

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Уткин Александр Анатольевич

БЫСТРОЕ РАЗРУШЕНИЕ ХРУПКИХ СРЕД

Специальность 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2007

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

Научный консультант – член-корреспондент РАН
докт. физ.-мат. наук Ю.В. Петров

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Даль Юрий Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор Коузов Даниил Петрович

доктор технических наук,
профессор Морозов Евгений Михайлович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Защита состоится 18 октября 2007 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.232.30 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Санкт-Петербургском государственном университете в ауд. 405 по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., дом 28.

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

Автореферат разослан “16” сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Зегжда С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Потребности современной техники предъявляют к прочности материалов повышенные требования. Выявление закономерностей разрушения и создание эффективных методов оценки прочности материалов и конструкций становится не только технической, но и крупной экономической проблемой. По оценкам Бюро Стандартов США прямые потери от разрушения только в Соединённых Штатах ежегодно составляют сотни млрд. долларов. С другой стороны, всё большее развитие получают чрезвычайно энергоёмкие технологические процессы, связанные с целенаправленным разрушением материалов. Это заставляет искать пути применения закономерностей разрушения для создания наиболее экономичных режимов в таких процессах.

Механика разрушения как наука сформировалась за последние десятилетия. Удалось сформулировать её основные положения, корректно поставить математические задачи и разработать аппарат их решения. Имеется значительное продвижение в изучении закономерностей разрушения во многих принципиально различных ситуациях. Вместе с тем остаются многие важные вопросы, требующие своего разрешения. Один из наиболее проблемных разделов науки о разрушении связан с динамическим разрушением материалов. Большой вклад в становление и развитие динамической механики разрушения внесли Г.И. Канель, Б.В. Костров, Н.Ф. Морозов, В.С. Никифоровский, Л.В. Никитин, В.З. Партон, Ю.В. Петров, Л.И. Слепян, Г.П. Черепанов, Е.И. Шемякин, J.D. Achenbach, K.B. Broberg, J.W. Dally, H. Gao, J. Fineberg, L.B. Freund, A.W. Maue, A.S. Kobayashi, J.F. Kalthoff, W.G. Knauss, K. Ravi-Chandar, A. J. Rosakis, G.C. Sih, D.A. Shockey, A. Shukla и другие российские и зарубежные ученые.

Область механики динамического разрушения зародилась для хрупких материалов. До 70-х годов прошлого столетия предполагалось, что свойства материалов остаются линейно упругими вплоть до разрушения, а критические характеристики не зависят от истории нагружения. В качестве критерия разрушения предлагалось использовать подходы, принятые в статике. Напряженно-деформированное состояние в динамике зависит от времени, следовательно, максимальное значение соответствующей величины не должно превышать критического значения. Так, при разрушении материала с трещиной величина коэффициента интенсивности напряжений не может быть больше критической. В задачи динамической механики разрушения входило изучение истории коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от параметров нагружения. При этом рассматривались как стационарные, так и распространяющиеся трещины, подвергающиеся статическому или волновому нагружению. В частности было определено значение динамического коэффициента интенсивности напряжений для движущейся трещины в зависимости от ее мгновенной скорости. Задачи решались как аналитически так и численно.

Прогресс в создании и совершенствовании средств экспериментальной и вычислительной техники начиная с 70-х годов прошлого столетия позволил проводить нагружение испытуемых материалов длительностью в десятки микросекунд с хорошо контролируемой нагрузкой и достаточно достоверной регистрацией напряженно-деформированного состояния. Это дало возможность проводить серии испытаний, что вызвало быстрый рост числа экспериментальных и теоретических исследований.

Результаты экспериментальных исследований не всегда могут быть описаны с помощью имеющихся математических моделей. Возникающие противоречия приводят к появлению новых, зачастую более сложных теоретических построений.

Наличие большого числа способов описания динамического разрушения материалов с трещинами указывает на отсутствие устоявшегося, устраивающего всех исследователей и объясняющего большинство экспериментальных наблюдений подхода.

Обсуждая состояние дел в обзорах по динамическому разрушению В. N.Сох, Н. Gao и др. (2005 г.) и А. J. Rosakis и G. Ravichandran (2000 г.) отмечают в качестве проблем, нуждающихся в разработке, инициирование разрушения тел с трещиной и исследование явления откола.

Весьма актуальной становится проблема создания достаточно простой модели динамического разрушения, в рамках которой можно было бы теоретически исследовать широкий круг задач и объяснять результаты экспериментов.

Цель диссертационной работы состоит в теоретическом исследовании задач инициирования разрушения хрупких сред резко выраженными динамическими импульсами нагрузки. В работе предлагается развитие и обобщение положений линейной механики разрушения на описание процессов инициирования разрушения упругих сред динамической нагрузкой

Метод исследования. В работе предложен критерий инкубационного времени, на основании которого проводится анализ эффектов быстрого разрыва материалов.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые результаты.

- Новый структурно - временной подход к анализу быстрого динамического разрушения хрупких сред. Применение структурно - временного критерия позволяет с единой точки зрения рассматривать динамическое раз-

рушение как сред, имеющих специально устроенные макродефекты типа трещин, так и не имеющих таковых.

- В рамках предложенного подхода проведено исследование ряда эффектов откольного разрушения твёрдых тел, таких как явление динамической ветви и задержка разрушения. Показана возможность описания зон разрушения. Найдена связь между временем и местом разрушения.
- Получено объяснение эффектов при кавитации в жидкости, структурном превращении фуллерена. Применение критерия инкубационного времени позволило получить рекомендации по оптимизации разрушения шара.
- Проведено исследование асимптотического поведения решения динамической задачи о полубесконечной трещине на продолжении разреза.
- Показано, что в рамках предложенного подхода зависимость коэффициента интенсивности инициирования от времени до разрушения не является функцией материала и может быть легко вычислена, если имеется структурный динамический параметр разрушения и история коэффициента интенсивности напряжений.
- Проведено сравнение расчетов с экспериментальными результатами динамического инициирования роста трещин в упруго - хрупкой среде. Показано, что предложенный подход качественно объясняет и описывает известные экспериментальные эффекты.

