УДК 539.2

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОЭТАПНОГО ХАРАКТЕРА РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. На основе анализа уравнений баланса энергии и импульса, исследованы закономерности наступления отдельных этапов в развитии процесса разрушения твердого тела. Дано описание каждого из этапов, сформулированы условия, при которых возможна их реализация. Результаты исследования использованы для характеристики особенностей процесса разрушения в массивах горных пород.

Режим развития процессов разрушения, баланс энергии и импульса, поверхностная энергия, удельная внутренняя поверхность.

STUDY OF REGULARITIES OF THE STAGED NATURE OF THE DEVELOPMENT OF THE DESTRUCTION PROCESS

Belikov V.T., Ryvkin D.G. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Based on the analysis of the equations of energy and momentum balance, the regularities of the onset of individual stages in the development of the process of destruction of a solid are investigated. A description of each of the stages is given, conditions are formulated whereby their realization is possible. The results of the study were used to characterize the features of the fracture process in rock massifs.

Regime of development of destruction processes, momentum and energy balance, surface energy, specific internal surface.

Введение

Большинство исследователей в настоящее время сходятся во мнении, что разрушение представляет собой сложный многоступенчатый процесс, который начинается задолго до появления магистральных трещин, разделяющих твердое тело на части (Регель и др., 1974; Панин и др., 1985). При этом детальное изучение процесса разрушения показывает, что в его развитии можно выделить отдельные этапы (режимы), становление которых тесно связано с изменением напряженного-деформированного состояния твердого тела, а также характером временных изменений его структурных параметров. В связи с этим, возникает важная проблема, касающаяся изучения условий реализации различных режимов в развитии процесса разрушения. Возможность определять причины возникновения каждого из этапов, а также умение прогнозировать их наступление, позволит более полно исследовать и контролировать развитие процессов разрушения твердого тела. Характер протекания деструктивных процессов в различных материалах имеет свою специфику, связанную с особенностями их структуры. Поэтому актуальной в настоящее время становится задача изучения наиболее общих закономерностей, характеризующих наступление того или иного этапа развития процессов разрушения в различных средах, в том числе гетерогенных, каковыми являются горные породы. Эти закономерности могут быть исследованы на основе анализа уравнений, описывающих процессы разрушения с наиболее общих позиций. Такие уравнения могут быть получены в рамках континуального подхода, в соответствии с которым разрушающееся твердое тело рассматривается как гетерогенная среда, одной из фаз которой является трещиновато-пористое пространство (Беликов, Шестаков, 2008). В такой постановке объектом изучения будет не отдельная трещина, а вся область, где развиваются процессы разрушения. Указанная область будет характеризоваться такими изменяющимися структурными параметрами, как пористость и удельная внутренняя поверхность (УВП). Одним из основных соотношений при таком описании будет уравнение баланса энергии, включающее в себя и поверхностную энергию разрушающегося твердого тела. Для его анализа необходимо использовать информацию о временных изменениях структурных характеристик среды, которая может быть получена в результате количественной интерпретации экспериментальных данных по индикаторам процессов разрушения, таким как акустическая эмиссия (АЭ) и временные вариации концентрации радона (Беликов, Рывкин, 2015а; 2015б; Беликов, Шестаков, 2008). В таких областях как теория упругости, материаловедение и геофизика, одним из важнейших является вопрос об условиях возникновения, так называемого катастрофического режима развития процессов разрушения. В геофизике этот вопрос стоит особенно остро в связи с проблемой предсказания горных ударов и землетрясений. Существующие данные говорят о том, что процессы разрушения в геосреде происходят непрерывно, однако не всегда их развитие приводит к катастрофическим событиям. С этой точки зрения, при изучении причин возникновения того или иного этапа развития процессов разрушения и, в частности катастрофического, необходимо ответить на вопрос, как и при каких условиях он реализуется. Начиная с работ Гриффитса, условия развития трещины, и, в частности, причины ее неустойчивого распространения, обсуждались в литературе неоднократно (Griffith, 1920; Панин и др., 1985; Партон, Морозов, 1985; Партон, 1990). Однако попытка перенести эти результаты на всю область, где развиваются процессы разрушения, сталкивалась с большими трудностями. В рамках континуального описания процессов разрушения эти трудности отчасти можно преодолеть. При этом мы, с одной стороны, сможем более полно исследовать все механизмы, сопровождающие эти процессы, с другой, более четко сформулировать условия наступления каждого из этапов развития процесса разрушения.

Таким образом, целью настоящей работы является изучение условий реализации отдельных этапов в развитии процесса разрушения, в том числе анализ причин и закономерностей их возникновения. Результаты исследования использованы для характеристики специфических особенностей процесса разрушения в массивах горных пород.

