

На правах рукописи

Смирнов
Владимир Игоревич

**ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХРУПКОГО
РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

- Научный консультант:** член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Петров Юрий Викторович
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,
профессор Васин Рудольф Алексеевич
доктор технических наук,
профессор Петинов Сергей Владимирович
доктор технических наук,
профессор Васильев Виталий Захарович
- Ведущая организация:** ВНИИ гидротехники им. Б.Е.Веденеева

Защита состоится 5 февраля 2009 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 в Институте проблем машиноведения РАН по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Большой пр., В.О., д.61, актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ Института проблем машиноведения РАН.

Автореферат разослан 29 декабря 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Дубаренко В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки эффективных средств оценки статической и динамической прочности материалов и элементов конструкций, а также поиска оптимальных режимов целенаправленного разрушения твердых тел.

При изучении хрупкой прочности элементов инженерных конструкций весьма важно знать минимально допустимые амплитуды механических воздействий, при которых начинается разрушение. Такие минимальные амплитуды в данной работе называются *пороговыми*. Именно при пороговых внешних нагрузках особенно отчетливо проявляются структурно-временные особенности хрупкого разрушения твердых тел. Поэтому в основу метода исследования в данной работе положен структурно-временной подход, который сформировался и получил развитие усилиями Ленинградской-Петербургской школы ученых-механиков (В.В.Новожилов-Н.Ф.Морозов-Ю.В.Петров).

Накопленный к настоящему времени опыт применения структурного подхода к проблемам прочности и трещиностойкости материалов показал, что структурно-временной критерий разрушения является мощным и эффективным средством анализа подобного рода задач, который, однако, в силу своей относительной новизны пока еще не вышел за рамки чисто "академической" фундаментальной науки и остается уделом ученых и исследователей. В данной работе предпринята попытка построения на базе структурного подхода относительно несложных и достаточно универсальных методов и критериев, применимых для практических расчетов и позволяющих с единых позиций оценивать прочностные свойства конструкционных материалов.

Предметом исследования являются пороговые характеристики хрупкого разрушения твердых тел: в статике – предельная нагрузка и критический размер дефекта; в динамике – амплитуда нагружения, время до разрушения, перемещение точек среды на фронте волны, динамическая вязкость разрушения, силовой импульс, скорость удара, объем выкрашивания и неко-

торые их комбинации. Пороговыми в данной работе называются воздействия, минимально необходимые для инициирования разрушения в „бездефектных“ материалах и в средах с макродефектами.

Целью работы является разработка теоретических основ тестирования конструкционных и строительных материалов на динамическую прочность и трещиностойкость в рамках структурно-временного подхода к исследованию разрушения твердых тел.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- формулировка условий предельного равновесия и разрушения хрупких тел при статических и динамических нагрузках на основе единого, – структурного, – подхода;
- определение пороговых характеристик хрупкого разрушения материалов в условиях статического и динамического нагружения;
- поиск адекватных формулировок структурного критерия разрушения и физически приемлемых интерпретаций структурных характеристик d и τ , образующих систему базовых констант для расчета прочности материалов;
- построение на основе доступных инженерно-механических принципов простых и эффективных расчетных схем для оценки пороговых характеристик разрушения, пригодных для применения на практике.

Научная новизна. Предложены модификации структурного критерия разрушения, позволяющие корректно оценивать прочность материалов с трещинами и вырезами произвольных размеров. Сформулированы условия согласования структурного критерия с классическими критериями разрушения.

Даны новые физические трактовки инкубационного времени разрушения. Предложены новые пороговые характеристики динамического разрушения, позволяющие упорядочить процесс выбора оптимального материала.

Дано качественное и количественное объяснение некоторых экспериментально зафиксированных эффектов высокоскоростного разрушения, не имеющих удовлетворительного объяснения в рамках традиционных моделей.

Разработаны расчетные схемы определения пороговых характеристик разрушения, которые могут служить теоретической основой новых методов тестирования прочностных свойств конструкционных материалов.

В совокупности полученные результаты позволили разработать системный подход к анализу инициирования хрупкого разрушения твердых тел.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных физических моделей и применением строгих математических методов; сравнением результатов аналитических решений и численных расчетов; сопоставлением теоретических решений с экспериментальными данными; применением современных программных вычислительных средств; сравнением с результатами исследований других авторов.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы в расчетах на статическую и динамическую прочность и трещиностойкость элементов конструкций, а также для определения оптимальных условий целенаправленного разрушения твердых тел.

Личный вклад автора. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежат постановка задач и формулировка основных положений, определяющих научную новизну исследований.

Автору принадлежит определяющий вклад в разработку численно - аналитических методик исследований, проведение численных расчетов и выявление основных закономерностей и функциональных зависимостей. Автором выполнен анализ результатов некоторых экспериментов, проведенных в НИЦ «Динамика» (СПбГУ; ИПМаш РАН).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всероссийских и международных конференциях и семинарах: Научно - техническая конференция "Новожиловские чтения", С.-Петербург, 1998; XXXV Международный семинар "Актуальные проблемы прочности", Псков, 1999;

III Международный семинар "Современные проблемы прочности", Старая Русса, 1999; XXXVI Международный семинар "Актуальные проблемы прочности", Витебск, 2000; Международный конгресс "Механика и трибология транспортных систем - 2003", Ростов-на-Дону, 2003; VI Международная научно - техническая конференция "Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте", С.-Петербург, 2004; Семинары в Институте механики Китайской Академии наук, Пекин, 2004, 2005; International conference "Shock Waves in Condensed Matter", Saint-Petersburg, 2004; Международная конференция VII Харитоновские тематические научные чтения "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны", Саров, 2005; XXXIII Summer School "Advanced problems in mechanics - АРМ'2005", St.Petersburg (Repino), 2005; XXI Международная конференция "Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов", С.-Петербург, 2005; IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Н.Новгород, 2006; семинары: в Доме ученых (СПб), ПГУПС, ИПМаш РАН, НИИМ МГУ, ФГУП КБСМ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы составляет 223 страницы, включая 81 рисунок, 12 таблиц и список литературы из 194 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится краткий аналитический обзор развития структурного - временного подхода к определению пороговых характеристик разрушения.

Одной из актуальных проблем механики разрушения остается построение достаточно простого и эффективного критерия хрупкой прочности, в частности, для сред с макродефектами. Известно, что классические критерии Гриффитса и Ирвина неприменимы в области неустойчивых коротких

трещин, так как приводят к неограниченной разрушающей нагрузке. Аналогичная ситуация имеет место в случае гладких концентраторов напряжений (отверстия, вырезы, полости), – коэффициент концентрации напряжений K_t при больших значениях (малый радиус кривизны выреза) оказывается непригодным для определения критической нагрузки. В связи с этим Г. Нейбером (1937) и независимо В.В. Новожиловым (1969) было предложено усреднять напряжения в зоне их высокой концентрации у вершины трещины на определенном расстоянии d . Соответствующий нелокальный силовой критерий разрушения получил название структурного (другие названия – критерий Нейбера/Новожилова, критерий средних напряжений, интегральный силовой критерий).

Присутствие в критерии параметра осреднения d означает, что процесс разрушения обладает собственной структурой, которая, в общем случае, не связана со структурой материала. Более того, величина d не обязательно является параметром осреднения и может рассматриваться как независимая характеристика размерности длины, необходимая для оценки прочности сред с концентраторами напряжений (М.Е. Waddoups *et. al.*, 1971; Т.А. Cruse, 1973). Параметр d также можно трактовать как удаленность очага зарождения очередной магистральной трещины от вершины предыдущей (Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко, 1978). Таким образом, постулируется, что на данном масштабном уровне распространение трещины в среде происходит дискретно, скачками, соответствующими мгновенному последовательному разрушению элементарной ячейки с линейным размером d .

Первоначально структурный параметр разрушения d ассоциировался с межатомным расстоянием, а также с размерами зерен (В.В. Новожилов, 1969). Такая интерпретация получила развитие в работах В.М. Корнева. Поскольку для полимеров указанный подход неприменим, Н.Ф. Морозовым (1988) было предложено выбирать d из условия согласования структурного критерия с критерием Гриффитса/Ирвина в простейших случаях. Таким случаем, в частности, является задача об одноосном растяжении неограниченной пла-

стины с центральной трещиной длиной $2l$ напряжением p , приложенным на удалении. Структурный критерий разрушения в этой задаче записывается следующим образом

$$\frac{1}{d} \int_l^{l+d} \sigma_y(x) dx \leq \sigma_c, \quad (0.1)$$

где $\sigma_y(x)$ – разрывающее напряжение на продолжении трещины, а структурная характеристика среды d определяется как размерная комбинация параметров классических критериев прочности (Н.Ф.Морозов, 1984)

$$d = 2K_{Ic}^2 / (\pi\sigma_c^2), \quad (0.2)$$

σ_c – предел прочности при растяжении, K_{Ic} – вязкость разрушения.

