

УДК 622.023.23

О СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОМ ПОДХОДЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Н.Ф. МОРОЗОВ, Ю.В. ПЕТРОВ, А.А. УТКИН

Многие способы моделирования эффектов динамического разрушения связывают их непосредственно с неупругой реологией и развитием микротрещин. Во многих случаях это неизбежная физическая необходимость. Но для практических целей очень важно располагать простым механическим подходом, позволяющим сводить анализ динамического разрушения к простой "индустриальной" процедуре. Поэтому окончательный отказ от традиционных классических схем энергетического баланса и силовой механики разрушения в пользу сложной реологии и микрофизики был бы преждевременным. Даже в рамках линейной упругости и хрупкого разрушения эти схемы не являются завершенными. Их дальнейшее развитие может дать достаточно простое качественное объяснение многих особенностей быстрого разрушения. Анализ экспериментов показывает, что основные противоречия с традиционными моделями проявляются тогда, когда разрушение происходит через весьма малые промежутки времени после начала нагружения. Это соответствует высоким скоростям приложения нагрузки. Само же разрушение сопровождается высокими локальными скоростями деформирования и в процессах откола, и в процессах старта и быстрого движения трещин. Противоречия опыта с теорией возникают из-за того, что применяемые для анализа модели разрушения остаются, по существу, квазистатическими. При этом в модельном механизме разрушения не учитывается, что при высокоскоростном разрыве материала наряду с упругим сопротивлением необходимо преодолевать также и инерцию среды. Так, в приложениях уравнения энергетического баланса к динамическому разрушению [7,10] слагаемое, соответствующее кинетической энергии, традиционно отбрасывается как малое по сравнению с остальными. Ясно, что в случае высокоскоростного деформирования такой прием не является корректным. Соответствующий такому подходу силовой критерий формулируется как требование достижения коэффициентом интенсивности критического значения, которое определяется лишь свойствами материала. Физическое несовершенство такого критерия заключается в том, что в соответствии с ним материал должен разрушаться при достаточно большом мгновенном значении действующей в вершине трещины локальной силы, тогда как, учитывая значительное количество движения хотя и малых, но очень

быстро движущихся частиц среды, необходим достаточный промежуток времени ее действия.

Еще один путь развития классических моделей состоит в рассмотрении структурных характеристик процесса разрушения. Необходимость учета структурных параметров процесса сейчас уже не подвергается сомнению, так как за нее свидетельствуют практически все эксперименты. Вопрос лишь в том, какие характеристики микроструктурных физических процессов должны быть введены в макромеханику разрушения. Однако это весьма сложное и тонкое дело, связанное с опасностью выйти за пределы разумной достаточности. Наиболее естественным представляется поиск таких параметров структуры, которые, как и размер Нейбера - Новожилова [3,6] в квазистатике, носят универсальный характер и не связаны однозначной физической трактовкой.

Структурно-временной критерий динамического разрушения. Согласно Г. Нейберу [3] и В. В. Новожилову [6], структуру материала необходимо учитывать явно и непосредственно с помощью критерия, заключающегося в том, что усредненное по структурному размеру d максимальное растягивающее напряжение должно достигать прочности материала σ_c . В случае корневой асимптотики напряжений критерий однозначно связывает структурный размер d со значениями критического коэффициента интенсивности в статике K_{Ic} и σ_c . Важнейшим достоинством этого критерия является его применимость в таких ситуациях, когда энергетический баланс и соответствующая корневая асимптотика не работают: расчеты и в этом случае хорошо подтверждаются экспериментом [1].

Другой важный принцип моделирования был предложен В. С. Васильоровским [4] при анализе задач откола. Он состоит в прямом учете истории локального разрывающего напряжения. Соответствующий временной критерий имеет смысл достижения полным интегралом по времени от локального растягивающего напряжения, т.е. полным локальным силовым импульсом, некоторой критической величины, которая должна быть определена экспериментально. Этот критерий был создан специально для изучения разрушения, вызываемого очень короткими импульсами нагрузки, и очень плохо приспособлен к описанию квазистатической ситуации. Кроме того, он применим лишь к разрушению в "бездефектных" материалах. Однако он является важным шагом вперед, так как учитывает историю нагружения непосредственно через механизм разрушения.