Практическая ценность Результаты, полученные в работе имеют непосредственное отношение к проблеме разрушения материала в условиях ударного нагружения и могут быть использованы для определения критических характеристик динамической прочности и условий эффективного разрушения материалов.

Апробация работы. Полученные в работе результаты были представлены автором на следующих конференциях [1,2,7,8,14,20,23,26,27]. Кроме

того, на международных конференциях EUROMECH (1992, 1994 гг.), Advanced Problems in Mechanics (APM) (2002, 2003, 2005 гг.), Харитоновские тематические научные чтения (2001, 2005 гг.), Int. Aristotle conference (1990 г.), Int. Symposium on Strength and Fracture (1994 г.) и др. На всероссийских конференциях «Актуальные проблемы прочности» (1991, 1999, 2005 гг.), Поляховские чтения (2000, 2003 гг.), «Дефекты структуры и прочность кристаллов» (2002 г.), Всерос. симп. по механике деформ. твердого тела (1994 г.). Неоднократно результаты докладывались на семинарах кафедры теории упругости Санкт-Петербургского университета и центра «Динамика».

Публикации. По теме работы имеется 28 публикаций, в том числе два учебных пособия и 10 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК. В совместных работах [1-13, 15-18, 22] соавторами была проведена постановка задач и обсуждение полученных результатов. В [14] С.В. Смирнова и Г.Д. Федоровский провели измерения, а Ю.В. Петрову принадлежит постановка задачи и анализ результатов. В работе [19] соавтор осуществлял проведение эксперимента. Опытные данные в [20] получили А.Н. Березкин и С.И. Кривошеев, а Ю.В. Петрову принадлежит постановка задачи и общее руководство. В работах [21, 22] экспериментальные данные получены А.С. Бесовым и В.К. Кедринским. В [21] совместно с А.А. Груздковым автор участвовал в разработке динамического критерия кавитации. В [22] Н.Ф. Морозову и Ю.В. Петрову принадлежит постановка задачи. В работах [25, 27] С.И. Кривошеевым были проведены динамические испытания, а Г.Д. Федоровским – статические; фрактографический анализ осуществляла С.А. Атрошенко; Ю.В. Петрову принадлежит постановка задач и общее руководство.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 216 на-

именований. Число иллюстраций равно 68. Общий объем работы 228 страниц.

Поддержка. Работа выполнялась при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований и программ ОЭММПУ РАН в научно-исследовательском центре «Динамика» (СПбГУ-ИПМаш РАН).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, дан обзор литературы, выделены главные противоречия между традиционными теоретическими моделями и экспериментальными результатами, отмечены различные возможности их преодоления.

Среди проблем, возникающих при исследованиях динамического разрушения хрупких сред были выделены инициирование разрушения или старт трещины, её движение, остановка, а также изучение причин, вызывающих ветвление. Наименее изученной областью динамического разрушения является проблема инициирования разрушения. Одним из наиболее интересных выявленных эффектов оказалась зависимость динамической прочности от способа приложения внешней нагрузки. Это явление обнаруживается практически во всех ситуациях быстрого разрушения. Под прочностью можно понимать как критический коэффициент интенсивности, соответствующий разрушению в вершине трещины, так и динамическое локальное напряжение разрыва "бездефектного" континуума: и то и другое является пределом для интенсивности локального силового поля, по достижении которого наступает разрушение. Зависимость от способа приложения нагрузки проявляется как изменение критической величины при изменении продолжительности действия, амплитуды и скорости нарастания внешнего усилия. Для объяснения этого явления следует либо разрабатывать новый критерий разрушения,

либо учитывать зависимость от времени свойств материала и сложную реологию. Общепринятый подход к описанию динамического разрушения тел с трещиной основан на введении в рассмотрение функции материала, отвечающие за его "вязкую" реакцию. Предполагается, что всегда существует область (хотя и маленькая) около кончика трещины (стационарной или растущей), где динамический коэффициент интенсивности напряжений характеризует амплитуду локальных напряжений и таким образом контролирует процесс разрушения (условие преобладания K (K -dominance)). Было признано, что прочность должна быть функцией скорости нагружения, определенной около кончика трещины. Пусть t_* - момент начала разрушения. Тогда критерий динамического зарождения трещины может быть сформулирован в следующем виде:

$$K_I^d(t) = K_{IC}^d(\dot{K}_I^d(t)) \text{ при } t = t_*$$

Правая часть, символически отражающая зависимость вязкости разрушения динамического зарождения K_{IC}^d от скорости изменения коэффициент интенсивности $\dot{K}_I^d(t_*)$, должна быть получена экспериментально. Большинство экспериментов ориентированы на определение зависимости прочности от скорости.

Поскольку, описанная выше концепция не в состоянии описать всех, наблюдаемых в экспериментах явлений, некоторые авторы предлагают следующее уточнение. Для того чтобы учитывать процессы, происходящие в окрестности вершины трещины вводится «зона процесса», область, происходящие в которой процессы, имеют непосредственную связь с разрушением. Напряженно-деформированное состояние в этой зоне не определяется при помощи коэффициента интенсивности напряжений. Эта область непосредственно примыкает к кончику трещины, т.е. предшествует зоне преобладания K .

