

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

к.т.н. Ревва В.Н., асп. Беспавлов К. В. (Институт физики горных процессов
НАН Украины)

В данной работе сделана попытка проанализировать те задачи и методы динамической механики разрушения, которые могут быть использованы при описании разрушения горных пород.

Механика разрушения является самостоятельным разделом механики деформируемого твердого тела. Исследования по этой дисциплине важны для технологий, где необходимо управляемое разрушение - при разработке горных месторождений, бурении скважин, резании металлов и т.д.

Для решения задач в механике разрушения разработаны различные модели, аналитические и численные методы решения задач для тел со стационарными и распространяющимися дефектами в рамках теорий упругости, пластичности, вязкоупругости, а также теорий, описывающих поведение нелинейных сред. Успехи в практическом применении механики разрушения относятся прежде всего к теории квазистатических трещин. Что же касается динамической механики разрушения, которая исследует стабильность стационарных трещин под действием динамических нагрузок и процессы распространения трещины, то здесь теоретические достижения пока недостаточно подтверждаются экспериментами и практическими рекомендациями. Это объясняется, прежде всего, чрезвычайной сложностью описания динамики разрушения, а также сложившейся диспропорцией между развитием теоретических и экспериментальных методов, что связано со сложностью проведения экспериментов и с тем, что аналитические решения строятся для бесконечных областей, а эксперименты проводятся на образцах конечных размеров, поэтому сравнение результатов возможно только до начала взаимодействия отраженных от границ образца волн напряжений с вершиной трещины, т. е. в очень короткий промежуток времени.

Длительное время прогресс в динамической механике основывался на решении модельных задач в идеализированных постановках, основанных на идеях Гриффитса, Ирвина, Папаясюка и других [1], методами математической теории упругости и численными методами [2]. При этом вопросы соответствия идеализированных постановок реальным условиям динамического разрушения и экспериментального подтверждения теоретических результатов оставались открытыми. К примеру, установленное в рамках идеализированной модели соотношение соответствия между скоростью распространения трещины и коэффициентом интенсивности напряжений не всегда подтверждается в экспериментах [3, 4, 5].

Основной объект исследования динамической механики разрушения в

рамках идеализированной модели хрупкого разрушения - это рост прямолинейной трещины в упругой плоскости. При этом в вершине трещины возникают напряжения, которые описываются коэффициентами интенсивности.

Процесс разрушения предполагается происходящим непосредственно в самой вершине трещины. Кроме того, предполагается, что расход энергии на образование единицы новой поверхности является константой для данного материала. Исходя из этого, рассчитывается упругодинамическое поле напряжений в вершине трещины и формулируется критерий распространения трещины в виде уравнения энергетического баланса. Поля напряжений в вершине трещины определяются в виде суперпозиции собственных функций по степеням расстояния от вершины трещины, при этом представляют интерес не только главные члены разложений, но и члены высших порядков. Последние особенно важны при построении высокоточных сингулярных конечных элементов и при обработке экспериментальных результатов по картинам изохорм в методе фотоупругости [6], кроме того, они входят в формулировки некоторых критериев отклонения трещины от прямолинейной траектории и ветвления [7].

Применение критериев разрушения становится возможным после решения соответствующих задач эластодинамики для распространяющихся или стационарных трещин. В результате определяются зависимости коэффициентов интенсивности напряжений от частоты (в случае гармонического нагружения), времени (при ударном нагружении) и скорости трещины (при ее распространении). Эти зависимости, найденные аналитическими методами в случае идеализированных постановок задач, дают представления об основных чертах распространения фронта разрушения, условиях, предшествующих разрушению, а также служат для тарировки численных и экспериментальных методов. Действительно, поле напряжений в образце конечного размера с трещиной в начальный период времени (от момента приложения нагрузки до начала взаимодействия вершины трещины с отраженными от границ волнами напряжений) совпадает с тем, которое реализуется в бесконечной плоскости при аналогичном нагружении.