Важные положения были высказаны в работе Д. Локи и Е. Кальтхофа [11]. Анализируя опыты по динамическому разрушению образцов с макротрещинами, они предположили, что для каждого материала существует некоторое структурное время, управляющее процессом быстрого разрушения, который определяется интегральным поведением коэффициента интенсивности на структурном временном интервале.

Совместное развитие перечисленных идей может дать следующую достаточно простую механическую концепцию динамического разрушения.

Обращаясь к силовому подходу в механике разрушения, заметим, что он имеет смысл достижения критического значения мгновенной локальной силой, действующей в вершине трещины. Однако в динамике следует учитывать свойст-

во инерции, так как маленькие частички среды, примыкающие к месту разрыва, могут двигаться очень быстро. Поэтому для того, чтобы произвести разрушение, локальная сила должна действовать в течение определенного времени. С другой стороны, по аналогии со структурным размером в статике, в динамике естественно рассматривать структурные времена. В простейшем случае, если имеется структурный размер d и максимальная скорость волн c , то отношение d/c будет представлять собой структурное время передачи взаимодействия между соседними элементами структуры. Естественно рассматривать на структурно-временном интервале средние значения от разрывающего напряжения. Будем считать, что разрушение происходит, если

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

где τ - структурное время, определенное для каждого материала. Критерий (I) может быть записан в форме $J > J_c = \sigma_c \tau d$. Это произведение имеет смысл критического структурного импульса и учитывает инерцию среды непосредственно в механизме разрушения. Временем разрушения t_* естественно считать момент достижения структурным импульсом критического значения $J(t_*) = J_c$.

При определении предельных значений параметров нагрузки, соответствующих наименьшим затратам на разрушение, важную роль играет условие совпадения времени разрушения с моментом максимума структурного импульса. Соответствующий порог разрушения определим из соотношения

$$J(t_*) = \max_t J(t) = J_c, \quad (2)$$

которое в этом случае может рассматриваться как условие оптимальности. Можно принять $\tau = d/c$ [2, 8], однако в общем случае параметры d и τ следует рассматривать как независимые, так как τ зависит от сложных процессов в структуре материала.

В отличие от энергетического баланса, критерий (I) может применяться в случаях, которые не сопровождаются корневой асимптотикой напряжений. Это весьма важно для очень быстрого разрушения, ибо динамическое напряженное состояние у вершины трещины во время, близкое к моменту взаимодействия волны нагрузки с вершиной, не описывается главным членом корневой асимптотики [2, 8, 12]. В случае медленного деформирования осреднение по времени несущественно и из формулы (I) получится квазистатический критерий В.В. Новожилова [6]. С другой стороны, в материалах без специально устроенных острых макродефектов типа трещин внутренний интеграл может быть опущен, так как структурный размер d будет намного меньше характерного масштаба изменения поля напряжений. Тогда получим условие разрыва, которое может быть использовано, например, для анализа откольного разрушения в "бездефектных" телах. Таким образом, возможен единый подход к разрушению вершины трещины и откольному разрушению.

О т к о л ь н о е р а з р у ш е н и е. При анализе разрушения "бездефектных" сред структурно-временной критерий принимает следующую форму:

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(S) dS \geq \sigma_c \tau. \quad (3)$$

Для определенности положим $\tau = a/c$ (здесь c - максимальная скорость распространения упругой волны) и рассмотрим классическую одномерную задачу откола [5].

Первые попытки анализа откола были связаны с применением критерия критического напряжения: $\sigma \geq \sigma_c$. Однако необходимость трактовки ряда наблюдаемых в опыте явлений: динамической ветви временной зависимости прочности и протяженных кавитационных зон - привела к временному критерию [2], анализ которого дан в работе [5].