Определенный таким образом структурный критерий применим как к сингулярным (трещины, угловые вырезы), так и к регулярным (отверстия, вырезы, полости) макродефектам, может быть использован в приближенных и точных аналитических решениях. В последнем случае при последовательном уменьшении размера дефекта имеет место естественный предельный переход к бездефектному материалу. При этом в тех формулировках критерия, которые используются в данной работе, задействован минимум констант материала, а именно – предел прочности при растяжении σ_c и статическая вязкость разрушения K_{Ic} . Существенно, что обе механические характеристики определяются по стандартным испытаниям.

Сравнение структурного критерия (0.1) с другими нелокальными критериями разрушения, – такими, как критерий минимального напряжения, критерий фиктивной трещины, критерий граничного напряжения, – дано в работах А.В.Дыскина (1997) и Л.П.Исупова (1998), в которых показано, что критерий (0.1) предпочтительнее в большинстве случаев. С.Е.Михайловым (1995) доказано, что критерий (0.1) может быть представлен как частный случай общего конечно-нелокального функционала прочности.

Критерий (0.1) в совокупности с равенством (0.2) впервые, по-видимому, был использован J.M. Whitney и R.J. Nuismer (1974) для оценки разрушающей

нагрузки при растяжении пластин с круговым отверстием и центральной трещиной, а позднее Н.Ф.Морозовым (1980) распространен на угловые вырезы, для которых, как известно, критерий Гриффитса/Ирвина недоступен.

«Индустриальный» подход Нейбера-Новожилова получил широкое распространение в исследованиях по механике разрушения (Зорин И.С., 1982; Морозов Н.Ф., 1984; Петров Ю.В., 1988; Кокшаров И.И., 1988 и др.). С помощью критерия (0.1) были решены задачи по определению возможного направления роста трещины из вершины концентратора напряжения для луночного выреза (Морозов Н.Ф., 1986) и трещины в анизотропной среде (Петров Ю.В., 1998; Назаров С.А., 2004). Структурный подход также был применен к проблеме коротких трещин (Петров Ю.В., Тарабан В.В., 1996), а равенство (0.2), кроме того, использовано в градиентном подходе определения прочности тел с концентраторами напряжений (Леган М.А., 1990; Сукнев С.В. 1999).

А.Северин (1994) модифицировал критерий (0.1), сделав попытку применить его для случая разрушения сдвигом, введя в (0.1) нагрузку в виде касательного напряжения и предел прочности материала на сдвиг. К настоящему времени, однако, такая модификация структурного критерия не прошла достаточной апробации с целью проверки практической применимости.

На основе структурного критерия В.В.Новожиловым (1969) была построена теория равновесных трещин применительно к модели трещины с концевой зоной М.Я.Леонова-В.В.Панасюка. Равновесная по Новожилову трещина определяется критическим состоянием, при котором сила взаимодействия между парой атомов, прилегающих к вершине трещины, достигает своего предельного значения. Таким образом установлено, что диапазон равновесных трещин l удовлетворяет неравенствам

$$l_G \leq l \leq l_N, \quad (0.3)$$

где l_G, l_N – критический размер трещины соответственно по Гриффитсу и по Новожилову. Теория равновесных трещин В.В.Новожилова получила развитие в работах К.Ф.Черных (1988), Н.Ф.Морозова и М.В.Паукшто (1995),

М.А.Грекова и Н.Ф.Морозова (2000, 2006) и др. Структурный параметр d в теории равновесных трещин чаще рассматривается как межатомное расстояние или как диаметр атома, что ограничивает сферу применения данной концепции и не позволяет широко использовать в инженерной практике. Некоторые исследователи или вообще не дают никакой интерпретации параметру d (критическая длина трещин оценивается в безразмерном виде), или принимают его согласно равенству (0.2), что в случае трещин с концевой зоной требует обоснования.

Для трещин с концевой зоной Ю.Г.Матвиенко (1999) было предложено отождествлять структурный параметр d с длиной зоны сцепления в модели Леонова-Панасюка. В этом случае параметр d уже не является константой материала и зависит от величины приложенной нагрузки, что затрудняет определение ее критического значения.

Альтернативный подход к определению прочности тел с концентраторами напряжений, который также основан на понятии структуры, предложен М.Я.Леоновым и К.Н.Русинко (1963). В модели Леонова-Русинко, также как и в модели Нейбера-Новожилова, вводится некоторый структурный параметр ρ_0 , имеющий размерность длины и позволяющий определять критические нагрузки для материалов с гладкими и острыми концентраторами напряжений. В диссертации дано сравнение результатов, полученных по обоим моделям.

Логичным обобщением структурного критерия (0.1) на динамические задачи механики разрушения является структурно-временной критерий. Впервые идея использования характерного времени разрушения и осреднения напряжения по времени была высказана Н.Ф.Морозовым, Ю.В.Петровым и А.А.Уткиным (1987,1988), а сам критерий сформулирован применительно к динамическим задачам теории трещин:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t ds \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(x, s) dx \leq \sigma_c, \quad (0.5)$$

где t – время, $\sigma(x, t)$ – разрывающее напряжение, τ – параметр осредне-

ния, получивший название «инкубационное (структурное) время». Разрушение материала с трещиной начинается при достижении в (0.5) равенства.

В случае разрушения «бездефектной» среды, то есть материала, не содержащего заранее созданных (искусственных) макродефектов, критерий (0.5) принимает упрощенный вид

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(s) ds \leq \sigma_c. \quad (0.6)$$

На основе структурно-временного критерия (0.5) Ю.В.Петровым выдвинута концепция инкубационного времени (1991), которая к настоящему времени сформировалась как новый подход к решению теоретических и прикладных задач динамической прочности материалов.

Первоначально инкубационное время τ трактовалось как время передачи взаимодействия от одного структурного элемента с линейным размером d к другому

$$\tau = d/c, \quad (0.7)$$

где c – скорость распространения самых быстрых упругих волн в материале. Соотношение (0.7) позволило решить ряд задач по определению пороговых характеристик динамического разрушения, а также дать оценку возможной скорости распространения разрыва сплошной среды (А.М.Линьков, 2005).

Позднее, инкубационное время стало рассматриваться как самостоятельная физическая константа материала, характеризующая продолжительность подготовки среды к разрушению или фазовому переходу, то есть как независимая характеристика, определяемая экспериментальным или расчетно - экспериментальным путем.

Критерий (0.5) можно переписать в эквивалентной форме при помощи коэффициента интенсивности напряжений K_I (Ю.В.Петров, А.А.Уткин, 1995)

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t K_I(s) ds \leq K_{Ic}. \quad (0.8)$$

Таким образом, к настоящему времени употребляются три различные формы структурно-временного критерия – (0.5), (0.6) и (0.8), позволяющие определить две основные пороговые характеристики динамического разрушения – время до разрушения t_* и пороговую амплитуду нагрузки P_* , или, – в задачах эрозии – пороговую скорость удара микрочастиц. Время до разрушения определяется при заданной нагрузке $\sigma(t) = P f(t)$ как момент времени, при котором *впервые* достигается равенство в каком-либо из перечисленных критериев. Начало отсчета времени, как правило, исчисляется от начала внешнего воздействия на материал, или, например, как в случае откола, – от начала отражения падающей волны от свободной поверхности, что более удобно в расчетах. Для корректного определения пороговой нагрузки P_* во всех критериальных соотношениях необходимо вычислить максимальное по времени значение интеграла, то есть применить в левой части операцию \max_t .

Критерий вида (0.8) позволяет дополнительно определять еще одну пороговую характеристику прочности материала с трещиной – динамическую вязкость разрушения K_{Id} . В диссертационной работе используются все три формы структурно-временного критерия.

В первой главе рассматривается проблема прочности материалов с малыми дефектами (короткими трещинами). Впервые структурный подход к проблеме коротких трещин был сформулирован Ю.В.Петровым и В.В.Тарабаном (1996). В данной главе этот метод развит и обобщен на пространственные трещины (дисковидная трещина), а также использован для оценки прочности упругой среды с гладким концентратором напряжений (круговое отверстие, сферическая полость). В связи с проблемой коротких трещин в этой же главе рассматриваются задачи построения двухкритериальных диаграмм разрушения. Выполнено сравнение с экспериментальными данными и с альтернативными критериями разрушения.