При решении практических задач численные методы динамической механики приобретают особую актуальность. Среди них следует отметить методы граничных интегральных уравнений [8], сингулярных конечных элементов [9], весовых функций и другие. В настоящее время использование этих методов получило широкое распространение, с их помощью решено большое количество прикладных задач. К примеру, в работе [10] описано использование метода конечных элементов для численного моделирования стабильного роста двумерной трещины типа I. Для этого разработана специальная модель, названная "моделью с движущимся узлом в вершине", в которой узел свободно движется в пределах одного элемента. В работе [11] рассматриваются краевые задачи для многомерных уравнений Пуассона и Гельмгольца, а также системы дифференциальных уравнений. Получены интегральные представления решений, позволяющие строить граничные интегральные уравнения для ограниченных областей с трещинами. Изучена

задача о трещине на границе двух сред. В работе [12] на ряде примеров демонстрируется эффективность метода граничных элементов при решении нестационарных задач механики трещин. Интегральные уравнения метода включают интегралы по пространственным координатам и по времени, соответствующие ядра интегральных операторов в рассматриваемом случае плоской задачи выписываются в явном виде. При дискретизации границы области используются квадратные элементы, в окрестности вершины трещины вводятся специальные элементы, обеспечивающие нужный порядок асимптотики по перемещениям и напряжениям. Результаты вычислений коэффициента интенсивности напряжений в условиях динамического нагружения находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными другими методами (например, конечных разностей, конечных элементов). В качестве примеров рассматриваются задачи о центральной трещине в прямоугольной пластине; о краевых радиальных трещинах в цилиндрической трубе, нагруженной внутренним давлением; о краевой наклонной трещине в прямоугольной пластине; о центральной трещине в пластине из композитного материала.

Важной частью динамической механики разрушения являются экспериментальные методы. Среди них можно выделить оптические методы исследования напряженного состояния вблизи вершины трещины, такие как метод фотоупругости, основанный на анализе картин изохром, получающихся при прохождении света через оптически чувствительный материал, метод теневых зон (каустик) и метод проецирования на фокальную плоскость, основанные на преобразовании сингулярности напряжений в оптическую сингулярность. Для определения коэффициентов интенсивности напряжений анализируется размер сингулярной (теневого) зоны или интенсивность света в сингулярной точке на фокальной плоскости.

Метод фотоупругости - широко применяющийся оптический экспериментальный метод исследования напряженного состояния, в котором используется искусственная оптическая анизотропия, возникающая в прозрачных диэлектриках при приложении нагрузки. В отличие, например, от метода каустик, который применяется только для исследования напряженного состояния тел с трещинами, метод фотоупругости имеет значительно более широкий диапазон применения. Впервые применение этого метода к задачам динамической механики разрушения было продемонстрировано в работе [13]. Метод фотоупругости является весьма эффективным для исследования задач хрупкого разрушения, т. к. он позволяет получать одновременно информацию как о пути и скорости распространения трещины, так и о напряженно-деформированном состоянии в окрестности вершины трещины. В работах [14, 15, 16, 17, 18] представлены исследования динамики трещин методом фотоупругости, проведенные в МИСИ им. Куйбышева. Исследования проводились на оптически чувствительных образцах из эпоксидной смолы и полиметилметакрилата.

Весьма популярным и эффективным является упомянутый ранее метод [19]. Метод может применяться с использованием проходящего света

для прозрачных материалов и отраженного для непрозрачных. В случае использования прозрачного материала метод каустик еще называют методом проходящих каустик, в отличие от метода отраженных каустик в случае непрозрачного материала. Последний имеет ряд преимуществ, так как он может применяться и к металлам. Кроме того, каустики, сформированные проходящим светом, имеют малый размер В то же время для отраженных каустик можно добиться любого увеличения.

Рассмотренные методы имеют ряд недостатков. Одним из них является то, что в них фиксация напряженного состояния возможна лишь в дискретных точках, а это требует применения высоко скоростной регистрирующей аппаратуры. В работе [20] предложен оптический метод определения коэффициентов интенсивности напряжений в режиме реального времени при помощи одного стационарного фотодетектора, причем в результате получается непрерывная зависимость коэффициента интенсивности от времени. Этот метод основан на теории преобразований на фокальную плоскость.