Постановка задачи и основные уравнения

При описании процессов разрушения твердого тела будем рассматривать его как двухфазную гетерогенную среду, состоящую из твердой фазы – “1”, и газообразной (трещинной) фазы – “2”, представляющей собой пространство пор и трещин, в общем случае заполненное газообразным флюидом (Беликов, Рывкин, 2016). В то же время сам процесс разрушения будем трактовать как фазовый переход первого рода (Беликов, 1996; Беликов, Шестаков, 2008). Соотношение для баланса импульса единицы объема разрушающегося твердого тела, полученное суммированием соответствующих соотношений для каждой из фаз в пренебрежении диссипативными процессами, может быть записано в виде (Алейников и др., 1992; 1993; Беликов, Рывкин, 2016)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_i v_k - \sigma_{ik}) - \Delta\sigma_{ik}^{(12)}\tilde{n}_k^{(1)}\Omega_{12} - \\ - \frac{1}{V}\int\limits_{S_{12}} (\rho'_1 - \rho'_2) v_i'^{(1)} u_k^{гр} n_k^{(1)} dS = 0. \qquad (1)$$

В данном уравнении, в отличие от соответствующего соотношения, приведенного в (Беликов, Рывкин, 2016), учтен обмен импульсом между фазами при фазовом переходе (интегральное слагаемое слева в (1)). Индексы фаз, стоящие сверху, заключены в скобки. Обозначения в (1) следующие: $\rho = \rho_1 + \rho_2$ – плотность твердого тела;

$\rho_1 = 1/V\int\limits_V \rho'_1 dV$ и $\rho_2 = 1/V\int\limits_V \rho'_2 dV$ – осредненные плотности твердой и трещинной фазы, соответственно; v_i – i-я компонента осредненной среднемассовой скорости материала, определяемой из соотношения

$\rho v_i = \rho_1 v_i^{(1)} + \rho_2 v_i^{(2)}$, где $v_i^{(1)} = 1/V_1\int\limits_V v_i'^{(1)} dV$ и $v_i^{(2)} = 1/V_2\int\limits_V v_i'^{(2)} dV$ – осредненные скорости твердой и трещинной фазы;

$\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)}\varphi_1 + \sigma_{ik}^{(2)}\varphi_2$ – тензор упругих напряжений в твердом теле,

$\sigma_{ik}^{(1)} = 1/V_1\int\limits_V \sigma_{ik}'^{(1)}dV$ и $\sigma_{ik}^{(2)} = 1/V_2\int\limits_V \sigma_{ik}'^{(2)}dV$ – осредненные тензоры упругих напряжений в фазах, V_1 и V_2 – объемы, занимаемые фазами в пределах объема осреднения V, $V = V_1 + V_2$, $\varphi_1 = V_1/V$ и $\varphi_2 = V_2/V$ – доли объема, приходящиеся на каждую из фаз;

$\rho_1', \rho_2', v_i'^{(1)}, v_i'^{(2)}, \sigma_{ik}'^{(1)}, \sigma_{ik}'^{(2)}$ – плотности, скорости и тензоры упругих напряжений в точке, находящейся в пределах соответствующей фазы (Алейников и др., 1992; 1993; Беликов, Рывкин, 2016; Беликов, 1991); S_{12} – межфазная поверхность (граница) между твердой и трещинной фазами, которую будем считать гладкой; $n_k^{(1)}$ – вектор нормали, внешней по отношению к твердой фазе; $u_k^{гр}$– скорость движения межфазной границы S_{12} при фазовом переходе. В процессе разрушения твердого тела поверхность S_{12} движется со скоростью $u_k^{гр}$ в сторону твердой фазы. Для долей объема φ_1 и φ_2 справедливо соотношение $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$. Величина $\Delta\sigma_{ik}^{(12)} = \sigma_{ik}^{(1)} - \sigma_{ik}^{(2)}$– разность осредненных по соответствующей фазе тензоров упругих напряжений;

$\widetilde{n}_k^{(1)} = 1/V\Omega_{12}\int\limits_{S_{12}} n_k^{(1)}dS$ – осредненный (по S_{12}) вектор нормали, внешней по отношению к твердой фазе, $\Omega_{12} = S_{12}/V$ – УВП, соответствующая межфазной поверхности S_{12}. В соответствии с природой трещинной фазы, осредненный тензор упругих напряжений в ней имеет вид $\sigma_{ik}^{(2)} = -p_2\delta_{ik}$, где p_2 – осредненное давление флюида в порах и трещинах, δ_{ik} – дельта-символ Кронекера. Если пренебречь плотностью газообразной фазы по сравнению с плотностью твердого тела и считать ее покоящейся ($v_i^{(2)} = 0$), то $\rho = \rho_1$, а $v_i = v_i^{(1)}$. Пренебрегая давлением газа в порах и трещинах, получим, что $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)}\varphi_1$. Если при этом доля объема, занимаемая трещинной фазой $\varphi_2 \ll 1$, то $\varphi_1 \approx 1$ и тогда $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)}$.