Критерий (0.1) применим как к приближенным (асимптотическим) решениям, так и к точным, полученным в рамках линейной теории упругости. Это обстоятельство позволяет определять критические нагрузки (p_*) для мате-

риалов с короткими неустойчивыми трещинами, которые оказываются недоступными для критерия Гриффитса/Ирвина.

В задаче о равномерном растяжении удаленной нагрузкой плоскости с центральной трещиной длиной $2l$ критерий (0.1) приводит к следующей оценке

$$p_*/\sigma_c = 1/\sqrt{1 + 2l/d}. \quad (1.1)$$

где d определяется согласно (0.2). Равенство (1.1) справедливо для любых длин трещин. В частности, при $l/d \rightarrow 0$ получаем $p_* \rightarrow \sigma_c$.

Далее в рассмотрение вводится предел трещиностойкости (Е.М.Морозов, 1968): $K_c = p_*\sqrt{\pi l}$. Подставив сюда значение p_* из (1.1) и используя равенство (0.2), можно получить двухкритериальную диаграмму разрушения, имеющую форму четверти окружности: $(p_*/\sigma_c)^2 + (K_c/K_{Ic})^2 = 1$.

Этот подход распространен на аналогичную задачу о дисковидной трещине радиуса a . Предложена двумерная формулировка структурного критерия разрушения

$$\frac{2}{2ad + d^2} \int_a^{a+d} \sigma_z(r) r dr = \sigma_c. \quad (1.2)$$

В силу осевой симметрии в (1.2) отсутствует зависимость от угловой координаты, а сечение элементарной ячейки разрушения представляет кольцевой сектор ($z = 0, a \leq r \leq a + d, -\frac{d}{2a} \leq \theta \leq +\frac{d}{2a}$) с площадью $S = \frac{d}{2a} (2ad + d^2)$. Здесь σ_z – разрывающее напряжение, r, z, θ – цилиндрические координаты.

Согласно (1.2) критическая нагрузка равна

$$\frac{p_*}{\sigma_c} = \frac{\pi (1 + 2a/d)}{2 \left[(1 + a/d)^2 \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{a/d}{1 + a/d} \right) + \frac{a}{d} \sqrt{1 + 2a/d} \right]}. \quad (1.3)$$

Оценка (1.3) пригодна для любых трещин, больших и малых, в частности, при $a/d \rightarrow 0$ получаем $p_* \rightarrow \sigma_c$.

Как и в предыдущей задаче, используя понятие предела трещиностойкости K_c , можно в параметрической форме построить двухкритериальную диаграмму разрушения, которая отличается от единичной окружности несколько большей выпуклостью.

В задаче о растяжении плоскости с круговым отверстием радиуса a (задача Кирша) по критерию (0.1) получаем

$$\frac{p_*}{\sigma_c} = \frac{1}{1 - \frac{\Theta}{2} \left(\frac{\Theta}{\Theta + 1} - 1 \right) - \frac{\Theta}{2} \left[\left(\frac{\Theta}{\Theta + 1} \right)^3 - 1 \right]}. \quad (1.4)$$

где $\Theta = a/d$. При $\Theta \rightarrow 0$ имеем $p_* \rightarrow \sigma_c$, а при $\Theta \rightarrow \infty$ получаем известное соотношение $p_*/\sigma_c = 1/3$. Следовательно, определять критическую нагрузку по коэффициенту концентрации напряжений можно лишь для пластин с очень большими (по сравнению с d) отверстиями. Структурный критерий физически адекватно описывает предельно-равновесное состояние пластины во всем диапазоне размеров отверстия.

Дана оценка точности представления критической нагрузки p_* при помощи сингулярного члена асимптотического разложения (трещины) или коэффициента концентрации напряжений (отверстие): $\Delta = |(p_e - p_a)/p_e| \cdot 100\%$, где p_e , p_a – предельная нагрузка по точному и приближенному решению соответственно. Установлено, что для пластины с центральной трещиной при допускаемой погрешности 10%, оценка предельной нагрузки может быть произведена по критерию Ирвина в том случае, если длина трещины $2l$ превышает четыре структурных размера d . Для дисковидной трещины диаметр трещины должен быть в этом случае не менее 12-ти структурных размеров разрушения, а для пластины с отверстием величина Δ не превышает 10% при $\Theta \geq 10$. Для пластины с центральной трещиной вычислена величина Δ для ряда керамик (Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC).

Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными показало вполне удовлетворительное согласие. Рассматривались слоистые композитные материалы (эпоксидные стекло- и углепластики) с центральной трещиной и отверстием (Л.П.Исупов, 1998) и поликарбонат с дисковидными трещинами (J.F.Kalthoff, D.A.Shockey, 1977). Результаты сравнения представлены в виде зависимостей $p_*/\sigma_c = f(\eta)$, где $\eta = a/(a + d)$, a – характерный размер дефекта.

В качестве трехмерного гладкого концентратора напряжений рассмотрена сферическая полость в одноосном поле растягивающих напряжений. При помощи (1.2) получено выражение для критической нагрузки

$$\frac{p_*}{\sigma_c} = \frac{1 + \eta}{1 + \eta(1 + \eta) \left(1 + \frac{3\eta^2}{7 - 5\nu} \right)}, \quad (1.5)$$

где $\eta = a/(a + d)$ ($0 \leq \eta \leq 1$), a – радиус полости, ν – коэффициент Пуассона. Из (1.5) следует, что $p_* \rightarrow \sigma_c$ при $\eta \rightarrow 0$ и $p_*/\sigma_c \rightarrow 1/K_t$ при $\eta \rightarrow 1$, где K_t – коэффициент концентрации напряжений.

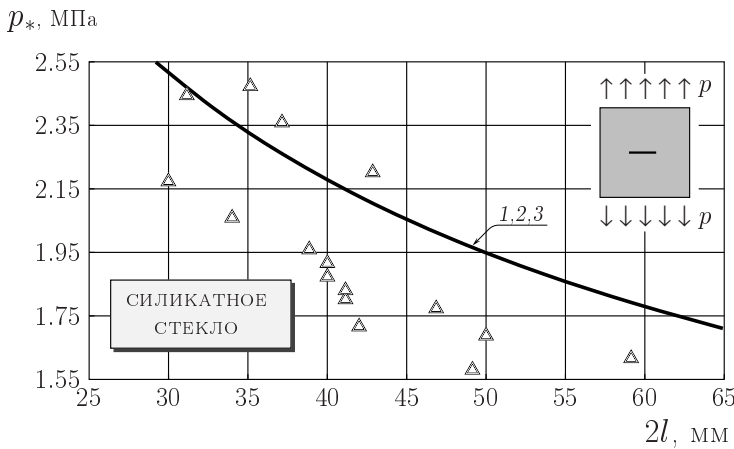


Рис.1.

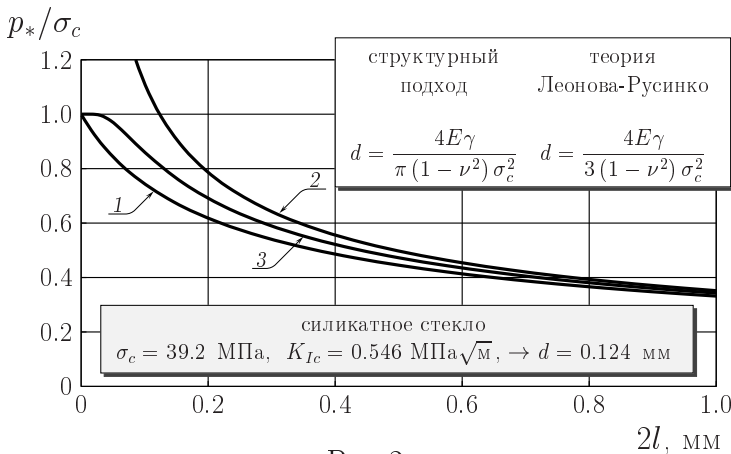


Рис.2.

Для пластины с центральной трещиной выполнено также сравнение (рис. 1; 2) оценок критической нагрузки p_* , определенных по структурному критерию (1), и по критериям Гриффитса/Ирвина (2) и Леонова-Панасюка (3). Треугольниками на рис. 1 показаны экспериментальные данные для стекла (Ковчик С.Е., 1964). В рассматриваемом диапазоне длин трещин все критерии дают одинаковую оценку предельной нагрузки. Различие обнаруживается лишь

при $2l < 1$ мм (рис.2). Также установлена взаимосвязь между структурным параметром d и удельной энергией разрушения γ . Эта зависимость практически совпадает с полученной в теории макронапряжений Леонова-Русинко.