Условие (3) отличается от временного критерия наличием структурной характеристики разрушения τ . Рассмотрим отражение треугольного импульса сжимающей нагрузки от свободного конца полубесконечного стержня. Ось Ox направлена вдоль стержня, который располагается справа от нуля ($x > 0$). Падающий импульс записывается в виде

$$\sigma_- = -P \left(1 - \frac{ct+x}{cT} \right) [H(ct+x) - H(ct+x-cT)],$$

где P - амплитуда импульса; T - его продолжительность; $H(t)$ - функция Хевисайда. Здесь участок нарастания нагрузки отсутствует.

Отраженный от свободного конца профиль напряжения

$$\sigma_+ = P \left(1 - \frac{ct-x}{cT} \right) [H(ct-x) - H(ct-x-cT)].$$

Суммарное напряжение $\sigma = \sigma_- + \sigma_+$. Фиксируя T и предполагая, что в формуле (3) выполняется равенство, определим соответствующую заданной продолжительности T минимальную разрушающую амплитуду P_* (динамическую "прочность") и время разрушения t_* . После преобразований получим

$$\bar{t}_* = \begin{cases} 1/[4(1-\sigma_c/P_*)] + 1, & 1 < P_*/\sigma_c \leq 2; \\ 1 + \sigma_c/P_*, & P_*/\sigma_c \geq 2, \end{cases} \quad (4)$$

где $\bar{t}_* = t_*/\tau$ - нормированное время до разрушения, определяемое как момент достижения интегралом из формулы (3) критического значения.

Полученное соответствие между временем разрушения t_* и пороговой амплитудой P_* (рис.1) называется временной зависимостью прочности [5]. С точки зрения этой зависимости критерий критического напряжения и временной подход В.С.Никифоровского [4] находятся "на разных полусах". Критерий критического напряжения хорошо описывает квазистатическое разрушение, вызываемое длительными волновыми импульсами. Но эксперименты показывают, что и при кратковременных нагружениях появляется слабая зависимость времени разрушения от пороговой амплитуды с некоторой асимптотой. Этот эффект получил название явления динамической ветви временной зависимости

прочности. Явление динамической ветви получает объяснение в рамках временного критерия [4], который дает такую зависимость для кратковременных нагрузок. Однако в квазистатическом случае он уже не работает; положение динамической ветви и ее стыковка с квазистатикой остаются неопределенными. Критерий критического напряжения и временной критерий, таким образом, описывают лишь предельные концы временной зависимости прочности. Введение же структурного элемента позволяет построить единую кривую временной зависимости прочности, в которой статическая и динамическая ветви соединены плавным переходом. Понятен и физический смысл горизонтальной асимптоты: в рамках принятого допущения ($\tau = d/c$) она соответствует времени передачи взаимодействия между элементами структуры. Для алюминиевого сплава Д20 рассчитанное $\tau = 10^{-6}$ с, что вполне соответствует экспериментам. Как показывает расчет, разрушение в сечении откола происходит с задержкой, т.е. после прохождения пика локального растягивающего напряжения.

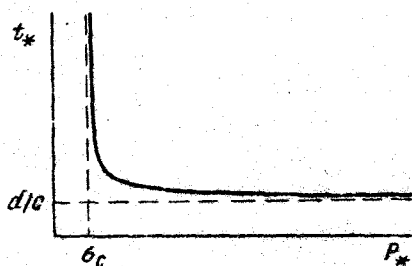


Рис.1. Временная зависимость прочности при отколе

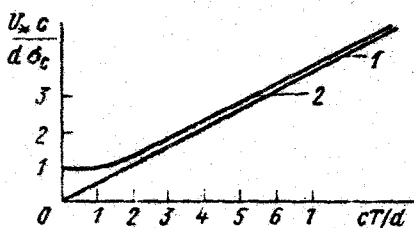


Рис.2. Пороговые импульсы разрушения в задаче откола

Порог разрушения, т.е. зависимость минимального разрушающего импульса U от его продолжительности, рассчитанная по критерию критического напряжения, представляет собой прямую, проходящую через начало координат (рис.2, кривая 1). Следовательно, область разрушения на плоскости (T, U) в этом случае примыкает к началу координат. Это означает, что даже бесконечно малые силовые импульсы способны вызвать разрушение. Это абсурдно, и применять критерий критического напряжения для анализа разрушения при кратковременном нагружении нельзя. Временной подход В.С.Никифоровского позволяет преодолеть это противоречие и дает конечное пороговое значение импульса малой длительности. Структурно-импульсный критерий дает единую пороговую кривую (рис.2, кривая 2), пригодную для всего диапазона времени нагружения. В пределе, для очень коротких и очень длинных импульсов, он соответствует квазистатическому и временному критериям.