Осредненное уравнение баланса объемной части энергии разрушающегося твердого тела, полученное суммированием соответствующих соотношений для каждой из рассматриваемых двух фаз, может быть записано в виде (Беликов, Рывкин, 2016)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i\varepsilon - \sigma_{ik}v_k + J_i) - \Delta\sigma_{ik}^{(12)}v_k^{(1)}\widetilde{n}_i^{(1)}\Omega_{12} - \frac{1}{V}\int\limits_{S_{12}}(\rho_1'\varepsilon_1' - \rho_2'\varepsilon_2')u_i^{гр}n_i^{(1)}dS + \frac{1}{V}\int\limits_{S_{12}}(J_i'^{(1)} - J_i'^{(2)})n_i^{(1)}dS = 0. \quad (2)$$

В выражении (2), в отличие от соответствующего уравнения, приведенного в (Беликов, Рывкин, 2016), учитывается обмен энергией между фазами, а также тепло, расходуемое на разрушение твердой фазы (два последних интегральных слагаемых слева в (2)). Обозначения в (2) следующие: ε – рассчитанная на единицу массы осредненная внутренняя и кинетическая энергия материала, определяемая из соотношения: $\rho\varepsilon = \rho_1\varepsilon_1 + \rho_2\varepsilon_2$. При этом

$\varepsilon_1 = E_1 + v^{(1)^2}/2$ и $\varepsilon_2 = E_2 + v^{(2)^2}/2$ – осредненные полные энергии фаз; ε_1'и ε_2'– аналогичные величины в точке, находящейся в пределах соответствующей фазы; E_1 и E_2 – осредненные внутренние энергии фаз; $J_i = J_i^{(1)} + J_i^{(2)}$ – полный осредненный кондуктивный поток тепла в среде, $J_i'^{(1)}$ и $J_i'^{(2)}$ – соответствующие величины в точке. Чтобы получить уравнение для полной энергии твердого тела, к соотношению (2) необходимо прибавить уравнение для его поверхностной энергии (Беликов, Шестаков, 2008; Беликов, Рывкин, 2016). В результате уравнение баланса всей (объемной и поверхностной) энергии разрушающегося твердого тела можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon + E_\Omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i\varepsilon - \sigma_{ik}v_k + J_i) - \Delta\sigma_{ik}^{(12)}v_k^{(1)}\widetilde{n}_i^{(1)}\Omega_{12} - \frac{1}{V}\int\limits_{S_{12}}(\rho_1'\varepsilon_1' - \rho_2'\varepsilon_2')u_i^{гр}n_i^{(1)}dS + \frac{1}{V}\int\limits_{S_{12}}(J_i'^{(1)} - J_i'^{(2)})n_i^{(1)}dS - \gamma_{12}\mu_{12}\Omega_{12} = 0, \quad (3)$$

где E_Ω – поверхностная энергия единицы объема твердого тела, μ_{12} – коэффициент поверхностного натяжения на межфазной поверхности S_{12}, который мы считаем постоянным, γ_{12} – структурный параметр, характеризующий относительное изменение УВП Ω_{12} при перемещении межфазной границы S_{12}. При этом скорость движения поверхности S_{12} равна сумме скорости ее деформации, а также скорости $u_i^{гр}$ при разрушении твердого тела (Беликов, Шестаков, 2008). Отметим, что коэффициент поверхностного натяжения μ_{12} представляет собой свободную поверхностную энергию, рассчитанную на единицу площади (Беликов, Шестаков, 2008). В силу того, что газовая фаза покоится, а скорости деформации твердой фазы малы, можно положить $\varepsilon_1' = E_1'$, $\varepsilon_2' = E_2'$ и $\varepsilon_1 = E_1$, $\varepsilon_2 = E_2$. Тогда уравнение (3) можно переписать в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E + E_\Omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i E - \sigma_{ik} v_k + J_i) - \\ - \Delta\sigma_{ik}^{(12)} v_k^{(1)} \tilde{n}_i^{(1)} \Omega_{12} - \frac{1}{V}\int_{S_{12}} (\rho_1' E_1' - \rho_2' E_2') u_i^{гр} n_i^{(1)} dS + \\ + \frac{1}{V}\int_{S_{12}} (J_i'^{(1)} - J_i'^{(2)}) n_i^{(1)} dS - \gamma_{12}\mu_{12}\Omega_{12} = 0, \quad (4)$$

где E – рассчитанная на единицу массы осредненная внутренняя энергия материала, определяемая из соотношения: $\rho E = \rho_1 E_1 + \rho_2 E_2$. Если пренебречь кондуктивной теплопроводностью и внутренней энергией газообразной фазы по сравнению с соответствующими величинами для твердой фазы, то в уравнении (4) $J_i = J_i^{(1)}$, $E = E_1$, а кроме того, как и в (1) $\rho = \rho_1$, $v_i = v_i^{(1)}$, $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)}$. Заметим, что приведенные выше уравнения баланса импульса и энергии справедливы, вообще говоря, при любой реологии среды. Поэтому, называя в дальнейшем σ_{ik} тензором упругих напряжений, мы будем иметь в виду не только линейную его связь с тензором деформаций.

