

Двухуровневый критерий разрушения материалов

Ю. А. Костандов, И. Е. Шиповский

Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Украина

ipgd@yandex.ru

Предложены феноменологическая модель динамического разрушения твердого тела и двухуровневый критерий разрушения, учитывающий рост поврежденности материала при нагружении. В рамках модели упругопластического тела численным методом получены решения трехмерной задачи о динамическом разрушении горной породы при взаимодействии ее с резаком. Проведены расчеты развития разрушения в образце и построены временные зависимости усилия резания от применяемого критерия разрушения.

Ключевые слова: прочность, резание, критерий разрушения, поврежденность.

Оценка конструкционной прочности материалов и элементов конструкций, подверженных техногенным воздействиям, сопряжена с решением задач относительно их механического разрушения. Для решения этих задач необходимо систему уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние (НДС) материала, дополнить условием перехода материала в разрушенное состояние, т.е. критерием разрушения. Выбор критерия, с одной стороны, зависит, как правило, от особенностей рассматриваемой задачи, с другой – существенным образом определяет результат ее решения.

К наиболее известным в настоящее время критериям разрушения можно отнести энергетический критерий Гриффитса, силовые критерии Ирвина и Баренблатта, деформационные критерии Леонова–Панасюка–Дагдейла [1], а также критерий Черепанова–Райса [2]. При выполнении этих критериев материал мгновенно переходит в разрушенное состояние.

В связи с установлением явно выраженной зависимости протекания процесса разрушения от его временных характеристик были разработаны другие теории и критерии длительной прочности. Например, теория длительной прочности Ильюшина, флуктуационно-временная теория прочности Журкова [3], критерии Новожилова, Работнова и др. Суть подхода к проблеме разрушения состоит в изучении различных непрерывных распределений дефектов посредством введения функций, определяющих степень поврежденности среды. Указанные функции добавляются к традиционным характеристикам сплошной среды [1]. Учет накопления в материале малых рассеянных повреждений (микро-, субмикротрещины) приводит к введению соответствующих критериев разрушения: предельного уровня диссипации, предельной концентрации повреждений и др. [4].

В настоящей работе предлагаются феноменологическая модель динамического разрушения твердого тела и двухуровневый критерий разрушения, учитывающий рост поврежденности материала при нагружении.

Принято, что твердое тело состоит из определенных структурных элементов (блоки, зерна, кристаллы, макромолекулы и т.д.), содержащих рассеянные дефекты в виде межзеренных повреждений, микротрещин, микропор и т.п.

Микроразрушения образуются и развиваются в структурном элементе в результате действия растягивающих напряжений. Однако микроразрушение происходит только по достижении растягивающим напряжением σ_{11} определенного порога σ_r :

$$\sigma_{11} = \sigma_r, \quad (1)$$

а не при любом значении с соответствующей ему вероятностью (что отвечает, например, кинетической теории прочности) [3].

Разрушение каждого из структурных элементов происходит только в случае, если степень его поврежденности $N(t)$ в момент времени t достигнет определенного уровня N_c :

$$N(t) = N_c. \quad (2)$$

При этом рост поврежденности означает не только увеличение количества повреждений, т.е. образование новых (микроразрушения различных типов), но и размеров уже существующих. С увеличением поврежденности элемента материала необходимо, чтобы в этот элемент поступала соответствующая энергия, которую определим исходя из следующих рассуждений.

Ранее [5] при исследовании напряженно-деформированного состояния и энергетических потоков в трехмерной пластине с трещиной при импульсном растяжении показано, что вблизи трещины наблюдается нарушение однородности вдоль волновых фронтов НДС, плотности полной энергии W , а также баланса между кинетической и потенциальной энергией. В окрестности трещины возникают области, в которых отмечается увеличение и уменьшение значений энергии по сравнению с таковыми в аналогичном образце без трещины при идентичных условиях нагружения, т.е. образуются зона повышенных напряжений (ЗПН) и зона разгрузки (ЗР). При этом величина энергии dW , поступившей в ЗПН за время $d\tau$, пропорциональна $\sigma_{11}^2(\tau)$.

