

УДК [622.02 : 539.2/.8]:620.174.24

Горобец Л.Ж., д-р техн. наук, профессор
(Государственное ВУЗ «НГУ»),
Верхоробина И.В., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

ПРИНЦИПЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕОСРЕДЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Горобец Л.Ж., д-р техн. наук, профессор
(Державний ВНЗ «НГУ»),
Верхоробіна І.В., магістр
(ІГТМ НАН України)

ПРИНЦИПИ І ПОКАЗНИКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕОСЕРЕДОВИЩА ПРИ НАВАНТАЖЕННІ

Gorobets L.Zh., D.Sc. (Tech.), Professor
(State HEI «NMU»),
Verhorobina I.V., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

THE FOUNDATIONS AND MODES OF GEOLOGICAL ROCK OPERATION DURING LOADING

Аннотация. Проведено обобщение физических явлений и закономерностей эволюции нагружаемой геологической среды. В образовании и развитии микротрещин, фрагментов и отдельностей ведущая роль отводится гетерогенности разрушаемого тела. Анализируется влияние масштаба объекта при разрушении на величину деформации, плотности энергии и акустическую эмиссию. Рассмотрены отличия механизма разрушения геосреды в микро- и макросистемах. Обоснованы информативные параметры критического состояния вещества на запредельной стадии деформирования и разрушения с применением метода акустической эмиссии. Выявлены принципы, критерии и показатели функционирования нагружаемой геосреды. Энергетика разрушения природных сред характеризуется динамическим масштабным эффектом. Показаны практические возможности оценки эффектов разрушения (трещинообразования, дезинтеграции, диспергирования) на основе знания кинетики запредельного деформирования и акустической активности нагружаемой геосреды. Например, с увеличением длительности акустического затишья за пределом прочности можно прогнозировать более сильные эффекты разрушения (диспергирования).

Ключевые слова: геологическая среда, разрушение, плотность энергии, акустическая эмиссия, авторезонанс.

Введение. Изучение принципов и показателей функционирования нагружаемой геологической среды проводится с позиций новых достижений в науке разрушения. Физика природных динамических явлений в горных породах развивается на основе изучения трещинообразования в твердых гетерогенных материалах. С позиций геофизики (сейсмофизики) трещину представляют структурным элементом деформированной геологической среды, перераспределяю-

щим накопленную энергию и контролирующим ее выделение, например, в виде механической энергии разрушения (включая дезинтеграцию структуры, диспергирование) и в виде излучения волновых колебаний в широком спектре (акустическая эмиссия).

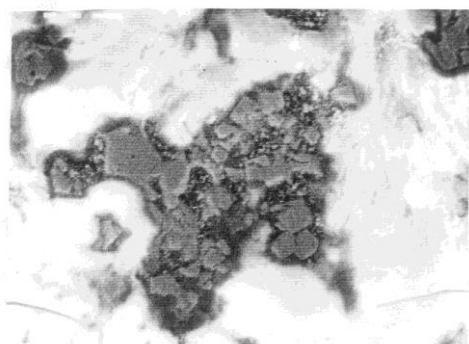
Концепция структурной иерархии размеров отдельностей геомеханической среды обоснована М.А. Садовским [1], а признаки иерархической упорядоченности в развитии тектонической деструкции земной коры подтверждены в работах В.Ф. Писаренко, Г.А. Соболева, В.В. Ружича [1-3]. Работами В.С. Куксенко, Д.И. Фролова, Манжикова Б.Ц. [4-6] доказан принцип концентрационного укрупнения трещин, признана автомодельность разрушения на основе подобия энергетических спектров при разрушении лабораторных образцов и горного массива.

В настоящее время кинетику разрушения горных пород в широком диапазоне скорости нагружения успешно исследуют методами акустической эмиссии и сейсмического мониторинга с подтверждением накопительной стадии на различных масштабных уровнях (от микротрещин до тектонических процессов) [7, 8].

Анализ последних исследований и публикаций. Проследим особенности эволюции трещинообразования в гетерогенном материале на примере железной руды (силикато-магнетитовые кварциты) при нагружении одноосным сжатием [9].

Наблюдение микрофотографий зерен магнетита (рис. 1 а) показало образование в них микротрещин длиной 1-2 мкм, их накопление по границам блоков зерна, а затем взрывную потерю механической устойчивости тех микроучастков, которые в силу разных причин (например, кристаллографическая ориентация, неудобная для легкого скольжения) не могут пластически деформироваться. Как следствие, появляется большего размера трещина ($\cong 30$ мкм), соизмеримая с размером микроочага.

а)



б)

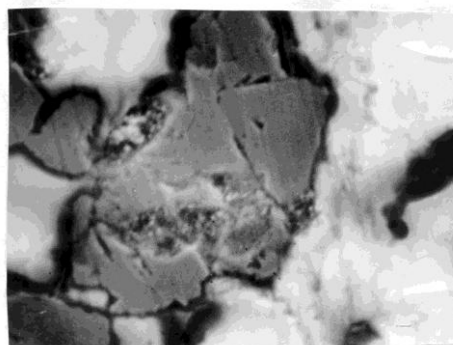


Рисунок 1-Электронные микрофотографии аншлифов разрушенного образца железной руды:

а) очаг разрушения; $d = 25$ мкм; $\times 470$; масштаб: 5 мм – 1 мкм;

б) разрушенное зерно магнетита; $d = 110$ мкм; $\times 1200$.