Анализ и обсуждение результатов

В квазистационарном случае, в пренебрежении конвективным потоком внутренней энергии, выражение (4) можно записать следующим образом

$$v_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_i} + \sigma_{ik}\frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{\partial J_i}{\partial x_i} + \Delta\sigma_{ik}^{(12)} v_k^{(1)} \tilde{n}_i^{(1)} \Omega_{12} + \\ + Q + \gamma_{12}\mu_{12}\Omega_{12} = 0, \quad (5)$$

где

$$Q = \frac{1}{V}\int_{S_{12}} (\rho_1' E_1' - \rho_2' E_2') u_i^{гр} n_i^{(1)} dS - \\ - \frac{1}{V}\int_{S_{12}} (J_i'^{(1)} - J_i'^{(2)}) n_i^{(1)} dS, \quad (6)$$

рассчитанная на единицу объема энергия, связанная с разрушением кристаллической структуры твердого тела. Первое слагаемое справа в (6) описывает разность внутренних энергий фаз в объеме твердого тела, подвергнутого разрушению. Второе слагаемое – это скрытая теплота фазового перехода, которая расходуется на разрушение кристаллической решетки твердого тела. Физический смысл остальных слагаемых слева в (5) следующий. Первые два представляют собой рассчитанную на единицу объема мощность упругих сил, обусловленных внешним воздействием на твердое тело. Третье слева слагаемое – $\partial J_i/\partial x_i$ – количество тепла, получаемое (отдаваемое) данным единичным объемом в единицу времени посредством кондуктивной теплопроводности, слагаемое $\Delta\sigma_{ik}^{(12)} v_k^{(1)} \tilde{n}_i^{(1)} \Omega_{12}$ описывает мощность акустического излучения (АЭ), генерируемого единицей объема разрушающегося твердого тела вследствие колебаний поверхностей пор и трещин. Последнее слагаемое слева в (5) описывает скорость изменения поверхностной энергии твердого тела. Проследить эволюцию во времени уравнения энергетического баланса (4) в общем случае не представляется возможным. Поэтому будем предполагать, что процесс разрушения протекает достаточно медленно и в ходе его развития твердое тело проходит последовательность квазистационарных состояний, каждое из которых описывается уравнением (5). Соотношение баланса импульса (1) в квазистационарном случае, если пренебречь квадратичными по скоростям слагаемыми (конвективным потоком импульса), можно переписать в виде

$$\frac{\partial\sigma_{ik}}{\partial x_k}+\Delta\sigma_{ik}^{(12)}\tilde{n}_k^{(1)}\Omega_{12}+q=0\ ,\qquad(7)$$

где величина

$$q=\frac{1}{V}\int\limits_{S_{12}}(\rho_1'-\rho_2')v_i'^{(1)}u_k^{гр}n_k^{(1)}dS\qquad(8)$$

описывает разность импульсов фаз в объеме разрушившегося твердого тела. Так как $v_i=v_i^{(1)}$, то в соответствии с (7), учитывая симметрию тензора упругих напряжений σ_{ik}, можем записать

$$\begin{aligned}v_k\,\frac{\partial\sigma_{ik}}{\partial x_i}&=v_i\,\frac{\partial\sigma_{ik}}{\partial x_k}=v_i^{(1)}\,\frac{\partial\sigma_{ik}}{\partial x_k}=\\&=-\Delta\sigma_{ik}^{(12)}v_k^{(1)}\tilde{n}_i^{(1)}\Omega_{12}-qv_i^{(1)}=\\&=-\Delta\sigma_{ik}^{(12)}v_k^{(1)}\tilde{n}_i^{(1)}\Omega_{12}.\end{aligned}\qquad(9)$$

Слагаемым $qv_i^{(1)}$ как квадратичным по скорости мы пренебрегли. Из (9) следует, что справедливо равенство

$$v_k\,\frac{\partial\sigma_{ik}}{\partial x_i}+\Delta\sigma_{ik}^{(12)}v_k^{(1)}\tilde{n}_i^{(1)}\Omega_{12}=0\ .\qquad(10)$$