При проведении некоторых экспериментов было обнаружено, что разрушение может происходить на временном участке уменьшения интенсивности локального силового поля. Это явление не может быть описано в рамках вышеперечисленных подходов. В самом деле, с точки зрения силовой механики, если разрушение не произошло, когда коэффициент интенсивности пробежал свои наибольшие значения, то не сможет произойти и при меньших его значениях. Чтобы объяснить это явление D.A. Shockey, J.F. Kalthoff предположили, что разрушение наступает тогда, когда динамический коэффициент интенсивности $K_I(t)$ превосходит динамическую вязкость разрушения K_{Ia} в течении некоторого минимального времени t_d . Дальнейшего развития этот подход не получил.

Большая область исследований связана с проблемой разрушения посредством взрыва и откола. В настоящее время получена обширная экспериментальная информация об упруго-пластических и прочностных свойствах технических металлов и сплавов, геологических материалов, керамик, стекол, полимеров и эластомеров, пластичных и хрупких монокристаллов в микросекундном и наносекундном диапазонах длительностей воздействия. Общепринятый подход к описанию динамического разрушения и в этом случае основан на рассмотрении прочности материала, как функции зависящей от скорости нагружения.

Затем приведена краткая характеристика содержания диссертации, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены некоторые близкие к предлагаемому подходы к разрушению: силовой критерий В.В.Новожилова, критерий минимального времени (Minimum Time Criterion), предложенный D.A. Shockey и J.F. Kalthoff и критерий критического импульса В.С.Никифоровского. Затем вводится критерий разрушения – критерий инкубационного времени:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t ds \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(s, x) dx \leq \sigma_c$$

где τ – структурное (инкубационное) время разрушения, σ_c – статическая прочность материала; $\sigma(s, x)$ —растягивающее напряжение в месте предполагаемого разрыва материала, d — параметр масштабного соответствия.

Таким образом, согласно предложенному критерию, разрушение произойдёт в том случае, если на структурном элементе в месте разрыва материала за промежуток времени τ будет сосредоточена величина импульса, не меньшая чем $\sigma_c \tau d$.

Критерий инкубационного времени – новая методология исследования динамического разрыва хрупких сред – структурно - временной подход к разрушению. В основе подхода лежит понятие инкубационного времени разрушения, параметра применяемого в соответствующих предельных условиях (критериях) разрушения, в частности, используемого в данной работе критерия инициирования разрушения твердых тел. Введенный критерий позволяет исследовать как "бездефектные" среды, так и тела с макродефектами типа трещин. Критерий работает в условиях как быстрого, динамического приложения нагрузки, так и при медленном воздействии, вырождаясь при этом в известный статический критерий. Рассмотрены возможности и вид критерия в некоторых типичных случаях.

Это, во-первых, применение структурно – временного подхода к анализу разрушения при отколе. Так как напряжение в направлении разрушения постоянно в каждый момент времени, то значение внутреннего интеграла (по координате в направлении разрушения) в критериальном соотношении на интервале длиной d является произведением d и напряжения в этой точке. Критерий примет в этом случае следующую форму:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(s, x) ds \leq \sigma_c$$

где $\sigma(s, x)$ – напряжение в точке с координатой x в момент времени s .

Во-вторых, приведен вид критерия при изучении разрушения в окрестности кончика трещины, когда напряжения могут быть представлены при помощи коэффициента интенсивности напряжений. Предполагается эквивалентность критерия инкубационного времени и критерия критического коэффициента интенсивности напряжений в статике. Тогда

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t K(s) ds \leq K_{Ic}.$$

Критерий в таком виде позволяет проводить анализ в случае, когда напряжение в окрестности кончика трещины характеризуется наличием только одной моды и его можно представить с достаточной точностью при помощи коэффициента интенсивности напряжений.

И, наконец, рассмотрена возможность применения структурно – временного подхода в ситуации, когда напряжения в окрестности кончика трещины характеризуются наличием двух мод (K_I и K_{II}). При помощи критерия необходимо определить не только связь между скоростью нагружения и моментом начала разрушения, но и направление движения трещины. Напряжения выражаются при помощи коэффициента интенсивности и формул Снеддона. Предполагается, что разрушение происходит в том направлении θ , на котором время разрушения, определенное по критерию инкубационного времени, будет наименьшим, т.е. в направлении, где

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\cos^3 \left(\frac{\theta}{2} \right) \cdot K_I(t) - 3 \cdot \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \cdot \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \cdot K_{II}(t) \right) dt = K_{Ic}$$

при минимальном значении времени.

Во второй главе при помощи критерия инкубационного времени проведён анализ разрушения "бездефектных" сред - разрушение отколом. Теоретическое и экспериментальное моделирование одномерных задач взаимодействия импульсов напряжения со свободной отражающей поверхностью является основой исследования динамической прочности материалов. Одномерная картина обладает достаточной простотой и представляет широкие возможности для анализа эксперимента и теории, которая даёт здесь предельно простые соотношения. Несмотря на некоторые недостатки подобной идеализации, исследование одномерной картины часто представляет собой единственную возможность изучения динамических прочностных характеристик материалов. Явление откола возникает в материале в результате отражения волны сжатия от свободной границы. Напряжение в этой волне при отражении меняет знак и становится растягивающим. При этом суммарное напряжение в некоторых местах материала в некоторые моменты времени может стать растягивающим и вызвать разрушение.

При помощи критерия инкубационного времени изучены время и место возникновения условия разрушения. Получено объяснение эффекта увеличения прочности при уменьшении времени воздействия: необходимая для разрушения величина импульса может быть получена в откольном сечении при уменьшении времени действия нагрузки за счёт увеличения её амплитуды. Следовательно, временная зависимость прочности может рассматриваться не как функция материала, а как расчетная характеристика. Применение критерия инкубационного времени позволяет построить единую кривую временной зависимости прочности на всём диапазоне времен: статическая и динамическая ветви оказываются соединёнными плавным переходом (рис. 1). Экспериментальные точки взяты из работы Златин Н.А. и др.,¹. Для импуль-

¹ ФТТ 1974 г. -т.16, стр. 1752-1755.