Длина внутризеренных трещин составляет 0,5-4 мкм, длина граничных трещин – 20-30 мкм. Наблюдаются зоны нарушения сплошности размером 4-

8 мкм, представляющие собой рыхлую массу измельченного вещества. На рис. 1 б показано полностью раздробленное зерно магнетита ($d \cong 110$ мкм) - сформировавшийся очаг разрушения, состоящий из блоков размером от 30 мкм до нескольких единиц микрометров. Наличие тонкодисперсных частиц, заполняющих трещины, свидетельствует о высоком уровне накопленной блоками упругой энергии перед сбросом напряжений. Исследование показало очаговый динамичный характер образования трещин с поэтапным их укрупнением, а также соизмеримость размеров граничных трещин с размером структурных элементов (зерен магнетита), что указывает на ведущую роль гетерогенности материала в образовании и развитии микротрещин, фрагментов и отдельных частей.

Рассмотрим роль масштабного фактора в процессе деформирования и разрушения геосреды.

В геологической среде нашей планеты характерный размер структурной неоднородности примерно на шесть порядков больше, чем в идеальном кристалле. На рис. 2 иллюстрируется масштабный эффект деформации ε (%) разрушения, наблюдаемый в широком диапазоне размеров D (м) и свойств твердых тел. Значения ε в интервале 0,04-64,2 % обобщены формулой [9] :

$$\lg \varepsilon = -0,59 \lg D - 1,33 \quad (1)$$

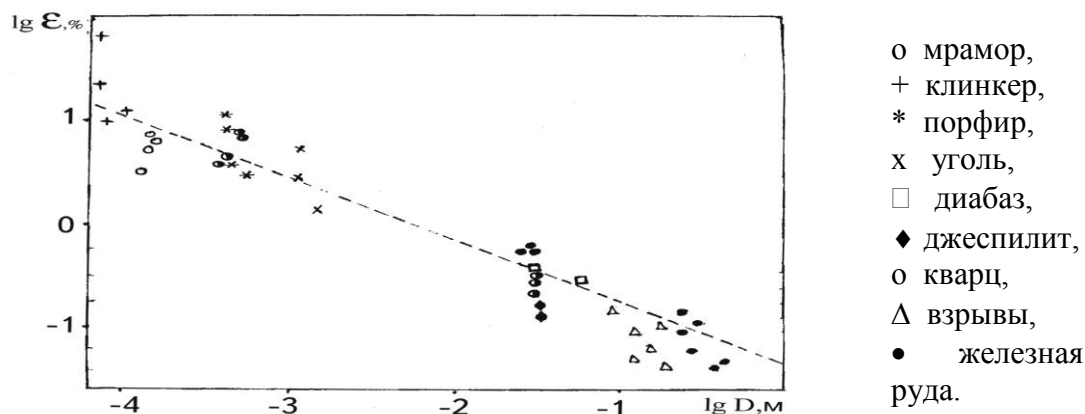


Рисунок 2 - Зависимость относительной деформации разрушения от размера образцов

Функционирование нагружаемой природной среды включает переход разрушения на более высокий масштабный уровень, т.е. укрупнение трещин, контролируемое концентрационным критерием K согласно модели и опытным данным В.С. Куксенко :

$$K = \frac{N^{-1/3}}{l} = \frac{L}{l},$$

где N - объемная концентрация трещин размера l ; L - среднее расстояние между трещинами; l - средняя величина поперечного размера трещин.

Величина критерия K связана с относительной деформацией ε при разрушении, коэффициентом формы k_ϕ трещин, объемом V разрушаемого объекта в соответствии с соотношениями :

$$K = \left(\frac{\varepsilon}{V}\right)^{-1/3} l^{-1} = (\varepsilon k_\phi)^{-1/3};$$

$$k_\phi = l/\delta.$$

Коэффициент формы трещин, характеризуемый отношением поперечного l и продольного δ размеров структурной неоднородности, согласно опытным данным составляет величину $k_\phi = 2 \dots 4$ при различных видах и масштабах разрушения (сжатие, удар, бурение, взрыв, сейсмические разрывы), исключая мощные сейсмические акты, при которых k_ϕ увеличивается до 35 за счет динамической анизотропии свойств геосреды.

На основе измерения деформации ε трещинообразования установлена зависимость концентрационного критерия K от размера D разрушения (рис. 3) [9]:

$$\lg K = 1,1 + 0,2 \lg D.$$

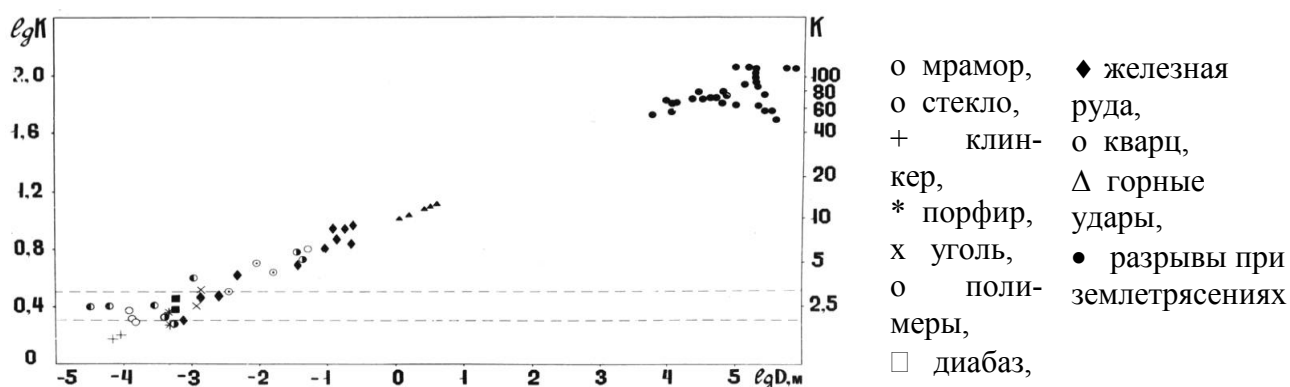


Рисунок 3 - Зависимость концентрационного критерия от масштаба разрушения:

Теоретическое обоснование размерного эффекта $K(D)$ концентрационного порога разрушения реализовано В.А. Петровым [10].