Можно показать, что $\nu_k\partial\sigma_{ik}/\partial x_i$ (первое слагаемое слева в (5) и (10)) входит в уравнение баланса кинетической энергии твердого тела. Отсюда следует, что эта величина описывает работу, совершаемую в единицу времени упругими силами и идущую на увеличение кинетической энергии единицы объема разрушающегося твердого тела. Рост кинетической энергии обусловлен, в свою очередь, распространяющимися в среде упругими волнами, возбуждаемыми колебаниями межфазной поверхности S_{12}, инициированными процессами образования и роста трещин. Подставляя (10) в (5) и учитывая симметрию тензора упругих напряжений, получим

$$\sigma_{ik}v_{ik}-\frac{\partial J_i}{\partial x_i}+Q+\gamma_{12}\mu_{12}\Omega_{12}=0,\qquad(11)$$

где $\nu_{ik}=½(\partial\nu_i/\partial x_k+\partial\nu_k/\partial x_i)$ – осредненный тензор скоростей деформации (Беликов, Шестаков, 2008). Из соотношения (11) видно, что работа упругих сил в единицу времени $\sigma_{ik}\nu_{ik}$ сопровождается выделением тепла, которое частично расходуется на разрушение твердого тела (слагаемое Q слева в (11)), частично кондуктивным образом отводиться из области разрушения (слагаемое $-\partial J_i/\partial x_i$ слева в (11)). Кроме того, часть мощности упругих сил тратится на изменение величины межфазной поверхности S_{12} в процессе разрушения твердого тела (Беликов, Шестаков, 2008). Это, в свою очередь, приводит к изменению поверхностной энергии материала (слагаемое $\gamma_{12}\mu_{12}\Omega_{12}$ слева в (11)). Если вклад величин Q и $-\partial J_i/\partial x_i$ несущественен, выражение (11) примет вид

