности в наносекундном диапазоне длительностей воздействия* // Известия РАН. Механика твердого тела. 2010. № 3. С. 200-210.

3. Смирнов И.В., Судьенков Ю.В. *Исследование динамики трещин в пластинах ПММА при квазистатических и динамических нагрузках* // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 12. С. 114-117.

4. Брагов А.М., Карихалу Б.Л., Петров Ю.В., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К., Смирнов И.В. *Высокоскоростное деформирование и разрушение фибробетона* // Журнал прикладной механики и технической физики. 2012. Т.53. №6. С. 144-152.

Публикации в других источниках:

5. Семенов Б.Н., Смирнов И.В., Судьенков Ю.В., Зимин Б.А. *Развитие трещин при ударной нагрузке на берегах разреза в образцах ПММА* // Сборник докладов XX Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках», Алушта, 2010.

6. Smirnov I.V., Sudenkov Yu.V. *Quasi-static and dynamic studies of crack dynamics in plates of PMMA* // Proceedings of the XXXIX Summer School – Conference “Advanced Problems in Mechanics”, ed. by D.A. Indeitsev and A.M. Krivtsov. St. Petersburg: IPME RAS. 2011, 560 p.

7. Судьенков Ю.В., Смирнов И.В., Зимин Б.А., Семенов Б.Н. *Нестабильное поведение трещины при квазистатическом разрыве пластин полиметилметакрилата* // Труды XXI Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» Алушта, Симферополь, 2011. С. 302-306.

8. Семенов Б.Н., Смирнов И.В., Судьенков Ю.В. *Исследование динамики трещины, инициированной взрывом проволочки на берегах надреза в образцах ПММА* // Труды Международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций», отв. ред. В.Т. Трощенко, Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011, 925 с.

9. Smirnov I.V., Petrov Y.V., Sudenkov Y.V., Cadoni E. *Threshold characteristics of short pulse loads causing fracture in concrete and rocks* // Applied Mechanics and Materials. 2011. V. 82. P. 106-111.

10. Smirnov I., Utkin A. *Incubation Time Criterion in Problems of Spall Fracture* // Proceeding of 19th European Conference on Fracture. - Kazan : 2012. in CD.

11. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. *Deformation and Fracture of CARDIFRC under Dynamic Loading* // Proceeding of 19th European Conference on Fracture. - Kazan : 2012. in CD.

12. Smirnov I., Sudenkov, Yu. *Influence of Loading Conditions on Dynamics of Crack Propagation in Polymethylmethacrylate* // Proceeding of 19th European Conference on Fracture. - Kazan : 2012. in CD.