Для лабораторных образцов горных пород величина K изменяется от 2 до 5, при увеличении размеров в диапазоне $D=4 \cdot (10^{-4} - 10^1)$ м значение K возрастает от 3 до 10. При крупномасштабных разрушениях (горных ударах и землетрясениях) параметр K рассчитан путем экстраполяции эмпирической зависимости (1) (рис. 3) на соответствующие размеры с использованием сейсмических данных М.А. Садовского, В.Ф. Писаренко, В.В. Штейнберга [1, 9].

Теоретическая часть. Следует особо отметить, что механизм разрушения геосреды в микросистемах принципиально отличается от разрушения в макросистемах необходимостью учитывать скорости воздействия и сопутствующие акустические эффекты, такие как диффузия акустического излучения. Возникающие, например, флуктуационным способом микроразрывы сплошности мо-

гут привести к лавинообразному разрушению нагружаемого тела за счет усиления волн напряжений с помощью индуцированного акустического излучения.

По современным представлениям о разрушении деформируемое тело с дефектами представляет автоколебательную систему разрывного типа с многочастотным режимом [11]. В результате интерференции волн напряжений с различными частотами в активной среде возникают автоакустические возбуждения, и их коллективное поведение определяет закономерности предразрушения твердого тела. Таким образом, разрушение следует рассматривать как неравновесный процесс, инициируемый акустическими волнами. В.Н. Бовенко [12, 13] развивает представления о разрывных релаксационных колебаниях деформируемого твердого тела, учитывая дискретно-волновую природу перестройки кристаллической решетки и скачкообразное изменение параметров состояния в условиях предразрушения.

Завершающий акт саморазрушения происходит по авторезонансному механизму высвобождения накопленной энергии в момент достижения критического уровня напряжений и деформаций (энергетического порога разрушения) нагружаемой среды. Критическое состояние вещества подобно резонансно-волновому состоянию, в котором диффузия акустического излучения оказывает разрушительное действие на кристаллическую структуру нагруженного объекта. В зависимости от интенсивности автовозбуждений (автоколебательных процессов) могут происходить резонансные колебания кристаллических структур (их нагрев) или их разрушение. Для варианта разрушения напряженно-деформированное состояние частицы, находящейся в автоколебательном резонансном режиме, функционально зависит от действия автоакустических флуктуаций (а не от межмолекулярных взаимодействий).

На микроуровне элементарные акты разрушения реализуются в виде необратимых разрывов межатомных связей в локальных термодинамически неравновесных зонах, где вещество находится в состоянии автоакустического возбуждения активности квантово-механической природы. В условиях сильного отклонения от термодинамического равновесия происходит коллективная перестройка (самоорганизация) атомов конденсированной среды по авторезонансному механизму. В процессе этой динамичной перестройки формируются и растут микротрещины, образуются фрагменты и отдельные частицы. Из вышеизложенного следует, что информацию о накопленной энергии несет запредельная стадия деформирования и разрушения, в частности, стадия саморазрушения, протекающая со скоростью авторезонанса.

Согласно модели предразрушения деформируемого твердого тела по В.Н. Бовенко [12] предразрушающее состояние включает следующие стадии: стационарную – квазипериодические релаксационные (разрывные) колебания, ускоренную – стохастические автоколебания и третью – авторезонансные колебания. Продолжительность стационарной стадии, характеризующей ресурс долговечности материала при любых испытаниях, примерно на три порядка превышает общую продолжительность двух других стадий.

Необходимо иметь в виду тот факт, что любой процесс разрушения, являясь следствием дискретности строения нагружаемой среды и дискретно-волновых проявлений механизма саморазрушения через автовозбуждения активности вещества, сопровождается эффектами диспергирования [14, 15]. Процесс разделения нагружаемой среды на изолированные фрагменты и тонкодисперсные отдельности (диспергирование) реализуется в активных локальных зонах и достигается в критическом состоянии вещества на стадии авторезонанса. Для установления эффектов образования отдельностей и диспергированных частиц введем и свяжем между собой показательные энергетические параметры для оценки средней W_V и локальной $W_{\Delta V}$ плотности энергии.

Оба параметра W_V и $W_{\Delta V}$ плотности энергии при разрушении характеризуют критическое состояние вещества нагружаемой среды, по достижении которого накопленная энергия высвобождается с образованием новой поверхности ΔS . Их различие состоит в том, что средняя плотность энергии W_V в объеме нагружаемой среды характеризует режим разрыва сплошности (дробления) образца (с образованием крупных отдельностей), тогда как локальная величина плотности энергии $W_{\Delta V}$ в очагах разрушения (зонах диспергирования) служит оценкой удельных затрат энергии на образование тонкодисперсных фрагментов и диспергированных частиц:

$$W_{\Delta V} = W_V / \varepsilon_i = \sigma_o \varepsilon_o / 2 \varepsilon_i, \quad (2)$$

где $W_V = \sigma_o \varepsilon_o / 2$, σ_o , ε_o - предел прочности и деформация на пределе прочности, ε_i - деформация на стадии авторезонанса (саморазрушения, диспергирования).