Во второй главе рассматриваются возможные способы определения величины структурного параметра разрушения d посредством анализа реше-

ний различных модельных задач о концентраторах напряжений. При этом акцент делается как на качественное понимание природы структурного параметра разрушения, характеризующего размер зоны предразрушения так и на количественные оценки, позволяющие определять размерные критические нагрузки для конкретного материала. Анализируются условия согласования структурного критерия с классическими критериями разрушения.

В задаче о дисковидной трещине обобщенный структурный параметр разрушения определяется как корень d_0 кубического уравнения

$$d = d_0 \left(\frac{a + d_0/2}{a + d_0/3} \right)^2 \quad (2.1)$$

и зависит не только от прочностных констант материала, но и от радиуса трещины a . Из (2.1) следует, что $d_0 \rightarrow d$ при $d_0/a \rightarrow 0$ и $d_0 \rightarrow 4d/9$ при $a/d_0 \rightarrow 0$, где d определяется согласно (0.2). Равенство (2.1) позволяет определить размерную критическую нагрузку, которая при «больш́их» трещинах совпадает с оценкой по Гриффитсу/Ирвину, а при бесконечно малых переходит в предел прочности материала σ_c .

В этой же задаче можно применить и одномерный вариант структурного критерия вида (0.1). Критическая нагрузка в этом случае (интегрирование по отрезку) оказывается несколько меньшей, по сравнению с двумерной версией критерия (интегрирование по кольцу). Экспериментальные точки лежат ближе ко второй кривой. Для предела трещиностойкости расположение кривых противоположное.

Двумерный вариант больше отвечает физическому смыслу структурного критерия, – в этом случае осреднение напряжений производится не только в радиальном, но и в азимутальном (угловом) направлении. Это становится очевидным в случае неравномерной нагрузки на берега трещины.

Выполнено сравнение предельных нагрузок для пространства с дисковидной трещиной, полученных по структурному критерию и по критериям Гриффитса/Ирвина и Леонова - Панасюка (критическое раскрытие трещины δ_c).

Анализ показал, что разница в величине p_*/σ_c , определенной по структур-

ному критерию при интегрировании по кольцу (двумерный вариант) и по отрезку (одномерный вариант), не превышает 1.7%. В то же время наблюдается заметное расхождение предельных нагрузок, определенных по δ_c -критерию и по структурному критерию для трещин малого размера (максимальная разность – 18.5%). Показано, что оценка p_* , полученная по δ_c -критерию при $a \rightarrow 0$, – результат интерполяции в область малых трещин (В.В.Панасюк, 1968). Критерий Гриффитса/Ирвина в этой области «не работает».

В случае гладких концентраторов напряжений (отверстия, полости, вырезы) представляется логичным использовать те же значения структурного параметра d , что и для трещин, с учетом геометрической формы дефекта. В обоснование этого тезиса рассмотрены задачи о всестороннем растяжении плоскости с эллиптическим отверстием, одноосном растяжении плоскости с круговым отверстием, пространства со сферической полостью, пластины с боковыми вырезами и «бездефектной» плоскости/пространства.

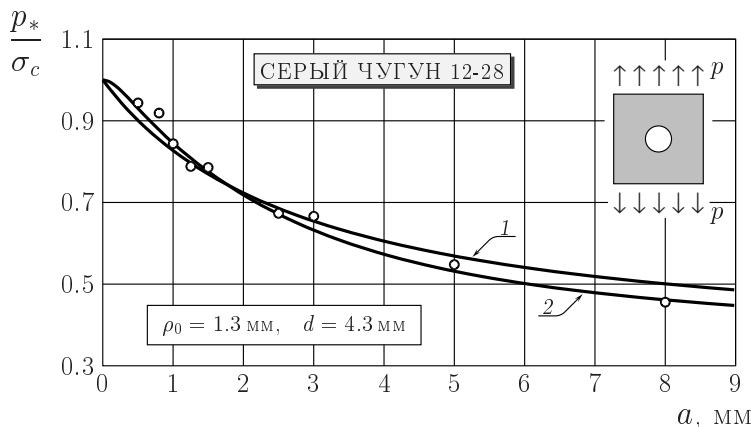


Рис.3.

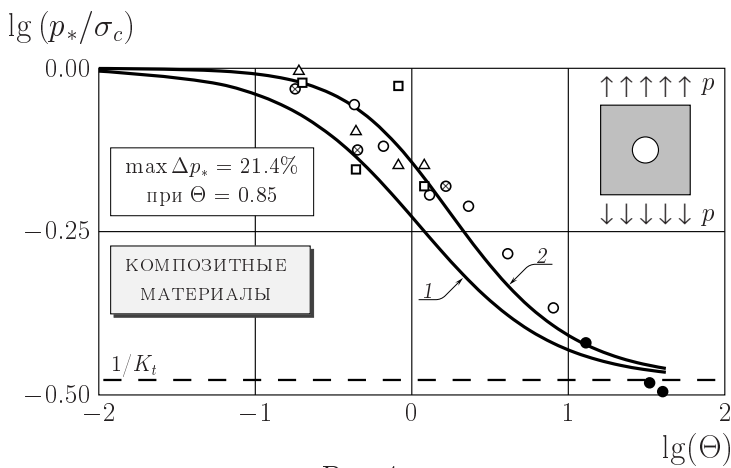


Рис.4.

В задаче о растяжении пластины с круговым отверстием дается сравнительный анализ критических нагрузок, полученных по структурному критерию и по критерию Леонова - Русинко (рис. 3, кривые 1 и 2 соответственно), а также по «методу фиктивной трещины» (J.Tirosh, 1977) (кривые 1 и 2 на рис. 4). Экспериментальные данные на рис. 3 представлены для серого чугуна (С.Я.Ярема, Л.В.Ратыч, 1965), а на рис. 4 – для композитов (J.Tirosh, 1977).

Показано, что фиктивная трещина длины L является эквивалентом зоны предразрушения длиной d .

«Метод фиктивной трещины» распространен на задачу о растяжении пространства со сферической полостью. Зависимость разрушающей нагрузки от размера полости представлена в виде $p_*/\sigma_c = 1/f(\eta)$, где функция $f(\eta) \rightarrow 1$ при $\eta \rightarrow 0$ и $f(\eta) \rightarrow K_t$ при $\eta \rightarrow 1$.

Дано сравнение полученной предельной нагрузки с величиной p_* , следующей из структурного критерия (одномерный и двумерный варианты). Показано, что при малых размерах полости ее влияние на прочность материала равносильно воздействию дисковидной трещины того же диаметра: в обоих случаях имеет место оценка $p_*/\sigma_c = 1 - \eta^2 + O(\eta^3)$ при $\eta \rightarrow 0$.

В задаче о растяжении плоскости или пространства двумя равными противоположно направленными сосредоточенными силами P установлено, что размер элементарной ячейки разрушения из соображений сопоставимости с критерием критического разрушения должен быть принят равным нулю. Причем в пространственной задаче только двумерный вариант структурного критерия дает физически корректный результат, соответствующий размерности задачи.

Далее при помощи структурного критерия разрушения оценивается предельная нагрузка для пластины с боковыми вырезами гиперболической формы в условиях одноосного растяжения. Здесь величина d ограничена в направлении опасного сечения размером объекта. В этой задаче структурный критерий прочности записывается в эллиптических координатах (ξ, η)

$$\frac{1}{d} \int_{\eta_1}^{\eta_0} \sigma_\xi(0, \eta) \cos \eta d\eta = \sigma_c, \quad \eta_1 = \arcsin(a - d). \quad (2.2)$$

Показано, что для получения корректного значения величины предельной нагрузки необходимо нормировать значение структурного параметра по формуле $d_0 = da/a_r$ где a – полуширина перемычки (координата), a_r – фактическое значение полуширины перемычки, а d определяется согласно (0.2).

Отметим, что решение Г.Нейбера в этой задаче ограничено случаем $d \leq 2a$.