$$\sigma_{ik}\nu_{ik}+\gamma_{12}\mu_{12}\Omega_{12}=0.\qquad(12)$$

Соотношение (12) представляет собой пространственный аналог энергетического критерия Гриффитса, определяющего условия распространения отдельной трещины (Беликов, Шестаков, 2008). Таким образом, в рамках принятых нами приближений справедливо не только условие (5), но и выполняются равенства (10) и (11) по отдельности. Каждое из этих уравнений описывает определенный режим развития процессов разрушения. Оценим по порядку величины первое и второе слагаемые слева в (5). Пусть L_1 – характерный размер изменения компонент тензора упругих напряжений (расстояние, на котором эти компоненты изменяются на величину порядка их самих); L_2 – характерный размер изменения скоростей деформации, определяемый аналогично. В зависимости от того, как соотносятся между собой величины L_1 и L_2, изменяется соотношение между первым и вторым членами слева в (5). Если $L_1\sim L_2$, то слагаемое $\sigma_{ik}\partial\nu_k/\partial x_i$ (совпадающее с $\sigma_{ik}\nu_{ik}$ в (11)), а также величина $\nu_k\partial\sigma_{ik}/\partial x_i$ – одного порядка. В такой ситуации процесс разрушения описывается общим уравнением (5), в соответствии с которым энергия внешнего воздействия на твердое тело расходуется на разрушение его кристаллической структуры при фазовом переходе (образование зародышей микротрещин), акустическое излучение, изменение поверхностной энергии, а также частично отводится из области разрушения посредством кондуктивной теплопроводности. Иными словами, в данном случае, в соответствии с принципом Ле-Шателье (Ландау, Лифшиц, 1964), работают все механизмы, стремящиеся ослабить внешнее воздействие на твердое тело. Условие $L_1 \sim L_2$ выполняется, в основном, в упругом приближении, при линейной связи между напряжениями и деформациями, а также при относительно небольших отклонениях от этого состояния. Если $L_1 >> L_2$, то в области разрушения справедливо соотношение $\sigma_{ik}\nu_{ik} >> \nu_k\partial\sigma_{ik}/\partial x_i$. Указанное выше неравенство выполняется, когда производные компонент тензора упругих напряжений мало меняются, а градиенты скоростей деформации резко возрастают по сравнению с теми их значениями, которые были при $L_1 \sim L_2$. Такая ситуация возникает на фоне роста упругих напряжений в окрестности включений, которые являются их концентраторами. При этом, если включение имеет изометричную форму (пора) и ограничено относительно гладкой поверхностью, на которой отсутствуют участки большой кривизны, состояние материала в этих областях станет пластическим. В пластичном состоянии деформации (смещения) начнут расти быстрее напряжений, причем степень их неоднородности, в зависимости от расстояния до включения, также будет увеличиваться. Возникающие при этом большие градиенты смещений будут обусловлены тем, что поведение материала на разных расстояниях от включения может, вообще говоря, подчиняться различным реологическим соотношениям. Когда мы рассматриваем процесс разрушения как последовательность квазистационарных состояний, скорости деформации будут меняться в зависимости от расстояния до включения также как смещения. Тогда в окрестности включений возникнут большие градиенты не только смещений, но и скоростей деформации, что и обусловит выполнение условия $L_1 >> L_2$. Процесс разрушения в областях, где выполняется соотношение $L_1 >> L_2$, будет описываться уравнением (11). В этом случае мощность упругих напряжений будет расходоваться на деформацию твердого тела, а выделяемое в процессе деформации тепло частично тратится на разрушение твердого тела (образование микротрещин), частично кондуктивным образом отводится из области разрушения. Кроме того, часть упругой энергии расходуется на изменение межфазной поверхности (в том числе за счет поверхностей образовавшихся микротрещин) между твердой и трещинной фазой, что приводит к изменению УВП и, как следствие, поверхностной энергии. Характерная особенность данного этапа (в отличие от рассматриваемого ниже катастрофического режима развития процессов разрушения) состоит в том, что возникающие микротрещины в основном влияют лишь на реологию материала, а процесс их слияния является редким явлением. Поэтому акустическое излучение будет в данном случае незначительным. Если затраты энергии на разрушение (образование микротрещин), а также отвод тепла посредством кондуктивной теплопроводности, малы, выполняется соотношение (12), в соответствии с которым мощность упругих напряжений полностью расходуется на изменение поверхностной энергии твердого тела при пластическом деформировании межфазных поверхностей. Режим развития процесса разрушения, удовлетворяющий соотношению (11) или (12), можно условно назвать эволюционным, в том смысле, что он не сопровождается мощным акустическим излучением (Беликов, Шестаков, 2008). Если $L_1 << L_2$, то в области разрушения справедливо неравенство $\nu_k\partial\sigma_{ik}/\partial x_i >> \sigma_{ik}\nu_{ik}$. Данное соотношение выполняется, когда градиенты компонент тензора упругих напряжений достаточно велики, а градиенты скоростей деформации малы по сравнению с теми их значениями, которые наблюдаются при $L_1 \sim L_2$. Такая ситуация возникает вблизи включений, на поверхности которых есть участки большой кривизны и, прежде всего, в окрестности вершин трещин. Известно (Партон, Морозов, 1985; Партон, 1990), что компоненты тензора напряжений с расстоянием r от вершины трещины изменяются как $r^{-0,5}$, а их градиенты пропорциональны $r^{-1,5}$. То есть упругие напряжения очень сильно возрастают с уменьшением расстояния от вершины трещины, при этом существенно увеличиваются и градиенты компонент тензора напряжений. В то же время, при таких высоких значениях упругих напряжений в локальной области вблизи вершины трещины может происходить существенное увеличение температуры (Партон, 1990). Это приведет к тому, что вещество в окрестности вершины трещины перейдет в состояние текучести (начнет течь). При развитом пластическом течении материала силы трения будут способствовать выравниванию скоростей и смещений в процессе деформации. В результате, вблизи вершины трещины, градиенты скоростей деформации уменьшатся, а градиенты компонент тензора напряжений почти не изменятся по сравнению с теми их значениями, которые были в упругом приближении. С другой стороны, в этой области твердого тела, находящейся в метастабильном состоянии, возрастет вероятность образования зародышей микротрещин, а вследствие их объединения – самих микротрещин. В такой ситуации возобладает тенденция, в соответствии с которой возникающие микротрещины начнут образовывать в области разрушения скопления (кластеры), трассирующие будущую магистральную трещину. При этом, когда расстояния между микротрещинами в кластерах станут по порядку величины сравнимы с L_1, градиенты компонент тензора напряжений в области скопления микротрещин будут велики, а градиенты скоростей деформации относительно малы. Материал, находящийся в перемычках между микротрещинами, приобретет свойство текучести и в данной области будет выполнено условие $L_1 << L_2$. Вновь возникающие микротрещины будут группироваться, преимущественно, вблизи вершины растущей магистральной трещины, а их слияние приведет к росту последней (Партон, 1990). Слияние микротрещин будет происходить вследствие разрушения перемычек между ними посредством фазового перехода из твердого в газообразное (а возможно, и жидкое) состояние. При этом энергетические затраты на образование микротрещин и их слияние будут в данном случае незначительны по сравнению с акустическим излучением, возбуждаемым колебаниями поверхностей растущих магистральных трещин. Процесс разрушения в данной области будет описываться уравнением (10). При выполнении соотношения (10), главным механизмом, в результате действия которого происходит высвобождение упругой энергии, является акустическое излучение. Уравнение (10) справедливо в течение всего промежутка времени пока в области разрушения продолжается рост магистральных трещин. Данный процесс завершится, когда одна из магистральных трещин достигнет длины, сравнимой с размерами твердого тела. После этого оно потеряет несущую способность и разрушится. Резюмируя, можно сказать, что когда справедливо условие $L_1 << L_2$, акустическое излучение, сопровождающее процесс образования и роста магистральных трещин, будет основным механизмом, посредством которого, в соответствии с принципом Ле-Шателье, твердое тело стремиться снять внешнее воздействие. С этой точки зрения, указанный режим развития процессов разрушения можно условно назвать катастрофическим, в том смысле, что он сопровождается значительным акустическим излучением. Степень его катастрофичности будет характеризоваться, прежде всего мощностью излучаемой энергии, которая зависит от разности упругих напряжений на межфазных поверхностях, скорости их колебаний, величины УВП. Рассмотренные выше режимы развития процесса разрушения, соответствующие уравнениям (5), (10), (11), могут реализовываться в различных областях твердого тела, подвергнутого внешнему воздействию не только последовательно, но и, отчасти, одновременно. Все будет определяться его начальной структурой и характером изменения внешней нагрузки. Поэтапный характер развития процесса разрушения во времени лучше всего определять по его индикаторам. Например, наличие АЭ может служить свидетельством катастрофического режима развития процессов разрушения, а ее отсутствие или значительное уменьшение (при продолжающемся нагружении твердого тела) указывает на то, что реализуется эволюционный этап.