Запуск авторезонансного механизма разрушения межатомных связей реализуется при условии достижения критической плотности энергии $W_{\Delta V}$ в активных локальных зонах нагружаемой среды (зонах автовозбуждения активности вещества). Величина $W_{\Delta V}$ локальной плотности энергии характеризует уровень условно энергетического «порога» диспергирования, при переходе за который происходит высвобождение накопленной энергии с раскрытием очагов разрушения и выносом образованных тонкодисперсных фракций. Согласно исследованиям величина $W_{\Delta V}$ на 2 порядка выше W_V , составляя для ряда природных материалов (железная руда, уголь, тальк, песчаник) диапазон $10^2 \dots 10^3$ МДж/м³ при образованной удельной поверхности разрушенного продукта $\Delta S/V = 10^3 \dots 10^4$ м²/м³ [9].

Параметры W_V и $W_{\Delta V}$ критической плотности энергии при разрушении связаны с величиной концентрационного критерия K соотношением [9]:

$$W_{\Delta V} = W_V / \varepsilon = W_V K^3 \kappa_\phi, \quad (3)$$

Целью данной работы является обобщение физических закономерностей функционирования нагружаемой геологической среды с применением акусти-

ческого мониторинга для выявления и прогнозной оценки эффектов разрушения и диспергирования вещества.

Метод акустической эмиссии применен в данной работе для наблюдения изменений микроструктурных элементов геосреды в напряженно-деформированном состоянии, включая стадию запредельного деформирования и разрушения. По опытным данным [5] в диапазоне размеров трещин от 0,1 мм до 1 км реализуется линейная корреляционная связь (в двойных логарифмических координатах) длительности $T(c)$ акустического сигнала с размером l (м) образовавшейся трещины:

$$T = \frac{\alpha l}{v},$$

где v – скорость роста образующейся трещины, α - коэффициент пропорциональности.

Новые открытия в физике прочности и разрушения способствовали развитию теории диспергирования на основе знания акустоэмиссионных эффектов разрушения. Разрушение - это неравновесный процесс, инициируемый акустическими волнами при достижении критической плотности энергии в активных локальных зонах деформируемого твердого тела. Согласно теории предразрушения, разработанной В.Н. Бовенко, внутренняя энергия деформированной кристаллической решетки трансформируется в кинетическую и потенциальную, а также в колебательную энергию разлетающихся деформированных частиц с квантовым КПД, равным отношению максимальной энергии акустических колебаний атомов ($h\nu_m$) к энергии межатомной связи (mc^2) [12]:

$$\eta_{ке} = h\nu_m / mc^2 = 10^{-2} \dots 10^{-3}, \quad (4)$$

где h - постоянная Планка; $\nu_m = c/\langle a \rangle$ - максимальная частота АЭ, m - масса атома, c - скорость звука, $\langle a \rangle$ - среднее межатомное расстояние.

Из этого следует, что коэффициент полезного действия η_d процесса диспергирования теоретически не может превысить величину коэффициента $\eta_{ке}$ трансформации энергии кристаллической решетки в акустическую энергию. Максимальная величина КПД измельчения достижима в режимах нагружения измельчаемых частиц со скоростью порядка критической скорости автоколебательного резонанса [9]. При этом условии реализуется предельная скорость перестройки кристаллической решетки вещества и максимальная величина коэффициента трансформации в акустическую энергию приобретенной веществом энергии, что может обеспечить высокие эффекты диспергирования.

Таким образом, эффекты диспергирования вещества связаны с дискретностью строения нагружаемой геосреды и дискретно-волновым проявлением механизма саморазрушения через автовозбуждения активности вещества. Способность вещества к диспергированию теоретически ограничена коэффициентом трансформации энергии кристаллической решетки в акустическую энергию.

Далее проведем анализ функционирования нагружаемой геосреды с привлечением сопоставления элементарных актов необратимого разрыва межатомных связей при саморазрушении с фазовым переходом вещества в критической точке. Полагаем, что любые процессы разрушения едины в своей термодинамической природе, что подтверждается близостью значений таких параметров как энергия активации разрушения, индентирования, термодеструкции, сублимации, энтальпии на единицу атомов для широкого круга материалов (кристаллы, породы, полимеры, металлы, стекла). Можно утверждать, что величина показателя $W_{\Delta V}$ энергетики саморазрушения (с эффектами диспергирования) определяется исключительно термодинамическими характеристиками критического состояния вещества вне зависимости от вида подведенной энергии (механическая, термическая, электрическая, магнитная).

В работах [9, 16] показано, что величина параметра $W_{\Delta V}$ локальной плотности энергии в очагах разрушения (зонах активного диспергирования) близка к удельной энергоемкости $\Delta H_{кр}^{ucn}$ фазового перехода вещества в критическом состоянии: $W_{\Delta V} \cong \Delta H_{кр}^{ucn} \cong 3RT_{кр}$ ($T_{кр}$ - критическая температура фазового перехода, R – универсальная газовая постоянная). Приведенные опытные данные позволяют считать величину $P_{кр}$ критического давления достоверной прогнозной оценкой прочности межатомных связей вещества (прочности на микроуровне) в энергетических полях любого вида.

Основной материал исследования. При анализе функционирования нагружаемой геологической среды необходимо особо отметить влияние масштабного фактора. Начало саморазрушения природных материалов при их нагружении всесторонним (объемным) сжатием связано с релаксацией напряжений за пределом прочности. Энергетику разрушения (развала сплошности образца) с образованием крупных отдельностей характеризует средняя критическая плотность W_V энергии в объеме нагружаемого образца, которая возрастает по мере уменьшения размера разрушаемого объекта (динамический размерный эффект).