сов в виде прямоугольного треугольника временная зависимость прочности будет иметь вид:

$$\bar{t}_* = \begin{cases} \frac{1}{4(1 - \sigma_c/P_*)} + 1, & 1 \leq \frac{P_*}{\sigma_c} \leq 2 \\ \frac{2\sigma_c}{P_*} + \frac{1}{2}, & \frac{P_*}{\sigma_c} \geq 2 \end{cases}.$$

Здесь $\bar{t}_* = t_*/\tau$ – нормированное время до разрушения, P_* – прочность (амплитуда приложенного импульса), σ_c – прочность материала в статике.

Фиксируемая в экспериментальных исследованиях задержка, то есть время, прошедшее после достижения в откольном сечении максимума растягивающим напряжением до момента разрушения, получает простую расчётную интерпретацию. Изучены возникающие при воздействии ударного импульса зоны разрушения, определено их возможное взаимное расположение и протяжённость. Дана методика обработки результатов эксперимента. Показан способ определения критических характеристик материала из результатов испытаний. Исследованы времена, на которых проявляются динамический и квазистатический механизмы разрушения.

В третьей главе рассмотрена задача о симметричном нагружении шара в акустической и упругой постановке, изучены свойства решения.

Одной из важных прикладных задач механики является выявление оптимальных условий целенаправленного разрушения материалов и конструкций. В связи с этим представляет интерес следующая задача – каким образом возможно наиболее полно разрушить материал, затратив при этом как можно меньше энергии. Такая проблема возникает, в частности, при дроблении материала и снижение энергозатрат в этой области является весьма актуальной задачей. Используемые для описания дробления модели как правило очень сложны и требуют привлечения громоздкого математического аппарата.

Многие трудности, возникающие при моделировании этого процесса связаны с применением критериев разрушения, не отражающих в полной мере его высокоскоростную динамическую специфику. Применение критерия инкубационного времени позволяет описать проблему дробления в рамках простейшей динамической теории деформирования и линейной механики разрушения. Для иллюстрации этого проведен анализ разрушения шара при внезапном снятии нагрузки в акустической постановке. Построены кривые зависимости разрушенного объема шара от его радиуса и от величины приложенной нагрузки.

Рассмотрена возможность применения критерия инкубационного времени для описания возникновения кавитации в жидкости. Кавитация, это нарушение сплошности (начальная стадия разрушения) жидкости в поле растягивающих напряжений сопровождающееся ростом парогазовых пузырьков на ядрах кавитации, которые практически всегда присутствуют в жидких средах в виде микропузырьков свободного газа, микрочастиц или их комбинаций. Многими авторами отмечалось наличие аналогии между кавитацией и разрушением хрупких тел. Наиболее близкая к образованию кавитации ситуация в твердых телах возникает при разрушении отколом. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что для воды влияние длительности нагружения на прочность оказывается еще более существенным. Давление, при котором наступает кавитация, может превосходить статическое значение в 50 и более раз. Применение критерия инкубационного времени позволяет и в этом случае построить единую кривую временной зависимости прочности (рис. 2).

Была также показана возможность описания структурных превращений в фуллерене. Фуллерен является разновидностью углерода, молекула которого состоит из 60 или 70 атомов. При высоких ударных давлениях порядка 20 ГПа фуллерен претерпевает структурное превращение в алмаз или графит.

Критерий инкубационного времени позволяет описать этот процесс и построить зависимость ударной нагрузки данной формы от времени

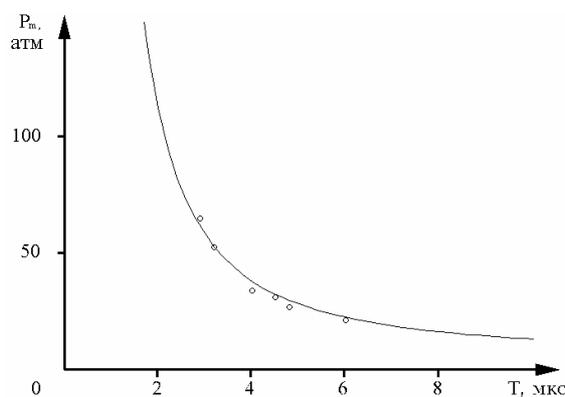
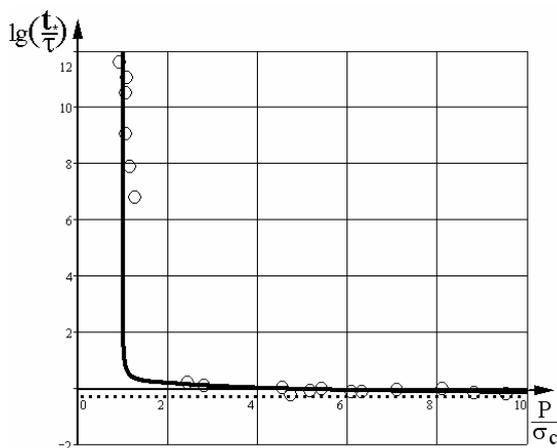


Рис. 1. Зависимость времени до разрушения от прочности (временная зависимость прочности). Кружки – нагрузки. Кружками изображены экспериментальные точки. Прямая (точки) – горизонтальная асимптота для времени до разрушения.

Рис. 2. Зависимость кавитационной прочности от продолжительности экспериментальные точки из работы [21].