Проведенный выше анализ позволяет предложить следующий наиболее вероятный сценарий, в котором будут отражены основные закономерности развития процессов разрушения. После приложения нагрузки, на начальной стадии разрушения твердого тела характерные размеры изменения скоростей деформации и компонент тензора упругих напряжений будут сопоставимы. На этом этапе будет выполняться соотношение $L_1 \sim L_2$ и процесс разрушения будет описываться уравнением (5), в котором присутствуют оба слагаемых $\sigma_{ik}v_{ik}$ и $v_k\partial\sigma_{ik}/\partial x_i$. В этом случае энергия внешнего воздействия переходит в другие ее виды, описываемые остальными членами слева в (5). В частности, на данном этапе начнется образование микротрещин, первоначально рассеянных по всей области, где развиваются процессы разрушения (Соболев, Пономарев, 2003). В дальнейшем, по мере увеличения нагрузки и развития процессов разрушения, возникающие микротрещины начнут объединяться в кластеры. Одновременно начнется процесс слияния микротрещин в кластерах, что приведет к образованию и росту (возможно и ветвлению) магистральных трещин. Иногда говорят, что микротрещины стягиваются к месту образования магистральной трещины (там же). Этот процесс, однако, не будет сопровождаться большими деформациями в области разрушения (Партон, 1990). Поэтому градиенты скоростей деформации в течение промежутка времени, когда происходит рост магистральных трещин, изменятся незначительно. В то же время, градиенты компонент тензора упругих напряжений в пределах скопления микротрещин резко возрастут по сравнению с теми их значениями, которые были при $L_1 \sim L_2$. В результате в области разрушения характерный размер изменения компонент тензора упругих напряжений станет существенно меньше характерного размера изменения скоростей деформации. То есть, будет выполняться условие $L_1 << L_2$ и наступит этап, когда процесс разрушения будет описываться уравнением (10), согласно которому упругие напряжения будут сниматься в соответствии с принципом Ле-Шателье, посредством излучения упругих волн при образовании и росте магистральных трещин. Если процесс разрушения продолжится в таком же (катастрофическом) режиме и хотя бы одна из магистральных трещин достигнет длины, порядка размеров тела, оно разрушится. Иногда развитие данного этапа может быть прервано до момента разрушения твердого тела. Это произойдет в том случае, когда ни одна из магистральных трещин не достигла длины, сравнимой с размерами твердого тела и их дальнейший рост прекратился. Причиной остановки может быть наличие границ зерен, препятствующих росту магистральных трещин, если твердое тело является гетерогенным, (например, бетон, горная порода). В дальнейшем, по мере увеличения нагрузки в окрестности существующих магистральных трещин начнут увеличиваться скорости деформации. В результате может возникнуть ситуация, когда последовательно будут выполняться соотношения $L_1 \sim L_2$, а затем $L_1 >> L_2$. При этом сначала (при $L_1 \sim L_2$) процесс разрушения будет описываться общим уравнением (5). Затем (при $L_1 >> L_2$), уравнением (12). В последнем случае мощность упругих сил будет расходоваться на пластическую деформацию поверхностей уже существующих магистральных трещин, сопровождающуюся изменением поверхностной энергии среды. Иными словами, в этом случае катастрофический режим развития процессов разрушения сменится эволюционным этапом. Такая ситуация наблюдалась нами при количественной интерпретации данных наблюдений АЭ в разрушающемся образце бетона, являющегося гетерогенным материалом. При этом, было установлено, что этап, описываемый уравнением (10), может смениться эволюционным режимом развития процессов разрушения, после того как интенсивность акустического излучения падает более, чем на порядок (Беликов, Рывкин, 2016). В дальнейшем, по мере увеличения внешней нагрузки в окрестности образовавшихся магистральных трещин будет возникать концентрация упругих напряжений и начнется образование микротрещин. При этом их кластеризация будет происходить в основном вблизи вершин уже существующих магистральных трещин. В результате снова возникнет этап, при котором справедливо соотношение $L_1 << L_2$. Таким образом, в данном случае процесс разрушения, пройдя катастрофический этап, переходит к эволюционному режиму своего развития, а затем снова может наступить катастрофический этап. В зависимости от структурных особенностей твердого тела, подвергнутого внешнему воздействию, могут быть отклонения от изложенной выше последовательности развития процессов разрушения.