Исходя из вышеизложенного определим поврежденность элемента материала $N(t)$ в момент времени t как

$$N(t) = N_0 \int_{t_r}^t \frac{\sigma_{11}^2(\tau)}{\omega_0} d\tau, \quad (3)$$

где N_0 и ω_0 – постоянные материала, зависящие от его физико-механических свойств, причем ω_0 – энергетическая характеристика образования повреждений; t_r определяется из уравнения $\sigma_{11}(t_r) = \sigma_r$.

Таким образом, уравнения (1)–(3) описывают двухуровневый критерий разрушения. Отметим, что предложенный критерий разрушения является, по сути, энергетическим и из него следует существенная зависимость протекающего процесса разрушения от истории нагружения, т.е. амплитудно-временных параметров импульса напряжений.

Для изучения влияния применяемого критерия разрушения на формирование в образцах материалов НДС и развитие в них разрушения проведено исследование численным методом трехмерных процессов образования и развития во времени и пространстве зон разрушения при динамическом воздействии.

Несмотря на очевидную актуальность поставленной задачи, до настоящего времени она в полной мере не решена. Причина этого состоит в том, что решение таких задач даже в двухмерной постановке представляет значительную сложность.

Задача рассматривалась на примере воздействия абсолютно жесткого резца, движущегося на образец в виде прямоугольного параллелепипеда с заданной постоянной линейной скоростью $V_r = 0,5$ м/с. Ширина площадки взаимодействия резца с образцом в начальный момент времени равна 0,6 ширины образца. Образец упирается противоположной стороной в неподвижную абсолютно жесткую преграду. Материал образца представляет собой известняк плотностью $\rho_0 = 1,8$ г/см³, модулем сдвига $\mu_0 = 24,6$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,24$, пределом текучести $\sigma_t = 1,5$ МПа. Скорость распространения звука в известняке $c_0 = 3010$ м/с.

Для описания поведения нагружаемого образца использовалась модель сжимаемого изотропного упругопластического тела [6, 7]. Выбор модели процесса разрушения материала определен требованием адекватности описания физики процесса с учетом того, что модель должна допускать эффективную реализацию на ЭВМ средней мощности. Исходя из этого применялась имитационная модель разрушения эрозионного типа.

Численные расчеты НДС и развития разрушения в образцах проводились по методике, базирующейся на модифицированном методе конечных элементов (ММКЭ) [7]. Использование в качестве инструмента счета ММКЭ определено относительной, по сравнению с другими численными методами, экономичностью в трехмерном случае и способностью без затруднений описывать большие деформации и разрушение материалов.

Были проведены расчеты развития разрушения в образце при использовании критерия наибольших растягивающих напряжений $\sigma_{11} = \sigma_c$ и критерия, предложенного в данной работе.

Результат расчета развития разрушения при использовании критерия наибольших растягивающих напряжений при $\sigma_c = 0,15$ МПа приведен на рис. 1.

Видно, что в этом случае разрушаются лишь те элементы, которые непосредственно взаимодействуют с резцом или преградой. На других поверхностях и внутри образца разрушения не происходит. Сравнение с практически наблюдаемыми картинками разрушения показывает, что данный критерий разрушения дает результат, который не соответствует реальному процессу разрушения горной породы.

Использование в расчетах критерия накопления повреждений ($\sigma_r = 0,1$ МПа, $N_c = 10^{-6} N_0$) приводит к иной картине образования и развития зон разрушения (рис. 2). Как следует из результатов проведенных расчетов, вначале разрушаются элементы в области взаимодействия резца с образцом, затем в глубине образца, что приводит к возникновению как скола, так и

поврежденных областей, не находящихся в непосредственном взаимодействии с резцом. Таким образом, происходит отделение от образца некоторой его части. Следовательно, применение в расчетах данного критерия разрушения позволяет получить результат, который в большей степени соответствует реально протекающим процессам при инструментальном разрушении горной породы.