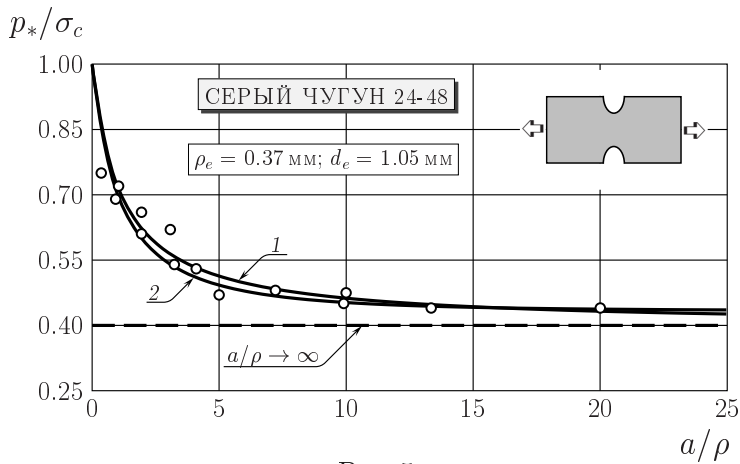


Рис.5.

На рис. 5 показана зависимость разрушающей нагрузки от отношения a/ρ , где ρ – радиус кривизны выреза в его вершине (кривая 1). Данные экспериментов приведены для серого чугуна (С.Я.Ярема, Л.В.Ратыч, 1965). Крите-

рий Леонова - Русинко представлен на рис. 5 кривой 2. Здесь ρ_e и d_e – эффективные (опытные) значения структурных характеристик.

Предложены экспериментально - расчетные схемы для определения величины структурного параметра разрушения d на плоских образцах из пластин с центральной или краевой трещиной и с круговым отверстием.

Глава 3 содержит результаты применения структурной макромеханики разрушения к изучению целостности сплошной среды в условиях импульсного нагружения.

В большинстве моделей динамики инициирования и роста трещин, развиваемых в рамках механики сплошной среды, решение сначала строят для некоторого простого закона изменения нагрузки во времени. Обычно в качестве такой нагрузки принимается дельта-функция Дирака $\delta(t)$. Очевидным следствием заданности граничного условия в виде напряжения такой временной формы является то, что смещение на фронте волны имеет вид функции Хевисайда $H(t)$, т.е. терпит скачок. Закономерно возникает вопрос о возможном нарушении сплошности среды на фронте волны нагрузки. Ответ на него можно дать, лишь обладая некоторой количественной характеристикой, которая одновременно есть физический параметр среды и имеет размерность длины. Сравнив величину указанного параметра, принимаемого в качестве константы материала, со значением амплитуды скачка на фронте волны, можно оценить таким образом пределы применимости модели. По-

добным линейным параметром может быть принят структурный размер d .

Наиболее простой иллюстрацией предлагаемого подхода в данном случае может служить динамическая задача о полубесконечной стационарной трещине продольного сдвига. В декартовой системе координат (x, y, z) рассматривается антиплоская трещина, к берегам которой ($y = 0, x \leq 0$) приложена импульсная нагрузка вида $p(t) = \sigma_{yz}(t) = \mu U \delta(c_2 t)$, где U – постоянная величина, характеризующая интенсивность нагрузки, c_2 – скорость поперечных волн, μ – модуль сдвига. Величина U , таким образом, имеет физический смысл скачка смещения на фронте волны $w(y, t)|_{x < 0} = U H(c_2 t + y)$. Ставится вопрос, – насколько реализуется соотношение $U_* \sim d$, где звездочка обозначает пороговое значение. Критерий разрушения используется здесь в форме (0.5), где τ определяется согласно (0.7).

В главе дано подробное решение динамической задачи, полученное с использованием преобразования Фурье по времени и координате, метода факторизации и контурного интегрирования. Приведены выражения для компонент тензора напряжений $(\sigma_{xz}(x, t), \sigma_{yz}(x, t))$ и вектора смещений $(w(x, t))$ на линии трещины. Определены значения пороговой амплитуды смещения на фронте волны для некоторых конструкционных материалов ($U_*/d, \%$): алюминиевый сплав В95 – 3.2, рельсовая сталь – 3.0, сферопластик – 2.6, стекло – 0.29, бетон – 0.007 ÷ 0.031. С учетом соотношения $\sigma_c \approx E/(2\pi)$, где E – модуль упругости, получено: $U_* = (0.64 \div 0.96)d$, где нижний предел соответствует минимальному значению коэффициента Пуассона, а верхний, – максимальному. Таким образом, предельная амплитуда скачка смещения на фронте волны U_* всегда меньше структурного параметра d . В рамках структурно-временного подхода к процессу разрушения это означает, что сплошность среды на фронте волны не нарушается. Величина U_* характеризует способность материала сопротивляться интенсивным импульсным сдвиговым воздействиям.

Выполнено сравнение полученной пороговой амплитуды скачка U_* с вариантами, когда: а) волна распространяется в среде без трещины и б) напря-

женное состояние на продолжении трещины является суперпозицией двух предыдущих (усилия на берегах трещины плюс напряжение в волне). Для этих случаев получено: $U_* = (0.32 \div 0.48)d$ и $U_* = (0.21 \div 0.32)d$.

Дана оценка порогового скачка U_* для плоской и антиплоской трещины на основе асимптотического решения. Вывод о целостности среды сохраняет силу. Показано, что в динамических задачах о трещинах инкубационное время τ имеет смысл времени до разрушения t_* , если амплитуда приложенного импульса U является пороговой U_* для данного материала: $t_* = (U_*/U)^2 \tau$.

В главе 4 с использованием структурно-временного критерия в форме (0.8) изучается динамическая вязкость разрушения материалов K_{Id} . Показано принципиально различное поведение этой характеристики при пороговых и запороговых нагрузках. Предложена новая пороговая характеристика динамического разрушения материалов с трещинами, условно названная «количество разрушения».

Рассматривается бесконечная упругая плоскость с прямолинейной полубесконечной трещиной, к берегам которой приложен импульс прямоугольной формы с амплитудой P и продолжительностью t_0 : $p(t) = P [H(t) - H(t - t_0)]$. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от времени $K_I(t)$ в этой задаче известна (Г.П. Черепанов, 1972). Применение критерия (0.8) позволяет получить следующие пороговые характеристики разрушения: пороговую амплитуду P_* , время до разрушения t_* , динамическую вязкость разрушения K_{Id} , силовой импульс нагружения $U_* = P_* \cdot t_0$. В диссертационной работе построены зависимости этих характеристик от длительности нагрузки t_0 для некоторых горных пород: известняк (1), габбро-диабаз (2), мрамор (3), песчаник (4), гранит (5) и глина (6). Инкубационное время разрушения τ для этих материалов определено экспериментально в НИЦ «Динамика».

Для анализа динамической трещиностойкости могут быть использованы еще две комбинированные характеристики: произведение динамической вязкости разрушения на время до разрушения $K_{Id} \cdot t_*$ и произведение величины пороговой амплитуды на время до разрушения $P_* \cdot t_*$. Физически более со-

держательной оказывается последняя величина, «количество разрушения», рекомендуемая для оптимизации выбора наиболее прочного материала.

Зависимость $P_* \cdot t_* = f(t_0)$ имеет характерный минимум (рис. 6), который обусловлен тем, что время до разрушения t_* с увеличением длительности нагрузки возрастает, а пороговая амплитуда P_* – снижается. Это позволяет подобрать длительность нагружения таким образом, чтобы добиться разрушения материала, – как предполагается, – с минимальными затратами энергии.

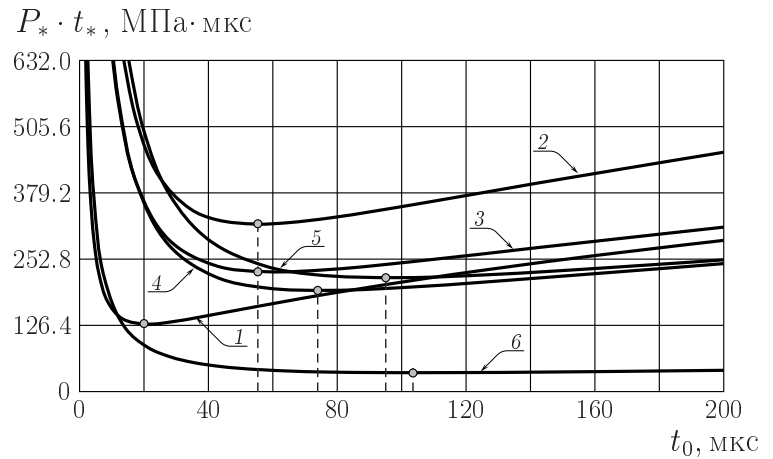


Рис.6.

Показано, что динамическая вязкость разрушения материалов существенно зависит от истории нагружения, что обуславливает неустойчивость ее поведения при ударно-волновых нагрузках (рис. 7; известняк, $t_0 = 60$ мкс).