В основном, изложенные выше закономерности процессов разрушения твердого тела будут справедливы и при разрушении горных пород. Например, некоторые из рассмотренных выше этапов можно проследить в существующих моделях подготовки землетрясений и, в частности, в так называемой модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (Соболев, Пономарев, 2003). Вместе с тем, нельзя не отметить и специфику процессов разрушения горных пород, которая обусловлена, прежде всего, тем, что они изначально являются гетерогенными структурами, состоящими из совокупности минеральных фаз. Эта особенность горной породы приведет к тому, что неоднородность поля упругих напряжений при ее нагружении будет существенно выше, чем в гомогенных материалах. Концентраторами упругих напряжений в горной породе будут не только поры и трещины, но и ее отдельные включения (зерна). Кроме того, гетерогенность горной породы может стать причиной нарушения изложенной выше последовательности этапов развития процесса разрушения вследствие того, что границы зерен будут являться препятствием для роста магистральных трещин. Описанный выше сценарий, в той или иной степени будет соблюдаться и при разрушения массивов горных пород. Однако в данном случае, необходимо иметь в виду, что деструктивные процессы в геосреде обладают рядом специфических особенностей. Главная из которых заключается в том, что пространственные масштабы, характеризующие процессы разрушения в горных массивах, существенно выше, чем в лабораторных условиях. В частности, магистральные трещины могут иметь размеры, на порядки большие, чем в образцах, а интенсивность акустического излучения, особенно на финальной стадии, будет существенно превосходить ту, которая регистрируется в экспериментах. С этой точки зрения, при сравнительном анализе процесса разрушения в лабораторных условиях и в массивах горных пород, а также характеристике степени его катастрофичности, целесообразно использовать относительные величины. Например, отношение размеров магистральных трещин к характерному размеру области разрушения, а также количество акустической энергии, излучаемой единицей объема образца и массива. В то же время, при оценке степени катастрофичности процессов разрушения в массиве горных пород следует учитывать то обстоятельство, что выросшие до достаточно больших размеров магистральные трещины могут нарушить его целостность. Это приведет к тому, что ограниченные этими трещинами фрагменты массива могут приобрести некоторую подвижность. В результате чего появится возможность их перемещения в пределах массива по поверхностям некоторых из магистральных трещин, ограничивающих данный фрагмент. Такие подвижки могут стать источником мощного акустического импульса, что чаще всего и обуславливает высокую степень разрушительности горного удара или землетрясения.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 15-18-5-19, № 15-2-5-32.

Литература

Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И., Троянов А.К. Интерпретация наблюдений сигналов акустической эмиссии на Уральской сверхглубокой скважине // Геология и геофизика. 1992. № 6. С. 118–126.

Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И. Акустическая эмиссия в гетерогенных средах // Дефектоскопия. 1993. № 3. С. 31–36.

Беликов В.Т. Количественное описание процессов тепломассопереноса в литосфере // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 3–9.

Беликов В.Т. О термодинамической интерпретации эмпирического соотношения для долговечности твердых тел // Дефектоскопия. 1996. № 1. С. 96–101.

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Использование результатов наблюдений акустической эмиссии для изучения структурных характеристик твердого тела // Акустический журнал. 2015а. Т. 61. № 5. С. 622–630.

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Исследование временных изменений структурных характеристик разрушающихся образцов по данным наблюдений акустической эмиссии // Уральский геофизический вестник. 2015б. № 1. С. 15–23.

Беликов В.Т. Рывкин Д.Г. Изучение характера развития процессов разрушения твердого тела с использованием результатов наблюдений акустической эмиссии // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1. С. 17–28.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 461–470.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 568 с.

Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 255 с.

Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластичного разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.

Партон В.З. Механика разрушения от теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.

Регель В.Р., Слуцкер А.Н., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. 1920. 221. P. 163–198.