Чрезвычайно интересным объектом изучения является зона разрушения при отколе. Классические подходы не дают здесь адекватной картины. Так, по критерию критического напряжения зона разрушения может иметь вид последовательно чередующихся откольных сечений. По временному критерию [4] разрушение непрерывно в области, которая может иметь конечное протяжение и называется зоной непрерывного дробления [5]. Реальная же картина имеет черты

и первого, и второго вариантов. Согласно работе [9] область разрушения имеет вид раздробленных участков, чередующихся с неразрушенными перемычками, т.е. зона непрерывного дробления на деле непрерывной не является. То же можно сказать и о разрушенной пластинке в другом эксперименте [15]. Зам.тим, что качественный вид области разрушения сильно зависит от параметров внешнего импульса: скорости нагружения, амплитуды, продолжительности.

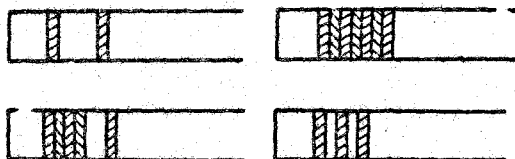


Рис.3. Варианты расчетной зоны разрушения при воздействии трапецидального импульса нагрузки

Структурно-временной критерий позволяет смоделировать динамику зоны разрушения. Предположим, что выполнение критерия приводит к разрушению слоя структурных элементов в сечении стержня. Расчеты показали, что только на одиночном трапецидальном импульсе можно реализовать разные варианты зоны разрушения (рис.3).

Характер этих зон может существенно меняться при изменении скорости нарастания, амплитуды, продолжительности и скорости убывания внешней нагрузки, что вполне согласуется с экспериментальными наблюдениями.

Разрушение у вершин трещины. Рассмотрим неограниченную упругую плоскость с прямолинейной полубесконечной трещиной $x \leq 0, y = 0$, к берегам которой прикладывается прямоугольный импульс нагрузки $\sigma_y = P[H(t) - H(t-T)]$ амплитудой P и продолжительностью T . Соответствующее асимптотическое выражение для максимального растягивающего напряжения на продолжении трещины хорошо известно:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= K(t) / \sqrt{2\pi x} + O(1), \quad x \rightarrow 0, \quad x \ll c_1 t; \\ K(t) &= P \varphi(c_1, c_2) f(t); \quad f(t) = \sqrt{t} H(t) - \sqrt{t-T} H(t-T); \\ \varphi(c_1, c_2) &= 4c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (c_1 \sqrt{\pi c_1}), \end{aligned} \quad (5)$$

где c_1 и c_2 - скорости продольной и поперечной волн.

Здесь следует иметь в виду, что асимптотическая оценка (5) не является равномерной и на временном интервале $t \sim x/c_1$ поле напряжений не описывается главным членом корневой асимптотики. Поэтому будем считать, что разрыв среды происходит на протяжении времени, существенно большем, чем x/c_1 , где $x \sim d$ - расстояние, на которых в соответствии с формулой (1) анализируется поле напряжений.

Определим пороговую зависимость минимального разрушающего импульса ($U = PT$) как функцию от его продолжительности $U = U_*(T)$, подставив решения (5) в условие (2). Тогда (рис.4, кривая I)

$$U_* = \frac{\tau K_c T}{\varphi(c_1, c_2) \max \int_{t_*}^T f(s) ds}, \quad (6)$$

где $K_c = \sqrt{\pi/2} \sigma_c \sqrt{d}$ - критический коэффициент интенсивности в статике.