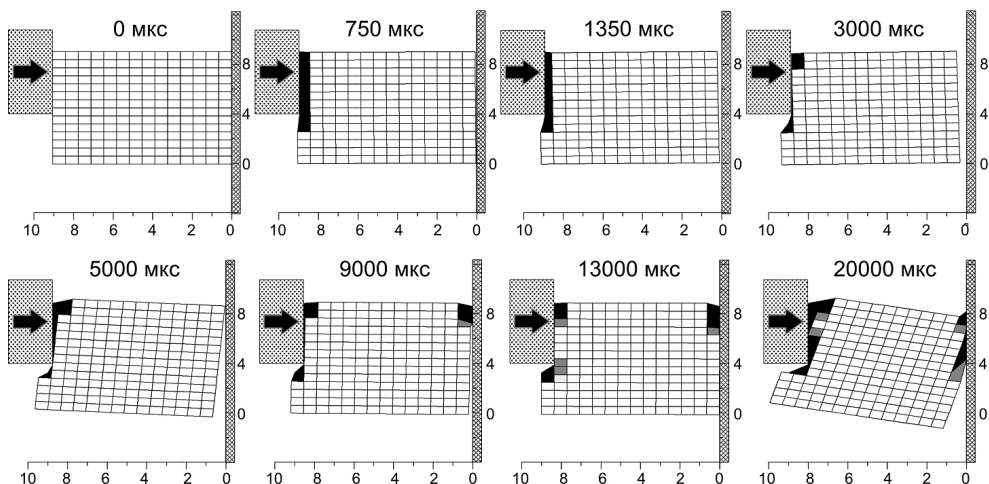


Рис. 1. Определение развития во времени разрушения в образце при использовании критерия наибольших растягивающих напряжений. (Здесь и на рис. 2: черным цветом обозначены полностью разрушенные блоки, белым – абсолютно целые, серым – блоки, содержащие разрушенные элементы: чем темнее цвет, тем больше разрушенных элементов содержит блок.)

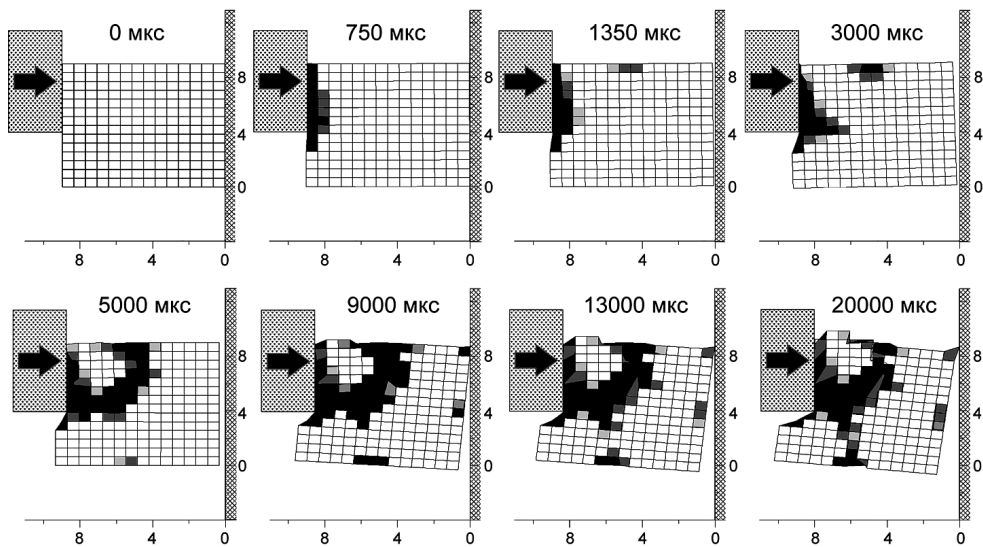


Рис. 2. Определение развития во времени разрушения в образце при использовании двух-уровневого критерия разрушения.