На диаграмме разрушения выделяются четыре характерные ветви (рис. 7; t – произвольное время до разрушения). Разрушение на ветви 1 происходит при временах до разрушения t меньших, чем пороговое t_* : $t < t_*$, $P > P_*$,

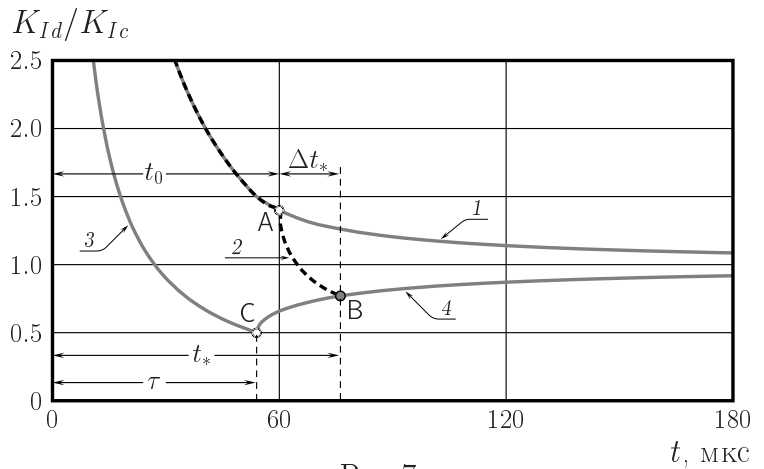


Рис.7.

$K_I(t)$ возрастает. В точке A время до разрушения совпадает с длительностью нагружения ($t = t_0$). Разрушение на ветви 2 происходит на стадии убывания K_I , при этом $t \leq t_*$, $P \geq P_*$. В точке B время до разрушения совпадает с пороговым ($t = t_*$). Ветвь 3 – переходная, при $t_0 = 0$. Точке C соответствует случай нагружения материала пороговым импульсом с амплитудой P_* , имеющим временной профиль δ -функции. Время до разрушения при этом совпадает с инкубационным ($t = \tau$), а динамическая вязкость разрушения минималь-

на и равна половине соответствующего статического значения $K_{Id} = K_{Ic}/2$. Ветвь 4 представляет совокупность точек, отвечающих пороговым временам до разрушения t_* .

Таким образом, все возможные значения динамической вязкости разрушения K_{Id} лежат в пределах, ограниченных кривыми 1, 2, 3 и 4. При этом величина K_{Id} может меняться в очень большом диапазоне, от минимального значения, равного $K_{Ic}/2$ до бесконечности (при $t_* = 0$). Этим объясняется большой разброс экспериментально определенных значений K_{Id} , полученных разными исследователями. Отсюда также следует вывод о том, что в динамике некорректно использовать для оценки трещиностойкости материалов фиксированное значение критического коэффициента интенсивности напряжений, как это имеет место в статике.

Величина Δt_* , показанная на рис.7, характеризует время задержки разрушения, – период времени от момента достижения коэффициентом интенсивности напряжения максимального значения до момента разрушения. Время до разрушения, таким образом, равно $t_* = t_0 + \Delta t_*$. В работе особо рассмотрен случай $\Delta t_* = 0$. Анализируются соответствующие предельные характеристики разрушения, получившие название *запороговых*.

Установлено, что при пороговом и запороговом разрушении справедливо соотношение $\lim_{\tau/t_0 \rightarrow 0} K_{Id}/K_{Ic} = 1$. Это означает, что величина τ характеризует меру отклонения критического значения динамического коэффициента интенсивности напряжений K_{Id} от его статического значения K_{Ic} . Поэтому, кривая $K_{Id} = f(t_0)$ для материала с меньшим значением инкубационного времени будет располагаться ближе к своему статическому значению, и наоборот. Рассмотрены альтернативные способы экспериментального определения инкубационного времени.

В главе 5 исследуется взаимосвязь пороговых характеристик разрушения в условиях откола. Структурно-временной критерий применяется здесь в форме (0.6). Как и в средах с трещинами, в качестве критерия отбора конструкционных материалов рекомендовано использовать новую пороговую ха-

рактеристику «количество разрушения».

Анализируется процесс отражения импульса сжимающего напряжения симметричного треугольного профиля, – с участками нарастания и затухания одинаковой длительности t_0 , – от свободного торца полубесконечного стержня. Такая форма импульса, с одной стороны, достаточно хорошо аппроксимирует реальные ударные нагрузки, а с другой – позволяет найти аналитические выражения для пороговых характеристик разрушения.

Предполагается, что разрушение происходит в сечении, в котором впервые достигается максимум растягивающего напряжения $\max_x \sigma(x, t) = \sigma(ct_0/2, t)$. Для этого сечения получена временная зависимость прочности (связь между пороговой амплитудой P_* и временем до разрушения t_*):

$$t_*/\tau = \begin{cases} [2(1 - \sigma_c/P_*)]^{-1} + 2/3, & \text{при } 1 \leq P_*/\sigma_c \leq 2; \\ (4\sigma_c)/(3P_*) + 1, & \text{при } P_*/\sigma_c \geq 2. \end{cases} \quad (5.1)$$

Зависимость (5.1) позволяет определять инкубационное время из опытов. Для сплава В95, например, получено $\tau = 0.45$ мкс (P_* и t_* взяты из экспериментов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, – Златин Н.А. и др., 1974-75).

Показано, что инкубационное время τ – это время до разрушения образца t_* при нагружении его пороговым импульсом бесконечно малой длительности (типа δ -функции). При пороговых нагрузках P_* нулевой длительности время до разрушения не может быть меньше τ , – материалу необходимо определенное время (инкубационный период) для того, чтобы «подготовиться» к разрушению.

С использованием приближенного равенства (0.7) для ряда рельсовых сталей построены диаграммы откольного разрушения вида $t_* = f(P_*)$ и $U_* = f(2t_0)$, где U_* – пороговый силовой импульс нагружения. Установлено, что наиболее информативной пороговой характеристикой является «количество разрушения» $P_* \cdot t_*$. Качественно зависимость $P_* \cdot t_* = f(2t_0)$ имеет тот же характер, что и в задаче о динамической вязкости разрушения и позволяет оптимизировать процесс отбора наиболее прочных материалов.

Исследовано влияние формы импульса нагрузки на откольную прочность.

Для сравнения с исходной нагрузкой выбран импульс треугольного профиля без участка нарастания и с длительностью t_0 . Установлено, в частности, что время до разрушения t_* для рельсовой стали 700 (МСЖД60) в случае треугольного профиля без участка нарастания меньше (максимум на 25%), чем для симметричного треугольного профиля. С уменьшением длительности действия нагрузки эта разница постепенно уменьшается, стремясь в пределе к нулю, то есть $t_* \rightarrow \tau$ при $t_0 \rightarrow 0$ независимо от временной формы внешнего воздействия. Следовательно, инкубационное время τ – инвариантная характеристика, зависящая лишь от прочностных свойств материала.

Дана оценка влияния температуры испытаний на откольную прочность материалов (на примере стали 45ХН2МФА). Сделан вывод о том, что минимизация порогового силового импульса U_* при „коротких“ ударах может быть достигнута за счет снижения вязкости разрушения путем охлаждения, а при „длинных“, – за счет уменьшения предела статической прочности материала при его нагреве.

Рассмотрено также поведение порогового импульса нагружения U_* для материалов с существенно различной внутренней структурой, в частности, для металлов и полимеров (расчеты выполнены для стали 4340 и ПММА). Сравнение может быть выполнено с помощью соотношения $U'_*(\tau_0)/U''_*(\tau_0) = k(\tau_0)$, где $\tau_0 = 2t_0$ – для треугольного сигнала с участком нарастания и $\tau_0 = t_0$ – то же, без участка нарастания. Штрихи обозначают материал.

Характер поведения $k(\tau_0)$ свидетельствует о том, что на статической ветви относительная прочность рассматриваемых материалов определяется соотношением пределов их статической прочности на разрыв, а на динамической ветви, – соотношением произведений предела прочности и инкубационного времени. В предельных случаях, получаем: $k \rightarrow \sigma'_c \tau' / \sigma''_c \tau''$ при $\tau_0 / \tau \rightarrow 0$ и $k \rightarrow \sigma'_c / \sigma''_c$ при $\tau_0 / \tau \rightarrow \infty$. В первом случае пороговый силовой импульс имеет смысл «кванта разрушения» (Ю.В.Петров, 1991). В целом можно заключить, что в динамике разница в прочностных свойствах полимера и металла становится заметно менее ощутимой, нежели в статике.