В четвертой главе рассмотрена задача о нагружении полубесконечного разреза динамической нагрузкой в антиплоской и плоской постановке. Принято считать, что в задачах теории упругости значение коэффициента интенсивности напряжений определяет напряженно–деформированное состояние в окрестности кончика трещины, как в динамических задачах, так и статике. Значения этого коэффициента, как правило, и используются при оценке разрушения. Однако более тщательное исследование показывает, что анализ поля напряжений только при помощи коэффициента интенсивности в динамических задачах не всегда приводит к правильному результату. Кроме того, как показывают экспериментальные и теоретические исследования, динамическое разрушение является сложным процессом, протекающим во времени и происходящим в некоторой протяженной (конечной) окрестности кончика трещины. Применение критерия инкубационного времени требует

знание напряженно-деформированного состояния в некоторой окрестности кончика трещины. Экспериментальные способы нахождения напряжений (например, метод каустик или метод фотоупругости) определяют коэффициент интенсивности напряжений на некотором расстоянии от кончика трещины. Все это указывает на необходимость изучения точности представления решения динамической задачи при помощи коэффициента интенсивности напряжений.

Для решения задачи использовался несколько модифицированный метод функционально-инвариантных решений. Было найдено точное решение задачи о нагружении полубесконечного разреза динамической нагрузкой в антиплоской и плоской постановке. Для каждого случая изучена пара задач. В первой нагрузка прикладывается к берегам разреза, а во второй происходит взаимодействие трещины с ортогонально падающей на нее волной, в которой напряжение такие же, что и в первой задаче. Рассмотрено нагружение с постоянной амплитудой и изменяющееся с постоянной скоростью. Точные выражения для напряжений на продолжении разреза разлагаются в ряд по степеням расстояния до вершины трещины. Разложения в асимптотический ряд у этих задач отличаются наличием (когда нагрузка прикладывается к берегам разреза) или отсутствием (при взаимодействии трещины с падающей на ее берега волной) члена, независимого от координаты. В плоской задаче при нагружении с постоянной амплитудой, прикладываемой к берегам разреза разложение в асимптотический ряд будет иметь вид

$$\sigma_y = P \cdot \frac{2\sqrt{2}\sqrt{c_1}\gamma\sqrt{1-\gamma^2}}{\pi} \left[\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{x}} - \frac{(\gamma_R + 2\gamma_R R_1 - 2)}{2c_1\gamma_R} \cdot \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{t}} \right] - P + O\left[\left(\frac{x}{c_1 t}\right)^{3/2}\right]$$

Здесь P – амплитуда приложенного импульса, c_1 , c_2 , c_R , скорости соответственно продольной, поперечной и релеевской волн, $\gamma = c_2/c_1$, $\gamma_R = c_R/c_1$, R_1 –

безразмерная константа, зависящая от c_1 , c_2 и c_R , t – время, x – расстояние до кончика трещины.

Для оценки точности представления решения асимптотическим рядом рассмотрена относительная погрешность, т.е. отношение разности точного решения и его приближения к точному решению. В качестве приближения рассматривается сумма первых одного, двух или трех членов асимптотического ряда. Изучена зависимость погрешности от времени и расстояния до кончика трещины.

Когда нагрузка приложена к берегам разреза, то влияние остатка в представлении решения при помощи коэффициента интенсивности напряжений может быть значительным (более 20%), если фронт волны находится менее чем на 100 расстояний от точки наблюдения. Использование в разложении второго члена существенно (на порядок) улучшает положение. Третий член разложения еще более улучшает положение.

В случае взаимодействия трещины с падающей на нее волной, точность представления решения при помощи коэффициента интенсивности напряжений значительно возрастает. Это связано с тем, что в разложении в ряд отсутствует член, независимый от координаты и поэтому, используя коэффициент интенсивности, мы фактически учитываем два члена разложения.

Для примера, если наблюдение производится на расстоянии 10 мм от кончика трещины, а скорость распространения продольных волн $c=5000$ м/с, то погрешность измерения коэффициента интенсивности напряжений на временах $t < 400$ мкс будет выше 20%, и только при $t > 1200$ мкс станет ниже 10%.

Для повышения точности в задачах динамики недостаточно внести в значение коэффициента интенсивности некоторую поправку, пусть даже зависящую от времени. Соответствующие асимптотики не являются равномер-

ными, и для правильного представления решения на всем временном диапазоне необходимо знать следующие члены разложения в ряд.

Пятая глава посвящена изучению разрушения при ударном нагружении тел с дефектами типа трещин. При помощи критерия инкубационного времени на основании точного решения проведён анализ разрушения. Установлено, что качественная картина разрушения одинакова как в условиях плоской задачи теории упругости, так и в антиплоском случае. Рассмотрено разрушение, вызванное приложением к берегам разреза мгновенного импульса напряжений, а также нагрузок различного временного профиля. Установлено, что разрушение может происходить с задержкой, то есть спустя некоторое время после достижения силовым полем максимального значения.

При изучении воздействия нагрузок конечной продолжительности введено понятие минимального разрушающего импульса, как импульса с минимальной для данной продолжительности амплитудой. Установлено, что в этом случае разрушение происходит с задержкой тем большей, чем короче время действия нагрузки. Увеличение амплитуды импульса при сохранении его продолжительности ведёт к уменьшению задержки. Импульс, разрушающий без задержки, назван максимальным разрушающим. Это такой импульс, нагрузка в котором держится до момента разрушения. Дальнейшее увеличение амплитуды ведёт к разрушению до окончания действия нагрузки. Таким образом, в координатах, имеющих смысл продолжительности воздействия и величины приложенного импульса, построены пороговые характеристики разрушения.