Вычисления показывают, что разрушение, вызванное пороговым импульсом U_* для заданной продолжительности T , характеризуется задержкой, т.е. соответствующее время разрушения t_* всегда больше, чем время максимума коэффициента интенсивности T . Это происходит из-за того, что время максимума структурного импульса не совпадает с временем максимума T локальной силы, действующей в вершине трещины: $t_* > T$. В нашем случае $t_* = T + D$, где $D = 1/3 (\tau - T + 2\sqrt{\tau^2 + T^2} - \tau T)$.

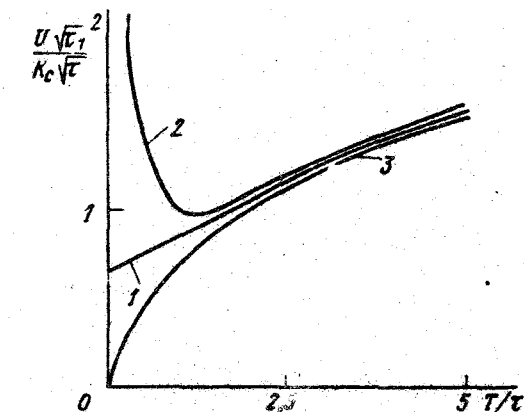


Рис.4. Пороговые импульсы нагрузки при инициировании роста трещины

1 - $U = U_*(T)$; 2 - $U = U^*(T)$; 3 - $\max K(t) = K_c$

При $T \rightarrow 0$ время разрушения стремится к структурной характеристике: $t_* \rightarrow T$. Следовательно, при $T \rightarrow 0$ имеет место слабая зависимость времени до разрушения от амплитуды начального импульса, что аналогично явлению динамической ветви при отколе.

Рассмотрим минимальный разрушающий импульс U_* , соответствующий продолжительности T . Увеличив немного его амплитуду, можно уменьшить задержку разрушения. Оказывается, для заданной продолжительности T существует максимальный разрушающий импульс $U = U^*(T)$, для которого $D = 0$ (рис.4, кривая 2). Таким образом, разрушение импульсом U^* отвечает случаю, когда приложенная нагрузка держится вплоть до момента разрыва $t^* = T$, а время разрушения отождествляется с продолжительностью внешнего импульса. Если же $U(T) > U^*$, то разрушение будет происходить уже за время, меньшее чем T , т.е. прежде, чем закончится действие импульса. Область между кривыми 1 и 2 (рис.4) включает возможные значения разрушающих импульсов различной продолжительности. Существенно, что эта область отделена от нуля.

Заметим, что если кривую порога разрушения $U = U_*(T)$ рассчитывать традиционным способом при помощи зависящего только от свойств материала критического коэффициента интенсивности напряжений: $\max K(t) = K_c$ (рис.4, кривая 3), то на плоскости (T, U) появится "область разрушения", прилегающая к началу координат. Это противоречит здравому смыслу, так как бесконечно малые импульсы не могут приводить к инициированию роста трещины.

Пусть $K_g = K(t^*)$ — значение коэффициента интенсивности, соответствующее импульсу U^* и времени разрушения t^* . Применяя структурно-временной критерий к решению (5), найдем

$$\frac{K_g}{K_c} = \frac{3}{2} \frac{(t^*/\tau)^{1/2}}{(t^*/\tau)^{3/2} - (t^*/\tau - 1)^{3/2}} \quad (7)$$

Здесь значения степенных функций при отрицательных значениях их аргументов считаются равными нулю. Зависимость (7) показывает, что с уменьшением времени до разрушения критический коэффициент интенсивности растет и может существенно превышать свое квазистатическое значение (рис.5). Аналогичное явление фиксируется экспериментами по динамическому инициированию роста трещин [14].

Как следует из формулы (7), связь между K_g/K_c и t^*/τ в принципе не зависит от свойств материала. Для того, чтобы перестроить ее для реальных размерных координат, необходимо иметь лишь две постоянные для данного материала характеристики разрушения: квазистатический параметр K_c и специальный динамический параметр τ . Таким образом, связь между критическим коэффициентом интенсивности и временем разрушения в хрупких телах не является функцией материала. В рамках применяемого упругохрупкого подхода она рассматривается как расчетная характеристика.