Зависимости силы, действующей на резец со стороны образца, т.е. усилия резания, от времени представлены на рис. 3. Видно, что без учета разрушения элементов среды усилие резания монотонно возрастает, в то

время как с его учетом усилие сначала увеличивается до определенного значения, при котором начинают разрушаться элементы среды, а затем уменьшается со скоростью, зависящей от выбранного критерия разрушения. При этом уменьшение усилия резания, соответствующее началу процесса разрушения, в случае использования двухуровневого критерия разрушения происходит заметно раньше, чем по критерию наибольших растягивающих напряжений.

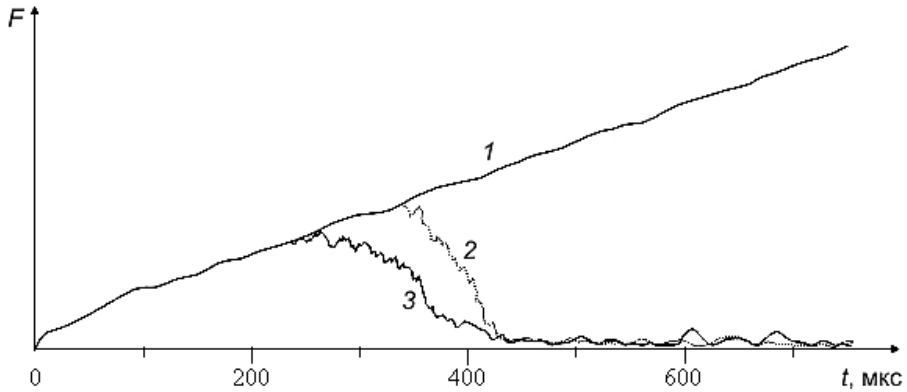


Рис. 3. Зависимость усилия резания от времени: 1 – без разрушения; 2 – критерий наибольших растягивающих напряжений; 3 – двухуровневый критерий разрушения.

Отметим, что результаты расчетов процесса разрушения при использовании двухуровневого критерия разрушения существенно зависят от значений σ_r и N_0 . Следовательно, определение этих величин возможно путем сопоставления результатов, получаемых экспериментально и численным методом.

Резюме

Запропоновано феноменологічну модель динамічного руйнування твердого тіла та дворівневий критерій руйнування, який урахує ріст пошкоженості матеріалу при навантаженні. У межах моделі пружно-пластичного тіла отримано числовим методом розв'язки тривимірної задачі про динамічне руйнування гірської породи при взаємодії її з різцем. Проведено розрахунки розвитку руйнування в зразку та побудовано часові залежності зусилля різання від використаного критерію руйнування.

1. Морозов Н. Ф. Математические вопросы теории трещин. – М.: Наука, 1984. – 256 с.
2. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. Бартенев Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
4. Каминский А. А., Гаврилов Д. А. Механика разрушения полимеров. – Киев: Наук. думка, 1988. – 224 с.

5. Костандов Ю. А., Рыжаков А. Н., Шиповский И. Е. Напряженно-деформированное состояние и энергетические потоки в пластине со стационарной трещиной при импульсном нагружении // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 128 – 139.
6. Костандов Ю. А., Локишина Л. Я., Шиповский И. Е. Задача о взаимодействии инструмента с породой в обобщенной упругопластической постановке // Динамические системы. – 2004. – Вып. 18. – С. 144 – 153.
7. Костандов Ю. А., Рыжаков А. Н., Федоркин С. И., Шиповский И. Е. Компьютерная оптимизация прочностных и геометрических характеристик стеновых блоков // Зб. наук. праць Крим. академії природоохоронного та курортного буд-ва. Сер. Будівництво, техногенна безпека. – 2001. – Вып. 5. – С. 71 – 81.

Поступила 20. 12. 2010