Исследовано значение коэффициента интенсивности напряжений и показано, что его величина в момент разрушения может существенно превосходить своё квазистатическое значение. При изучении разрушения импульсами с конечным участком нарастания нагрузки установлено, что скорость нагру-

жения не связана однозначной зависимостью с критическими характеристиками и в частности со значением коэффициента интенсивности в момент разрушения. Однако если фиксирована продолжительность участка роста нагрузки, то увеличение скорости нагружения приводит к увеличению критического значения коэффициента интенсивности. Показано, что эффект увеличения критического значения коэффициента интенсивности напряжений связан прежде всего с уменьшением времени воздействия, которое, в свою очередь, при фиксированной продолжительности участка роста нагрузки ведёт к увеличению скорости.

Проведено сравнение разрушающих характеристик при нагружении берегов разреза с аналогичными величинами при воздействии падающей волны. Установлено, что воздействие падающей волны приводит к уменьшению критических характеристик разрушения.

Рассмотрена возможность использования при анализе разрушения более простых подходов. Проведен анализ разрушения при помощи наиболее простого подхода - применения критерия максимума коэффициента интенсивности. Найденные при помощи этого подхода критические параметры сравниваются с полученными при использовании критерия инкубационного времени на основании точного решения. Применение концепции критического коэффициента интенсивности делает невозможным достижения коэффициентом интенсивности значений, больших критического. В рамках этой модели отсутствуют понятия минимального и максимального разрушающих импульсов. Использование этого подхода на малых временах, когда воздействие носит концентрированный характер, не дает адекватной картины разрушения. Вместе с тем, относительная простота определения критических параметров делает такой подход весьма удобным инструментом исследования при сравнительно больших временах воздействия.

Исследована возможность использования в критерии инкубационного времени вместо точного решения его выражения через главный член корневой асимптотики. Применение этого подхода позволяет получить качественно ту же картину разрушения, что и использование точного решения. В рамках этой модели введены понятия минимального и максимального разрушающих импульсов, получена формула для определения задержки. Сравнение найденных с помощью этого подхода критических параметров с определёнными по точному решению величинами показывает хорошее соответствие при достаточно больших временах воздействия. Если же разрушение происходит в поле падающей на разрез волны, то количественное соответствие критических величин наблюдается на всём диапазоне времён воздействия. Применение коэффициента интенсивности в критерии инкубационного времени даёт возможность получить достаточно простые формулы, связывающие параметры разрушения со временем воздействия и зависящие только от формы приложенной нагрузки. Если к берегам разреза прикладывается импульс прямоугольной формы, то значение коэффициента интенсивности напряжений в момент разрушения K_{Iq} для максимального разрушающего импульса будет иметь вид

$$\frac{K_{Iq}}{K_{Ic}} = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{\bar{T}}}{\bar{T}^{3/2} - (\bar{T} - 1)^{3/2}},$$

для минимального

$$\frac{K_{Iq}}{K_{Ic}} = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{\bar{t}_*} - \sqrt{\bar{t}_* - \bar{T}}}{\bar{t}_*^{3/2} - (\bar{t}_* - 1)^{3/2} - (\bar{t}_* - \bar{T})^{3/2}},$$

выражение, определяющее задержку Δt при воздействии минимального разрушающего импульса

$$\frac{\Delta t}{\tau} = \frac{2\sqrt{\bar{T}^2 - \bar{T} + 1} + 1 - 2\bar{T}}{3}.$$

Здесь K_{lc} – критическое значение коэффициент интенсивности в статике, T – продолжительность импульса, $\bar{T} = T/\tau$, $\bar{t}_* = \left(\bar{T} + 1 + 2\sqrt{\bar{T}^2 - \bar{T} + 1} \right) / 3$.

Как и при использовании точного решения, наблюдается увеличение максимального значения коэффициента интенсивности при уменьшении длительности нагружения. Показано, что такой подход на определённом временном диапазоне позволяет получать правильные результаты.

Рассмотрена следующая возможность замены точного решения асимптотическим рядом. Если в критерий инкубационного времени время t сравнимо по величине с параметром d то асимптотическое разложение можно использовать только в том случае, если $t > x/c$. При $t < x/c$ дифрагированная от кончика трещины волна в точку x еще не пришла. Следовательно, напряжения в этой точке такие же как в падающей волне. Было показано, что учет указанного выше обстоятельства не вносит существенного вклада в величины критических характеристик.

Применение критерия инкубационного времени не требует знания критического значения коэффициент интенсивности. Критическое динамическое значение коэффициента интенсивности – динамическую вязкость разрушения K_{Iq} , т.е. значение коэффициента интенсивности в момент разрушения, многие авторы связывают с историей нагружения (например со скоростью) Эксперименты ориентированы главным образом на отслеживание истории коэффициента интенсивности напряжений. Поэтому изучение закономерностей поведения динамической вязкости разрушения приобретает важное значение. Применение критерия инкубационного времени позволяет определить значение динамической вязкости разрушения при помощи расчета.

Было установлено, что динамическая вязкость разрушения меньше статического значения, если нагружение производится минимальными разрушающими импульсами и больше его при нагрузке при помощи максимального разрушающего импульса (т.е. если нагружение осуществляется по крайней мере до тех пор, пока не начнется разрушение). Это обстоятельство объясняет различие в значениях динамической вязкости разрушения у различных экспериментаторов. Кроме того, показано, что разрушение в поле проходящей волны ведет к уменьшению динамической вязкости разрушения по сравнению с аналогичным нагружением берегов разреза, хотя текущее значение коэффициента интенсивности в этих задачах одинаково. Это явление было обнаружено в экспериментах. На одном и том же материале (Nomalite -100) у разных авторов были получены разные значения динамической вязкости разрушения поскольку в одном случае нагружение производилось полем, образованным проходящей волной, а в другом нагрузка прилагалась к берегам разреза. Общепринятый подход не дает объяснения этому противоречию.