Сравнение с экспериментами по инициированию роста трещин показывает, что динамический параметр разрушения τ не может быть выражен через квазистатическую структурную характеристику d . По-видимому, величина τ определяется сложными процессами, протекающими в специальной зоне у вершины трещины, где имеет место множественное микроразрушение материала. Однако главной мерой этих процессов является некоторый параметр размерности времени, который и управляет макроразрушением материала. Его физический смысл пока неясен, но, вероятно, он как-то связан с характерным временем релаксации от микроразрушений у вершины трещины. Сопоставление с экспериментами [13] показывает, что введенная структурная временная характеристика по порядку величины хорошо совпадает с минимальными временными отрезками в концепции [11]. Однако для выявления ее реального физического содержания необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

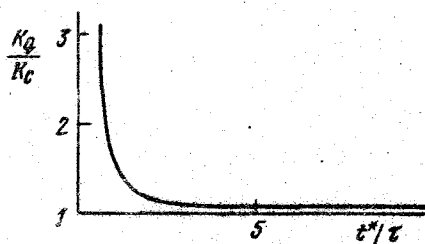


Рис.5. Зависимость критического коэффициента интенсивности от времени до разрушения

Однако для выявления ее реального физического содержания необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

ВЫВОДЫ

1. Предложен структурно-временной критерий, позволяющий изучать процессы быстрого разрыва материалов в рамках упругохрупкого подхода. Этот

критерий позволяет с единой точки зрения исследовать процесс откольного разрушения и инициирование роста макротрещин.

2. Построенная единая диаграмма временной зависимости прочности является фундаментальной характеристикой откольного разрушения. Дано простое объяснение явлению динамической ветви. Показано, что динамическая прочность хрупких тел может рассматриваться как расчетная характеристика.

3. Показано, что в рамках предложенного подхода зависимость критического коэффициента интенсивности инициирования от времени до разрушения не является функцией материала и может быть легко вычислена, если известен структурный динамический параметр разрушения τ и зависимость коэффициента интенсивности напряжений от времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.
2. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. О разрушении у вершины трещины при ударном нагружении // Физико-химическая механика материалов. 1988. № 4.
3. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М.: ОГИЗ, 1947.
4. Никифоровский В.С. О кинетическом характере хрупкого разрушения твердых тел // Прикладная математика и теоретическая физика. 1976. № 5.
5. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.
6. Новожилов В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // Прикладная математика и механика. 1969. Т. 33. № 2.
7. Партов В.З., Борисковский В.Г. Динамическая механика разрушения. М.: Машиностроение, 1985.
8. Петров Ю.В., Уткин А.А. О зависимости динамической прочности от скорости нагружения // Физико-химическая механика материалов. 1989. № 2.
9. Broberg K. B. Some aspects of the mechanism of scabbing // Stress Wave propagat. Mater. N.—Y.—L. 1959. Interscience. 1960.
10. Freund L. B. The analysis of elastodynamic crack tip stress fields // In: S. Nemat-nasser (Ed.) Mechanics Today. V.3. Pergamon Press. New-York, 1976.
11. Kalthoff J. F. and Shockey D. A. Instability of cracks under impulse loads // Journal of Applied Physics. 1977. V.48. № 3.
12. Ma C. C. and Freund L. B. The extent of the stress intensity factor during crack growth under dynamic loading conditions // ASME Journal of Applied Mechanics. 1986. V. 53.
13. Homma H., Shockey D. A. and Hada S. Minimum time criterion for crack instability in structural materials // In: Fracture Mechanics: Seventeenth. Volume. ASTM. Philadelphia, 1986.
14. Ravi-Chandar K. and Knauss W. G. An experimental investigation into dynamic fracture: 1. Crack initiation and arrest // Int. J. Fract. 1984. V. 25.
15. Seaman L., Curran D. R., Murri W. J. A continuum model for dynamic tensile microfracture and fragmentation // J. of Applied Mechanics. 1985. V. 52.