В связи со значительными сложностями проведения динамических исследований отдельными авторами делаются попытки разработки альтернативных методов определения динамических характеристик. Так в работе [21] рассматриваются корреляционные методы определения динамических характеристик материала на основе соответствующих им статических. В работе [22] излагаются основы теории, базирующейся на эксперименте и синтезе новой, разрабатываемой авторами статистической теории прочности, деформации и разрушения неоднородных сред и кинетической концепции прочности и деформации твердых тел развиваемой школой С. Н. Журкова. Синтез указанных двух концепций позволил одновременно учитывать влияние таких факторов как вид напряженного состояния, величину давления, время действия нагрузки, скорость деформации и температура на прочность, деформации и разрушение неоднородных твердых тел и горных пород.

В последнее время в динамической механике разрушения находит применение теория фрактальных множеств. Так в статье [23] сделана попытка учесть влияние нерегулярной структуры поверхности реальной трещины при описании процессов разрушения. Поверхность моделируется при помощи фрактального множества дробной размерности. С использованием самоподобия фрактала предлагается иерархический процесс переноса с масштаба на масштаб упругой энергии, высвобождающейся при продвижении носика трещины. Анализ этого процесса позволяет получить асимптотические выражения для описания поведений напряжений и перемещений в окрестности вершины трещины. Автор показывает, что фрактальная геометрия трещины приводит к изменению сингулярного поведения полей напряжений в вершине трещины и возникновению аномального размернозависимого множителя в выражении для определения коэффициента интенсивности напряжений. Аналогичные результаты получены и для ветвящихся фрактальных трещин. Анализируется распространение фрактальной трещины в хрупком материале с позиций критерия Гриффитса. В работе [24] предложена фрактальная модель распада

упругих полей при распространении трещин, основанная на представлении об иерархическом строении разрушенной зоны и самоподобия процессов множественного разрушения. На основе этой модели исследован вопрос об асимптотиках упругих полей в вершине трещины в гранулярной среде. Рассматривается каскад разломов и трещин в очаге разрушения как фрактальный кластер, описан процесс излучения энергии из очага землетрясения. Получена скейлинговая связь между сейсмической энергией и характерным размером очага землетрясения, обобщающая формулу М. А. Садовского. Описано динамическое поведение трещины с учетом фрактального характера распада упругих полей в ее вершине.

В современном состоянии динамическая механика разрушения еще далека от завершения. Остается много открытых вопросов и неразрешенных противоречий. Одновременно с этим ясно, что эта теория становится все более актуальной. Это подтверждается постоянно увеличивающимся количеством работ в этой области, применением современных математических теорий и разработкой новых методов исследований. Предмет динамической механики разрушения значительно шире, чем квазистатической. Динамические методы позволяют получить более точные данные о процессах, происходящих в различных телах и конструкциях под нагрузкой. Например, в работе [25] отмечается, что амплитуда импульса напряжения, необходимого для разрушения горной породы, может быть значительно выше, чем квазистатически замеренный предел прочности на растяжение, если продолжительность импульса настолько короткая, что его энергия менее критической, необходимой для возбуждения разрушения породы.

Приведенный краткий обзор показывает, что на современном уровне использование динамической механики разрушения позволит расширить диапазон задач о предельном состоянии горных пород по сравнению с апробированным квазистатическим подходом.

Авторы выражают благодарность докт. техн. наук, профессору Алексею А. Д. за ценные советы и замечания при подборе материала для написания статьи [26, 27]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разрушение: В 7 т. / Под редакцией Г. Либовица. М.: Мир, 1973-1976. Т. 1-7.
2. Портоп В. З. Борисковский В. Г. Динамическая механика разрушения. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
3. Knauss W. G., Ravi-Chandar K. Some basic problems in stress wave dominated fracture. *Int. J. of Fracture*. 1985. Vol. 27. N3-4. P. 127 – 144.
4. Ravi-Chandar K., Knauss W. G. Dynamic crack-tip stresses under stress wave loading – a comparison of theory and experiment. *Int. J. of Fracture*. 1982. Vol. 20. P. 209 – 222.
5. Ravi-Chandar K., Knauss W. G. An experimental investigation into dynamic fracture