Глава 6 посвящена изучению пороговых скоростей эрозионного разрушения, то есть ударного разрушения поверхностей твердых тел твердыми жесткими частицами. Под пороговой здесь понимается критическая скорость удара частиц абразива при которой возникает повреждение поверхности.

Рассматривается падение одиночной сферической микрочастицы радиуса R по нормали к поверхности материала-мишени. Впервые эта задача с применением теории контактного удара Г.Герца и структурно-временного критерия (в форме (0.6)) была решена Н.Ф.Морозовым и Ю.В.Петровым (1996). В диссертации эта задача расширена на случай вязкого разрушения поверхности, исследовано также влияние геометрической формы частиц на пороговую скорость удара, приведены расчеты минимального объема выкрашивания для различных металлов, дана оценка влияния температуры испытаний.

Хрупкое эрозионное разрушение ассоциируется с появлением кольцевых трещин вдоль границы контактной площадки, а вязкое – с образованием пластических отпечатков на поверхности металла-мишени. Для анализа вязкого разрушения предложен новый динамический критерий текучести

$$\int_{t-\tau_Y}^t \left(\frac{\sqrt{3} T_k(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds \leq \tau_Y, \quad (6.1)$$

где α – температурно-зависимая константа материала определяемая экспериментально, σ_Y – предел текучести при квазистатическом одноосном растяжении, T_k – интенсивность касательных напряжений (второй инвариант девиатора напряжений), τ_Y – инкубационное время текучести. В общем случае $\tau_Y \neq \tau$ и определяется из опытов.

Критерий (6.1) применим при растяжении и сдвиге и является обобщением варианта одноосного нагружения (А.А.Груздков, Ю.В.Петров, 1999). При медленно меняющейся нагрузке предельный переход $\tau_Y/t_0 \rightarrow 0$, где t_0 – характерная длительность нагружения, позволяет получить соответствующий статический критерий текучести.

С использованием экспериментальных данных о пороговых скоростях удара v_* (Л.И.Урбанович и др., 1999) были определены инкубационные времена

хрупкого разрушения для ряда металлов (Zn, Al, Ni, Fe, Mo, Nb, сплавы В95, Д16Т, ВТ-1, стали AISI-310 и 12Х18Н10Т). В частности, для сплава В95 определено: $\tau = 0.70$ мкс при $R = 150$ мкм и $v_* = 33$ м/с. Это значение τ близко к полученному в задаче откола (~ 0.5 мкс). Отсюда следует, что инкубационное время может оцениваться по результатам экспериментов по откольному или эрозионному разрушению.

Для указанных металлов построены диаграммы разрушения $v_* = f(R)$. Установлено, что при постепенном увеличении размера частиц происходит выход на статический режим нагружения ($c\tau/R \rightarrow 0$). В результате пороговая скорость удара оказывается не зависящей от размера частиц. Этот эффект подтверждается экспериментальными наблюдениями, которые показывают, что эрозия возрастает с увеличением размера частиц вплоть до предельного значения, выше которого остается неизменной (A.W.Ruff, 1982; I.Finnie, 1982; I.M.Hutchings, 1999 и др.). Используя теорию фрикционного контактного взаимодействия (И.Г.Горячева, 2001), пороговые диаграммы разрушения можно распространить на случай малых углов атаки частиц.

Анализ диаграмм $v_* = f(R)$ для хрупкого и вязкого разрушения показал принципиальную возможность смены режима разрушения, – с хрупкого на вязкое, и наоборот. Увеличение скорости падения частиц способствует переходу вязкого разрушения в хрупкое. Такая смена типа разрушения согласуется с экспериментальными данными (G.L.Sheldon, 1966).

Для оценки сравнительной эрозионной стойкости материалов предложены новые пороговые характеристики: силовой импульс удара $U_* = v_* \rho R$ и количество движения mv_* , где m – масса частицы, ρ – ее плотность. Эти характеристики дают возможность подобрать материал и размер абразивных частиц таким образом, чтобы износ (выкрашивание) происходил при наименьших затратах кинетической энергии. При этом величина mv_* предпочтительна.

Для стали 12Х18Н10Т дана оценка порогового (минимального) объема V_* уносимого материала в расчете на один удар абразивной частицы. Используются эмпирические выражения, полученные разными экспериментатора-

ми на основе теории размерностей (Л.И.Урбанович *и др.*, 1994; D.V.Marshall *et.al.*, 1982). Установлено, что в рассмотренном диапазоне размеров частиц ($R = 50 \div 150$ мкм) существует резко выраженный максимум объема фрагментов выкрашивания $V_{* \max}$ при $R = 60$ мкм. Этот эффект обусловлен действием двух противоположных факторов: возрастанием объема самой частицы и одновременным снижением пороговой скорости удара v_* . Существование максимальной величины износа при определенном размере частиц эродента подтверждается экспериментально (Г.М.Патеюк, 1962).

При помощи динамического критерия текучести (6.1) построена температурная зависимость пороговых скоростей удара микрочастиц для стали 15Х2МФА. Для малых размеров микрочастиц получен эффект охрупчивания (повышения динамического предела текучести) при увеличении температуры поверхности материала-мишени. Обсуждается связь с аналогичным эффектом в экспериментах по откольному разрушению (Г.И.Канель *и др.*, 2001, 2002). Существование критических температур перехода одного вида повреждения в другой (усталостное/тепловое) наблюдается также в теплофизических процессах изнашивания (В.И.Колесников, 2003).

Для оценки влияния геометрической формы частиц на пороговую скорость эрозионного разрушения рассмотрен нормальный удар торцом частицы в виде жесткого кругового цилиндра о поверхность упругого полупространства. В силу линейной зависимости между контактной силой и глубиной внедрения частицы выражения для пороговых характеристик в этом случае можно представить в аналитическом виде. Так, для порогового силового импульса удара получено

$$U_*(t_0) = \frac{1}{1 - 2\nu} \begin{cases} \frac{\sigma_c \tau}{\sin(\pi\tau/(2t_0))}, & \text{при } t_0 \geq \tau; \\ \sigma_c \tau, & \text{при } t_0 \leq \tau, \end{cases} \quad (6.2)$$

где t_0 – продолжительность контакта. В уравнении (6.2) верхняя строка представляет статическую ветвь пороговой диаграммы разрушения, а нижняя – динамическую, причем последняя при $\nu = 0$, как и в задаче откола, имеет

смысл «кванта разрушения», то есть минимального силового импульса.

График зависимости (6.2) для сплава В95 показан на рис.8. Для сравнения приведена соответствующая кривая для откольного разрушения. Цифры (1) и (2) обозначают динамическую и статическую ветвь соответственно.

Характер кривых на рис. 8 подтверждает взаимосвязь процессов откольного и эрозийного разрушения твердых тел. В целом результаты расчетов показывают существенное влияние формы частиц на величину пороговой скорости разрушения, что согласуется с

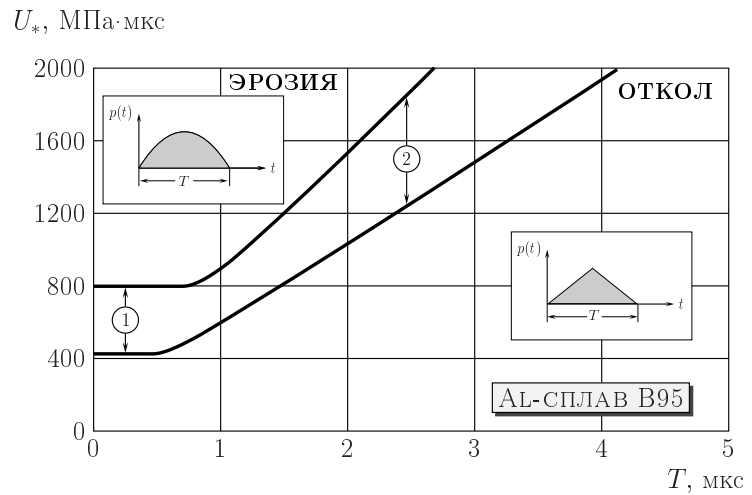


Рис.8.

результатами экспериментальных наблюдений (Ю.А.Тадольдер, 1966).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В рамках структурной макромеханики разрушения развит подход, позволяющий определять предельные нагрузки для сред с «малыми» дефектами и строить двухкритериальные диаграммы разрушения.