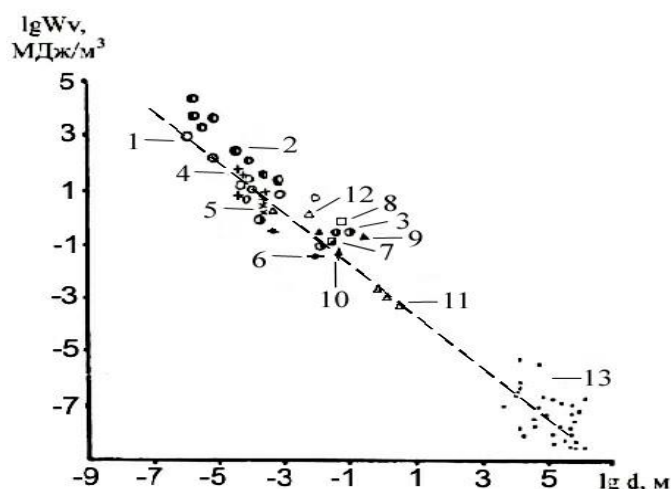
Закономерность, показанную на рис. 4, можно объяснить повышенной степенью трансформации накопленной веществом энергии в автоколебательное движение атомов при уменьшении масштаба разрушаемого объекта.

Изменение критической плотности W_V энергии с преимущественным размером d разрушения происходит при условии соблюдения константы произведения плотности энергии W_V на преимущественный размер d разрушения [9] согласно соотношению:

$$\begin{aligned} W_V d &\approx \gamma_s \approx const; \\ \gamma_s &\cong 3 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{м}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Экспериментальные данные подтверждают соотношение (5) в широком диапазоне изменения размеров и свойств гетерогенных материалов (мрамор, уголь, кварц, стекло, порфир, диабаз, габбро, клинкер) в природных видах раз-

рушения (горные удары, землетрясения) и в производственных технологиях (взрывание, бурение, дробление, измельчение).



1-8 - нагружение сжатием кварца, стекла, мрамора, клинкера, порфира, угля, габбро, диабаз; 9 - бурение; 10 - взрывание; 11 - разрывы при горных ударах; 12 - удар на копре; 13 - разрывы при землетрясениях

Рисунок 4 - Зависимость удельной энергии W_v разрушения от размера объекта и вида разрушения

- для пластичных природных материалов.

Особенности поведения нагружаемых пород за пределом прочности изучались на установке УНТС А.Д. Алексева [17] методом неравнокомпонентного трехосного сжатия. Использование программы пропорционального нагружения позволило довести образец до максимального напряжения, а затем разгрузкой по одной оси - до потери максимальной сопротивляемости.

Запредельную стадию деформирования и разрушения можно охарактеризовать тремя принципиально отличными составляющими по эффектам дезинтеграции и диспергирования:

- 1) разрушение с микродиспергированием;
- 2) саморазрушение с быстрой разгрузкой напряжений и макродиспергированием;
- 3) разрушение с пластическим деформированием и дроблением.

На рис. 5 показано изменение во времени τ активности $\dot{N}(\tau)$ АЭ и напряжений $\sigma(\tau)$ с ростом текущей деформации $\varepsilon(\tau)$ на примере трехосного неравнокомпонентного сжатия образца угля.

Видно, что с повышением уровня напряженно-деформированного состояния нагружаемого образца усиливается акустическое излучение, сопутствующее актам раскрытия и роста трещин. Полагаем, что величина деформации $\varepsilon_v = \Delta V/V$ за счет трещинообразования в нагружаемом объекте может служить прогноз-

Исследования показали, что ведущая роль в прогнозе эффектов разрушения (дезинтеграции, диспергирования) принадлежит активности \dot{N} акустической эмиссии (АЭ) на стадии запредельного деформирования нагружаемого объекта (\dot{N} - число сигналов в единицу времени). Для стадии спонтанного разрушения, протекающей с большой скоростью разуплотнения структуры (трещинообразования), характерно повышение активности АЭ на 2...4 порядка. Особо важно, что эффекты разрушения и диспергирования усиливаются с длительностью акустического затишья, в большей степени для хрупкой среды и в меньшей

ной оценкой количества образованных мелких фракций (характерного размера) в разрушенном продукте.

Протекание 3-й стадии (разрушение с микродиспергированием) характеризуется состоянием "акустического затишья" ($A3$) (признак приближения саморазрушения), которое проявляется релаксацией напряжений на графике $\sigma(\tau)$, и участком неизменяющихся деформаций - на графике $\varepsilon(\tau)$ – (по всем трем осям сжатия).

Прослеживаются следующие закономерности акустического излучения. За пределом прочности имеет место резкий спад $AЭ$ от $\dot{N} = 10^3 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ до $10 \dots 0 \text{ с}^{-1}$ с уменьшением амплитуды сигнала от 1,5...2 В до 30...40 мВ.