Приведена методика определения величины инкубационного времени из результатов экспериментов. При помощи критерия инкубационного времени проведена обработка некоторых экспериментальных результатов. В частности, испытания на образцах из оргстекла (ПММА) (рис. 3), в которых фиксировалась задержка разрушения [19]. Пунктиром обозначено максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений. Была обработана серия опытных данных, полученных К. Ravi-Chandar и W.G. Knauss (Int. J. Fract. - 1984. - V.25. - P. 247--262.) (рис. 4), а также взятых из работы Н. Номма и др. (Ins Fracture Mechanics Seventeenth. Volume. - ASTM. - Philadelphia - 1986.- P. 683-696 1986 г.) (рис. 5). Применение критерия инкубационного времени позволяет получить достаточно хорошее соответствие экспериментальным данным на разных материалах и при различных условиях нагружения.

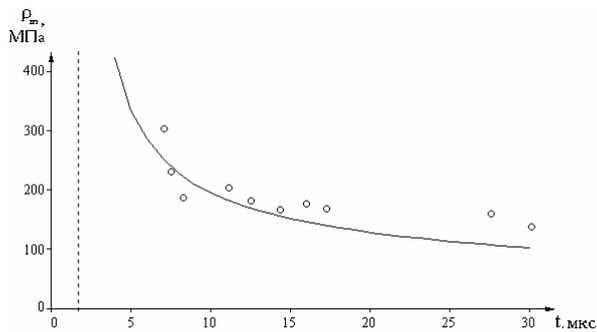


Рис.3. Зависимость амплитуды приложенного импульса от времени до начала разрушения.

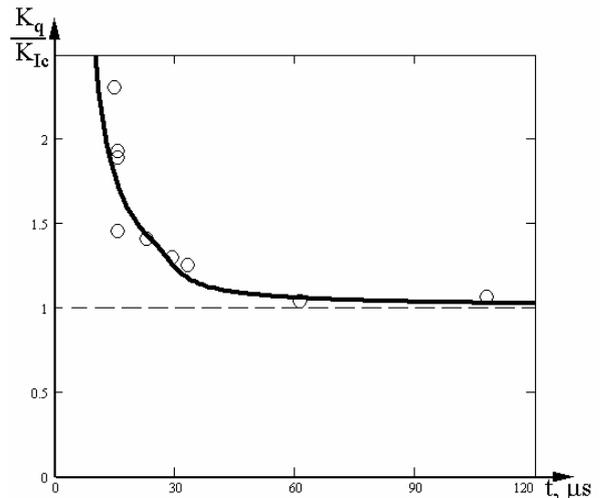


Рис. 4. Разрушение трапецеидальным импульсом материала Nomalite -100. Расчетная кривая и опытные данные

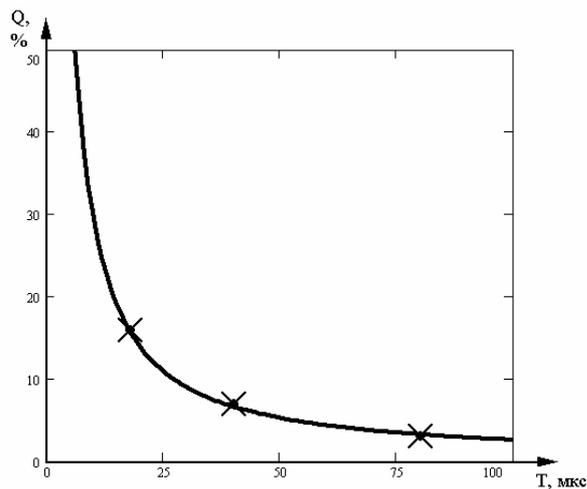


Рис. 5. Процентное превышение динамического значения разрушающей амплитуды по сравнению со статическим.

Наконец, была показана возможность применения структурно–временного подхода в случае, когда напряженное состояние в окрестности кончика трещины характеризуется наличием двух мод. В задаче об асимметричном ударе было определено направление разрушения при помощи критерия инкубационного времени. Направление оказалось близким к полученному в эксперименте.

В заключении формулируются главные выводы работы.

1. Предложен новый структурно - временной подход к изучению динамического разрушения хрупких сред, позволяющий с единой точки зрения исследовать как процесс откольного разрушения, так и инициирование роста макротрещин. В случае медленного деформирования предложенный критерий соответствует известным квазистатическим подходам.
2. Строится единая диаграмма временной зависимости прочности, являющаяся фундаментальной характеристикой откольного разрушения. Дается простое объяснение явлению динамической ветви. Показано, что динамическая прочность хрупких тел может рассматриваться как расчётная характеристика. Определены пороговые значения разрушающих импульсов на всём диапазоне времён разрушения. Дана методика обработки экспериментальных данных.
3. Показана возможность применения структурно–временного подхода к исследованию других, сходных с разрушением процессов. Проанализировано явление кавитации в жидкости. Определен подход к изучению структурных превращений наноматериала на основе фуллерена.
4. Определены точные решения динамических задач о нагружении полубесконечной трещины в антиплоской и плоской постановке. Найдено разложение решения на продолжении трещины. Исследована точность представления решения при помощи асимптотического разложения.
5. На основании точного решения исследовано разрушение сред с макротрещиной в условиях антиплоского напряжённого состояния. Установлена связь между критическими характеристиками и временем действия нагрузки. Определены пороговые импульсы разрушения. Показано, что значение коэффициента интенсивности напряжений в момент разрушения может существенно превосходить своё квазистатическое значение. Проанализировано разрушение сред с макротрещиной в условиях пло-

ской задачи теории упругости. Установлено, что картина разрушения качественно носит тот же характер, что и в антиплоской задаче.