2. Предложены модификации структурного критерия хрупкого разрушения, позволяющие корректно оценивать прочность тел с остроконечными и гладкими концентраторами напряжений произвольных размеров.

3. В динамической задаче о трещине продольного сдвига получены оценки пороговых скачков на фронте волны смещения при различных режимах нагружения среды. Пороговой скачок смещения дает возможность судить о динамической сдвиговой прочности материалов с трещинами. Установлено, что для реальных материалов величина порогового скачка смещения не превышает линейный размер структурной ячейки разрушения.

4. Доказано, что динамическая вязкость разрушения существенно зависит от истории нагружения. Показано принципиальное качественное различие

в поведении динамической трещиностойкости материалов при пороговых и запороговых нагрузках. Дано объяснение неустойчивости поведения динамической вязкости разрушения.

5. Предложена новая пороговая характеристика динамического разрушения материалов с трещинами, – «количество разрушения». Установлена принципиальная возможность оптимизации процесса динамического разрушения материалов с макротрещинами путем подбора длительности нагружения.

6. Показано, что динамическая прочность материала в случае откола существенно зависит от формы импульса нагружения, а прочностные свойства материалов с различной внутренней структурой при быстрых динамических нагрузках отличаются в значительно меньшей степени, чем при статических.

7. Построены пороговые диаграммы откольного разрушения, позволяющие производить отбор наиболее прочных конструкционных материалов, работающих в условиях интенсивного динамического нагружения. В качестве критерия рекомендовано использовать максимум «количества разрушения». Учет температурных условий эксплуатации конструкции позволяет подобрать материал с большей динамической прочностью за счет оптимального соотношения статической прочности и вязкости разрушения.

8. Предложена модель для определения пороговых скоростей эрозионного разрушения твердых тел. Установлено существенное влияние геометрической формы абразивных частиц на пороговые характеристики эрозионного разрушения. Показана принципиальная возможность хрупко-вязкого перехода при изменении размера частиц эродента. Показано, что пороговые характеристики дают возможность выбирать оптимальные режимы эрозионного износа.

9. Предложен новый динамический критерий текучести металлов, инвариантный к способу и истории нагружения. Показана взаимосвязь процессов откольного и эрозионного разрушения твердых тел, важнейшим следствием которой является возможность получения временных зависимостей прочности и текучести, необходимых для тестирования динамических прочностных свойств твердых тел.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* Проблемы эрозионного разрушения конструкционных материалов транспортных систем // Транспорт: наука, техника, управление. 1996. № 8. С.6-9.
2. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* О пороговых скоростях эрозионного разрушения // Тр. науч.-тех. конф. "Новожиловские чтения". СПб. 1998. С.105-109.
3. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* Об определении контактной прочности хрупких конструкционных материалов // Транспорт: наука, техника, управление. 1998. № 10. С.16-23.
4. *Смирнов В.И.* Двухкритериальная модель разрушения хрупкого пространства с дисковидной трещиной // Тр. XXXV Междунар. сем. "Актуальные проблемы прочности" 15-18 сентября 1999г. Ч.1. Псков. 1999. С.66-68.
5. *Смирнов В.И., Тарабан В.В.* Двухпараметрические диаграммы хрупкого разрушения // Тр. III Междунар. сем. "Современные проблемы прочности" 20-24 сентября 1999, Старая Русса. Т.1. Великий Новгород. 1999. С.182-186.
6. *Смирнов В.И.* О прогнозировании долговечности железнодорожных рельсов // Транспорт: наука, техника, управление. 1999. № 10. С.19-23.
7. *Морозов Н.Ф., Смирнов В.И., Петров Ю.В.* Об эрозионном разрушении твердых тел // Механика контактных взаимодействий. М.: Физматлит, 2001. С.640-650.
8. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* Нестационарные колебания и поведение внутренней энергии одномерных тел. Препр. СПб.: ИПМаш РАН, 2002. 61с.
9. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Смирнов В.И.* Хрупко-вязкий переход при эрозионном разрушении // ДАН. 2002. Т.385, № 1. С.64-66.
10. *Грузджов А.А., Петров Ю.В., Смирнов В.И.* Инвариантная форма критерия динамической текучести металлов // ФТТ. 2002. Т.44, № 11. С.1987-1989.
11. *Petrov Y.V., Morozov N.F., Smirnov V.I.* Structural macromechanics approach in dynamics of fracture // Fatigue & Fracture of Engineering Materials

& Structures. 2003. 26, № 4. P.363-372.

12. *Смирнов В.И., Петров В.И.* Откольная прочность рельсовых сталей // Сб. докл. междунар. конгресса "Механика и трибология транспортных систем - 2003". Т.2. Ростов-н/Д: РГУПС, 2003. С.277-281.

13. *Смирнов В.И.* О расчете на прочность материалов с малыми дефектами // Тр. VI Междунар. научно-техн. конф. "Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте". СПб.: ПГУПС, 2004. С.352-356.

14. *Petrov Y.V., Smirnov V.I., Krivosheev S.I., Atroshenko S.A., Fedorovsky G.D., Utkin A.A.* Impact loading of rocks // Shock Waves in Condensed Matter: Intern. Conf., 18-23 July, 2004. St.-Petersburg. 2004. P.17-19.

15. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* О пороговых амплитудах волны смещения в динамической задаче о трещине продольного сдвига // Вестник СПбГУ. Сер.10. 2004. Вып.3-4. С.133-139.

16. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Смирнов В.И.* Об оценке предельной интенсивности импульсных динамических нагрузок в механике трещин // ДАН. 2005. Т.400, № 3. С.341-343.

17. *Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Смирнов В.И., Уткин А.А., Федоровский Г.Д.* Импульсное разрушение горных пород // Тр. Междунар. конф. "VII Харитоновские тематические научные чтения", 14-18 марта 2005г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С.390-394.

18. *Atroshenko S.A., Fedorovsky G.D., Krivosheev S.I., Petrov Yu.V., Smirnov V.I., Utkin A.A.* The experimental investigation of rock fracture under pulse loading // Proc. of the XXXIII Summer School "Advanced problems in mechanics - APM'2005", June 28 - July 5, 2005. St. Petersburg: IPME RAS, 2005. P.9-20.

19. *Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Смирнов В.И., Уткин А.А., Федоровский Г.Д.* Экспериментальное исследование разрушения горных пород с различной структурой при ударно-импульсном и статическом нагружении // Тр. XXI Междунар. конф. "Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов", 4-7 октября, 2005. С.-Петербург, ВВМ, 2006. С.53-59.

20. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* О прочности материалов с малыми дефектами // Изв. РАН. МТТ. 2006. № 4. С.165-177.
21. *Смирнов В.И.* О пороговых силовых импульсах при откольном разрушении материалов // ПМТФ. 2006. Т.47, № 5. С.97-106.
22. *Смирнов В.И.* О неустойчивости поведения динамической вязкости разрушения // ЖТФ. 2006. Т.76, № 11. С.134-136.
23. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Смирнов В.И., Кривошеев С.И.* Прогнозирование динамической вязкости разрушения горных пород // Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород: сб. статей к 75-летию Е.И.Шемякина. М.: Физматлит, 2006. С.484-496.
24. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Иванов Б.А., Маров М.Я., Смирнов В.И.* О прогнозировании пороговой энергии разрушения в механике ударного кратерообразования // ДАН. 2007. Т.412, № 1. С.56-58.
25. *Смирнов В.И.* О влиянии геометрической формы абразивных частиц на пороговую скорость эрозионного разрушения // Проблемы прочности. 2007. № 1. С.69-78.
26. *Смирнов В.И.* Структурный подход в задачах предельного равновесия хрупких тел с концентраторами напряжений // ПМТФ. 2007. Т.48, № 4. С.162-172.
27. *Петров Ю.В., Смирнов В.И.* О температурной зависимости пороговой скорости эрозионного разрушения // ДАН. 2007. Т.416, № 6. С.766-768.
28. *Смирнов В.И.* Особенности применения структурного критерия хрупкой прочности // Вестник СПбГУ, Сер.1, 2008. Вып.1. С.126-134.

Исследования автора на различных этапах работы поддерживались грантами РФФИ, Минобразования РФ, программами РАН, контрактами с производственными предприятиями. Значительный объем работы выполнен в научно-исследовательском центре «Динамика» (СПбГУ-ИПМаш РАН).

Лицензия № 020593 от 07.08.97

Подписано к печати 00.12.2008. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2.25. Тираж 150. Заказ 000х.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Цифровом типографском Центре
Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: 552-75-26
Тел./факс: 297-57-76

ДЛЯ ЗАМЕТОК