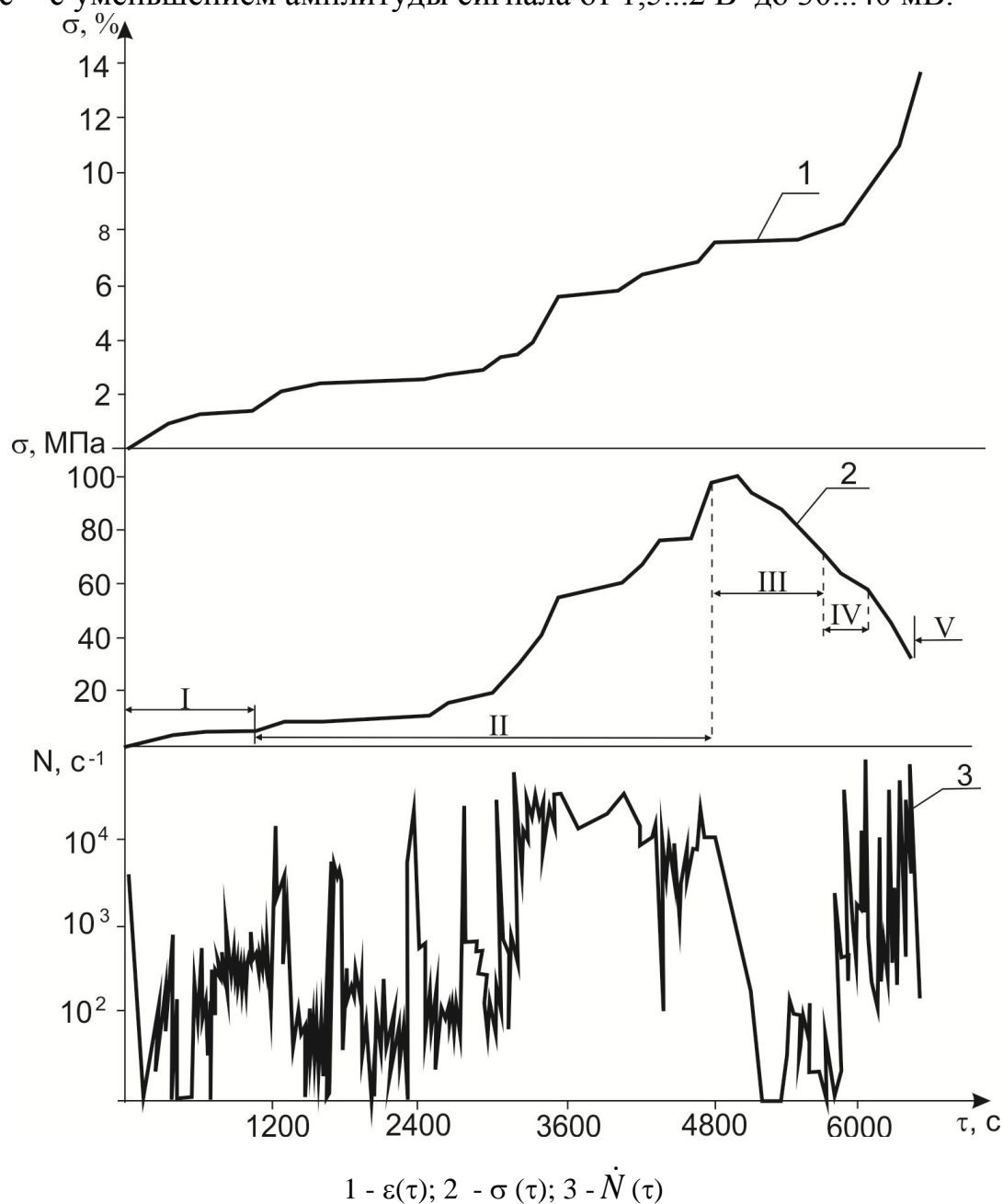


Рисунок 5 - Кинетика напряженно-деформированного состояния и акустической эмиссии в процессе трехосного неравнокомпонентного сжатия образца угля

Далее начинает интенсивно развиваться диспергирование некоторого макрообъема (макродиспергирование), приобретая характер спонтанного разрушения всего образца. Спонтанность разрушения на неустойчивой стадии (после выхода из стадии микродиспергирования) характеризуется ростом скорости разуплотнения структуры и повышением активности $AЭ$ на 2...4 порядка. Наблюдается рост деформаций ($\sim 30\%$ для талька и до $\sim 14\%$ - для угля) и продолжающийся спад напряжений вплоть до состояния остаточной прочности. Интенсивное развитие зоны диспергирования в нагружаемых объемным сжатием образцах гетерогенных материалов сопровождается повышением активности акустической эмиссии на 2-4 порядка с преимущественным накоплением малоамплитудных акустических сигналов [9].

Эффекты разрушения (дезинтеграции, диспергирования) усиливаются пропорционально длительности $AЗ$ τ_{AZ} и выражены в большей степени в хрупкой среде по сравнению с пластичным материалом, например, для угля $\tau_{AZ} = 720$ с, для талька $\tau_{AZ} = 200$ с. Гранулометрические анализы подтвердили правильность предпосылок прогноза по выделенному акустоэмиссионному признаку. Количество мелких и тонкодисперсных фракций растет пропорционально τ_{AZ} : для угля содержание фракций менее 500 и 100 мкм составляет $\beta_{.500} = 10,2\%$, $\beta_{.100} = 2,2\%$, для талька $\beta_{.500} = 4,5\%$, $\beta_{.100} = 1\%$. Соответственно изменяется удельная поверхность измельченных частиц: $\Delta S/V = 7690 \text{ м}^2/\text{м}^3$ - уголь, $\Delta S/V = 2830 \text{ м}^2/\text{м}^3$ - тальк. Таким образом, с увеличением длительности акустического затишья за пределом прочности можно прогнозировать более сильные эффекты разрушения (диспергирования).

Проведенные опыты показали влияние масштабного фактора на величину суммарного счета N_{Σ} и удельного (в единице объема) числа N_V акустических сигналов, установленное при действии высоких боковых давлений или при одноосном сжатии. С увеличением размера нагружаемого образца ослабевает удельное акустическое излучение, и этот результат согласуется с теоретическими выводами и опытными данными разрушения различных масштабов [9].

Выводы.

1. Основу формирования эффектов трещинообразования, дезинтеграции и диспергирования в нагружаемой геологической среде составляют следующие физические принципы, развитые и признанные в науке разрушения:

- принцип концентрационного укрупнения трещин;
- автоколебательная концепция предразрушающего состояния;
- авторезонансный механизм разрушения нагруженного объекта.