6. Проведено сравнение величин разрушающих характеристик, определённых при помощи структурно - временного критерия и найденных при использовании традиционных подходов. Установлены диапазоны действия квазистатического и динамического механизмов разрушения.
7. Показано, что в рамках предложенного подхода зависимость коэффициента интенсивности инициирования от времени до разрушения не является функцией материала и может быть легко вычислена, если имеется структурный динамический параметр разрушения и история коэффициента интенсивности напряжений.
8. Проведено сравнение расчетов с экспериментальными результатами. Показано, что предложенный подход качественно объясняет и описывает ряд принципиальных эффектов динамического разрушения хрупких сред.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Петров Ю.В., Уткин А.А. О влиянии скорости нагружения на критические параметры динамического разрушения //Мех. разр. матер. 1.Всес.конфер Львов. 1987 С. 65.
2. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Вопросы инициирования разрушения динамической нагрузкой // Динамические задачи механики сплошной среды. Тезисы докладов рег. конф. - Краснодар - 1988. - С. 104
3. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. К расчету предельной интенсивности импульсных динамических нагрузок // Изв. АН СССР. МТТ № 5. 1988. С. 180-182
4. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. О разрушении у вершины трещины при ударном нагружении // ФХММ. No. 4. 1988. С. 75-77.
5. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об импульсной трактовке динамического инициирования роста трещины //Тр. ЦКТИ. Вып. 246 1988. С 80–84

6. Петров Ю.В., Уткин А.А. О зависимости динамической прочности от скорости нагружения // ФХММ. № 2. 1989. С. 38-42
7. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Динамическое инициирование разрушения хрупких тел // Совр. пробл. мех и технол. маш-я Всес. конф. М.: 1989. С. 36-37
8. Morozov N.F., Petrov Y.V., Utkin A.A. New explanation of some effects of brittle fracture by impact loading // Advances in fracture research: Proc. of the 7th ICF Oxford: Pergamon Press -1989.- Vol. 6.- P. 3703-3711
9. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об анализе откола с позиций структурной механики разрушения // ДАН СССР. Т.313 № 2. 1990. С.276-279
10. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об учете структурного фактора в откольном разрушении // Тр. ЦКТИ. Вып. 260 1990 С. 67-70.
11. Петров Ю.В., Уткин А.А. О структурно-временном критерии динамического разрушения хрупких сред // Вест.ЛГУ. Сер.1 Вып.4.1990. С.52-58
12. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. О структурно-временном подходе при анализе динамического разрушения хрупких горных пород // Разрушение горных пород. Зап. Ленингр. горного ин-та им. Г.В. Плеханова. Т. 125. Л.: 1991. С. 76-86.
13. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Динамическое инициирование хрупкого разрушения материалов // Судостр.пром. сер. Проект.судов Вып.17. 1991-стр. 25-31
14. Петров Ю.В., Смирнова С.В., Уткин А.А., Федоровский Г.Д. Об асимптотике напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в тонкой пластине // Вестник ЛГУ. сер.1. 1991.- N 15, вып. 3.- С 123-125.
15. Petrov Y.V., Utkin A.A. On the failure mode transition effect in crack dynamics // ICIAM 95.-Hamburg. -1995.- P.142
16. Петров Ю.В., Уткин А.А. Структурное время в теории динамического разрушения твердых тел // Механика разрушения. Теория и эксперимент. -СПб.-Изд. СПб. университета. -1995.- С. 94-104
17. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об эффекте вторичного поворота трещины при асимметричном ударном нагружении // ДАН.-1996.-т.351.-№ 6.- С. 42-45
18. Петров Ю.В., Уткин А.А. Разрушение предварительно нагруженного шара при внезапном снятии нагрузки // Вестник СПбГУ. сер.1. 1999.- вып. 2.(№15) С.86-89

19. Судьенков Ю.В., Уткин А.А. Применение структурно-временного подхода к откольному разрушению импульсами субмикросекундной длительности // Динамические системы. Вып.15.- Симферополь: КФТ.-1999.- С.140-142.
20. Березкин А.Н., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Уткин А.А. Эффект запаздывания старта трещины при пороговых импульсных нагрузках // ДАН.-2000.-т.375.-№ 3.- С. 121-124
21. Бесов А.С., Груздков А.А., Уткин А.А. Динамический критерий кавитации // 2-е Поляховские чтения. Избранные труды. СПб. Изд. НИИ химии С.-Петербургского университета.-2000. с. 135-143
22. Бесов А.С., Кедринский В.К., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об аналогии начальной стадии разрушения твердых тел и жидкостей при импульсном нагружении // ДАН.-2001. - т. 378, N 3. с. 235-238
23. Петров Ю.В., Уткин А.А. Асимптотика напряжений у вершины трещины в динамических задачах теории упругости. ИПМаш РАН СПб: 2001. - 40 с.
24. Уткин А.А. Асимптотика напряжений у вершины трещины в динамических задачах теории упругости // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – С. 571
25. Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Уткин А.А., Федоровский Г.Д. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках. // Журнал техн. физики т. 72. вып. 12. 2002. С. 54-58
26. Петров Ю.В., Смирнов В.И., Уткин А.А. Движение упругого шара и цилиндра при нестационарном нагружении. ИПМаш РАН СПб: 2003. - 52 с.
27. Atroshenko S.A., Fedorovsky G.D., Krivosheev S.I., Petrov Y.V., Smirnov V.I., Utkin A.A. The experimental investigation of rock fracture under pulse loading. // APM- 2005 Proceedings of the XXXIII summer school “Advanced Problems in Mechanics” SPb: IPME RAS, -2005. – P. 9-13.
28. Уткин А.А. Структурно-временные характеристики разрушения фуллеренов при ударно-импульсном воздействии // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике.–Тезисы докладов. - Н. Новгород, 2006. - т. 3 – С. 208.

Подписано к печати 20.06.07. Формат 60×90 ¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура таймс. Печать ризографическая.
Печ. Л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 4010

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии НИИХХ СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр. 26