2. При функционировании нагружаемой геологической среды с ростом масштаба разрушения (размера объекта) наблюдаются следующие закономерности:

- уменьшение деформации ε на пределе прочности;
- увеличение K - концентрационного критерия разрушения;
- уменьшение W_V - средней критической плотности энергии при разрушении;

- уменьшение удельного счета сигналов акустической эмиссии при разрушении.

3. Для прогнозной оценки эффектов разрушения (трещинообразования, дезинтеграции, диспергирования) нагружаемой геосреды рекомендуется использовать следующие физические закономерности:

- масштабный эффект деформации трещинообразования;
- размерный эффект концентрационного критерия разрушения (в диапазоне масштабов разрушения пород $D(m) = 10^{-4} - 10^1$);
- динамический размерный эффект: $W_V d \cong const$; $W_V d \cong \gamma_s$; $\gamma_s \cong 3 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{м}^2$;
- соотношение величин средней и локальной критической плотности энергии разрушения: $W_{\Delta V} = W_V / \varepsilon = W_V K^3 \kappa_\phi$;
- пропорциональное увеличение эффектов разрушения (диспергирования) с длительностью акустического затишья $\tau_{\text{АЗ}}$ и величиной активности акустической эмиссии на запредельной стадии деформирования и разрушения.

4. Основными параметрами, характеристиками, критериями и показателями функционирования нагружаемой геосреды следует считать:

- размер нагружаемого образца;
- относительную деформацию ε трещинообразования на пределе и за пределом прочности;
- деформация на стадии авторезонанса $-\varepsilon_i$;
- параметр формы трещин $-\kappa_\phi = l/\delta$;
- концентрационный критерий K ;
- кинетика акустической активности $\dot{N}(\tau)$ и длительность акустического затишья за пределом прочности;
- термодинамические характеристики вещества геосреды в критическом состоянии (критическое давление $P_{кр}$ и температура $T_{кр}$) $W_{\Delta V} \cong \Delta H_{кр}^{ucn} \cong 3 R T_{кр}$;
- критическая величина средней W_V и локальной $W_{\Delta V}$ плотности энергии при разрушении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский, М.А. Сейсмический процесс в блоковой среде / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко. – М.: Наука, 1991. – 100 с.
2. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. – М.: Наука. – 1993. – 311с.
3. Ружич, В.В. Современная сеймотектоническая деструкция земной коры Байкальской рифтовой зоны и ее прогнозирование: дис... д-ра геол.-мин. наук: 04.00.04 / В.В.Ружич. – Иркутск: Ин-т земной коры., 1996.- 43 с.
4. Куксенко, В.С. Микромеханика разрушения материалов: дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07/ В.С. Куксенко. – Л.: Ин-т высокомолек. соедин., 1977.- 36 с.
5. Фролов, Д.И. Изучение динамики слияния микротрещин методом акустической эмиссии / Д.И. Фролов, Р.Ш. Килькеев, В.С. Куксенко // Механика композитных материалов.- 1981.- № 1. - С. 116.
6. Манжиков, Б.Ц. Индуцированная сейсмичность и удароопасность шахтных полей: дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.07 / Б.Ц. Манжиков. – Бишкек: Ин-т физики и механики горн. пород, 1997. - 33с.
7. Щербаков, И.П. Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита / И.П. Щербаков, В.С. Куксенко, А.Е. Чмель // ФТПРПИ. – 2012. - № 4. – С. 78-82.
8. Герман, В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга / В.И. Герман // ФТПРПИ. – 2014. - № 2. – С. 99-109.

9. Горобец, Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: дис.... д-ра техн. наук: 05.15.08: защищена 08.10.04 / Л.Ж. Горобец. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – 35 с.
10. Петров, В.А. Размерный эффект концентрационного порога разрушения / В.А. Петров, Л.Ж. Горобец // Изв. АН СССР. Физика земли. - 1987. - № 1. - С. 95-98.
11. Чупрынин, В.И. Разрывные автоколебания в геофизических системах/ В.И. Чупрынин. – М : Наука, 1983. - 92 с.
12. Бовенко, В.Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / В.Н. Бовенко. – М: МИЭМ, 1990. - 30 с.
13. Бовенко, В.Н. О проявлении дискретности твердых тел / В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец // ДАН СССР. - 1987. - Т. 292, № 5. - С. 1095-1100.
14. Бовенко, В.Н. Дискретно-волновая природа диспергирования / В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец // Науковий вісник НГУ. - 2008. - № 1. – С. 7-9.
15. Горобец, Л.Ж. Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения / Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко // ФТПРПИ. - 1986. - № 5. – С. 109-111.
16. Лютый, А.И. О термодинамических характеристиках критического состояния веществ / А.И. Лютый, Л.Ж. Горобец, С.Б. Дуброва // Физика и техника высоких давлений. – 1997. - № 1.– С. 3-8.
17. Алексеев, А.Д. Предельное состояние горных пород / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев. – Киев: Наук. думка, 1982. – 197 с.

REFERENCES

1. Sadovskiy, M.A. and Pisarenko, V.F. (1991), *Seismicheskiy protsess v blokovoy srede* [A seismic process in a block environment], Nauka, Moscow, Russia.
2. Sobolev, G.A. (1993), *Osnovy prognoza zemletryaseniy* [Fundamentals of earthquake prediction], Nauka, Moscow, Russia.
3. Ruzhich, V.V. (1996), “Modern seysmotectonic destruction of the earth's crust of the Baikal riftzone and its prognostication”, Abstract of Ph.D. dissertation, geology, Institute of the earth's crust, Irkutsk, Russia.
4. Kuksenko, V.S. (1977), “Mikromekhanika of destruction of materials”, Abstract of Ph.D. dissertation, Fiz.mat., Institute of vysokomolekulyarnykh. soedineniy, Leningrad, USSR.
5. Frolov, D.I., Kilkeev, R.Sh. and Kuksenko, V.S. (1981), “Study of dynamics of confluence of mikro-rift the method of acoustic emission”, *Mechanics of composite materials*, no. 1, pp. 116.
6. Manzhikov, B.C. (1997), “Induced seismicity and rockburst hazard of the mine fields”, Abstract of Ph.D. dissertation, Fiz.mat., Institute of physics and mechanics is a furnace breeds, Kirgiziya.
7. Scherbakov, I.P., Kuksenko, V.S. and Chmel, A.E. (2012), “The accumulation stage of signals of acoustic emission at compression and shock destruction of granite”, *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, no. 4, pp. 78-82.
8. German, V.I. (2014), “Prognosis of bringing down on mineries from data of the seismic monitoring”, *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, no. 2, pp. 99-109.
9. Gorobets, L.Zh. (2004), “Development of scientific foundation for the solid minerals grinding”, Abstract of D.Sc. dissertation, Mineral dressing, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.
10. Petrov, V.A., Gorobec, L.Zh. (1987), “The size effect of concentration threshold of destruction”, *Izvestiya AS THE USSR. Physics of earth*, no. 1, pp. 95-98.
11. Chuprynin, V.I. (1983), *Razryvnye avtokolebaniya v geofizicheskikh sistemakh* [Break self-excited oscillations in geophysical systems], Nauka, Moscow, USSR.
12. Bovenko, V.N. (1990), “The synergetics effects and conformities to law of relaxation vibrations in a state of pre-destruction of solid”, Abstract of D.Sc. dissertation, Fiz.mat., Institute MIEM, Moscow, USSR.
13. Bovenko, V.N. and Gorobets, L.Zh. (1987), “About the display of discreteness of solids”, *DAN of the USSR*, vol. 292, no. 5, pp. 1095-1100.
14. Bovenko, V.N. and Gorobets, L.Zh. (2008), “Discrete-wave nature of dispergating”, *Naukoviy visnyk NGU*, no. 1, pp. 7-9.
15. Gorobets, L.Zh. and Bovenko, V.N. (1986), “Determination of dependence energy density from the size of destruction”, *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, no. 5, pp. 109-111.
16. Lyutyuy, A.I., Gorobets, L.Zh. and Dubrova, S.B. (1997), “About thermodynamics descriptions of critical condition of matters”, *Physics and technique of high pressures*, no 1, pp. 3-8.
17. Alekseev, A.D. and Nedodaev, N.V. (1982), *Predelnoe sostoyanie gornykh porod* [The maximum state of mountain breeds], Naukova dumka, Kiev, USSR.

Об авторах

Горобець Лариса Жановна, доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепр, Украина, larisa-gorobets@rambler.ru.

Верхоробина Инна Владимировна, магистр, ведущий инженер в отделе геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, inna_kuchuk@ukr.net.

About the authors

Gorobets Larisa Zhanovna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepr, Ukraine, larisa-gorobets@rambler.ru.

Verkhorobina Inna Vladimirovna, Master of Sciences, Principal Engineer of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, inna_kuchuk@ukr.net.

Анотація. Проведено узагальнення фізичних явищ і закономірностей еволюції геологічного середовища при навантаженні. В утворенні і розвитку мікротріщин, фрагментів і окремих частин провідна роль відводиться гетерогенності тіла, що руйнується. Аналізується вплив масштабу об'єкту при руйнуванні на величину деформації, щільність енергії і акустичну емісію. Розглянуто відмінності механізму руйнування геосередовища в мікро- і макросистемах. Обґрунтовано інформативні параметри критичного стану речовини на позамежній стадії деформації і руйнування із застосуванням методу акустичної емісії. Виявлено принципи, критерії і показники функціонування геосередовища при навантаженні. Енергетика руйнування природних середовищ характеризується динамічним масштабним ефектом. Вказані практичні можливості оцінки ефектів руйнування (тріщиноутворення, дезінтеграції, диспергування) на основі знання кінетики позамежної деформації і акустичної активності геосередовища при навантаженні. Наприклад, зі збільшенням тривалості акустичного затишшя за межею міцності можна прогнозувати сильніші ефекти руйнування (диспергування).

Ключові слова: геологічне середовище, руйнування, щільність енергії, акустична емісія, авторезонанс.

Annotation. Generalization of the physical phenomena and conformities to law of evolution of the loaded geological environment is conducted. In appearance and growth of mikrocracks, fragments and particles a leading role is taken heterogeneity of the destroyed object. Influence of size of the destroyed object is analysed on the deformation, energy-critical density and acoustic emission. The differences of geological breed destruction mechanism are considered in mikro- and macro-systems. The informing parameters of material critical stage are carried out after tensile strength and destruction with the use of method of acoustic emission. The foundations, criteries and modes of functioning of rock are exposed. Energy of rock destruction is described by means of dynamic size effect.

Practical possibilities of destruction effects estimation (formation of cracks, disintegrations, dispersing) on the basis of deformation and acoustic activity kinetics of loaded geological environment are carried out. For example, with the increase of acoustic calm duration after tensile strength it is possible to forecast the prepotent effects of destruction (dispersing).

Keywords: geological environment, destruction, energy-critical density, acoustic emission, autotresonance.

Статья поступила в редакцию 17.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Блюссом Б.А.