

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ АКТОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе,
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия*

В данной работе проведено экспериментальное и теоретическое изучение интервалов времени Δt между двумя последовательными актами трещинообразования в гетерогенных материалах. Метод акустической эмиссии (АЭ) позволил проводить дифференцированное изучение кинетики трещинообразования в нагруженных гетерогенных материалах. При этом генерация микротрещин предстает как статистический процесс. Изучение интервалов времени Δt между последовательными актами микро-разрушения выявило два его типа: одиночный и коллективный разрывы. Гетерогенность материала определила некоторые общие характеристики в зоне разрушения процесса, а именно закономерности зарождения и развития процесса трещинообразования, и выявила в этом явлении два весьма важных аспекта: первый — структурная гетерогенность материалов приводит к неравномерности в распределении механических напряжений в нагруженном теле, создавая при этом достаточно высокие локальные напряжения на микроуровне (это способствует появлению микротрещин в перенапряженных местах); второй — показана принципиальная возможность применения этого метода для прогнозирования акта очага разрушения, а также возможности микросейсмического мониторинга, прогнозирование катастроф в объектах удара — опасных рудниках, туннелях, мостах, атомных электростанциях и других важных стратегических объектах.

Зона разрушения процесса, трещина, прогноз, акустическая эмиссия, очаг, микросейсмический мониторинг.

FRACTURE IN HETEROGENEOUS MATERIALS: EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES

V.S. Kuksenko and Kh.F. Makhmudov

The kinetics of fracture in stressed heterogeneous materials is investigated in a differentiated way using the parameter Δt , the interval between single or multiple (cooperative) microfracture events recorded by acoustic emission (AE) responses. The patterns of fracture nucleation and growth, which is a statistic process, are controlled by the heterogeneity of deforming material. There are two important aspects revealed by the study: 1) structural heterogeneity of materials causes uneven distribution of stress in loaded solids and thus creates local zones of microstress and ensuing microfracture in the overstressed zones; 2) AE measurements and microseismic monitoring are applicable to prediction of fracture by locating its source and thus allows predicting related hazard in mines, tunnels, bridges, nuclear-power plants, and other important engineering objects.

Zone of brittle failure, fracture, prediction, acoustic emission, fracture source, microseismic monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение гетерогенных твердых тел является достаточно сложным явлением, и имеются многочисленные исследования элементов этого процесса [Smirnov, Ponomarev, 2004; Махмудов, Куксенко, 2005; Адушкин и др., 2007; Soloviev, Spivak, 2009; Носов, Лаврин, 2012; Гульельми и др., 2014; Куксенко и др., 2014; Щербаков, Чмель, 2014; Опарин и др., 2015; Потанина и др., 2015; Соболев и др., 2015; Лукичев и др., 2015; Викулин и др., 2016] на атомном, микроскопическом, мезоскопическом, макроскопическом уровнях [Гезалов и др., 1969; Журков и др., 1981; Петров, 1983; Садовский и др., 1987; Chen et al., 1993; Ponomarev et al., 1997; Носов, Бураков, 2004; Xing et al., 2004; Beeler, 2004; Corrêa, Nascimento, 2005; Ammon et al., 2008; Kuksenko et al., 2009; Cai, Liu, 2009; Dresen et al., 2010; Носов, Ельчаинов, 2011; Baddari et al., 2012].

Разрушение твердых тел является термоактивационным процессом [Журков, 1968; Регель и др., 1974; Махмудов, 2011], в котором определяющую роль играет зарождение и развитие микротрещин

[Гезалов, 1969; Лексовский и др., 2013; Щербаков и др., 2013]. Впервые наиболее детально процесс трещинообразования экспериментально исследован в полимерных материалах. Установлены [Журков и др., 1981; Петров, 1983] две характерные стадии микроразрушения. На первой стадии происходит делокализованное накопление одиночных стабильных трещин в объеме тела, приводящее вследствие концентрационных флуктуаций к образованию очага разрушения. Вторая стадия определяется локализованным ростом очага, заканчивающимся появлением магистральной трещины и разрушением образца [Тамуж, Куксенко, 1978; Куксенко и др., 2007, 2010]. На опыте трещинообразование обычно изучается интегрально [Ставрогин, Протосеня, 1992; Байкова и др., 2008], т. е. регистрируется появление некоторого числа разрывов за выбранный промежуток времени. При этом утрачивается информация об индивидуальности трещин и дискретном характере их генерации. Такого недостатка лишен метод акустической эмиссии (АЭ) [Куксенко и др., 1985; Lockner et al., 1986; Simpson et al., 1988; Stanchits et al., 2003], позволяющий для каждого акта образования i -й микротрещины в нагруженном теле указать его время появления t_i и параметры вызванного трещинообразованием акустического сигнала (АС), например, его амплитуду A_i и длительность T_i . Это открывает возможность дифференцированного исследования кинетики зарождения и развития микротрещин [Utsu et al., 1995; Lockner, Stanchits, 2002; Shapiro et al., 2002; Vinciguerra et al., 2005; Stanchits et al., 2006; Мансуров и др., 2009; Wan et al., 2009; Wang et al., 2011].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Система регистрации АЭ позволяла в реальном масштабе времени измерять амплитудно-временные параметры каждого АС, превышающего выбранный порог дискриминации. Колебания распространяются от источника излучения к датчику (датчикам), где они преобразуются в электрические сигналы. АЭ прибор А-Line 32D (PCI-8E) [Махмудов, 2012] регистрирует эти сигналы и отображает данные на экране в виде осциллограмм, локаций, цифровых индикаций, на основе которых оператор может оценить состояние и поведение структуры материала под напряжением, обнаружить и определить местонахождение дефектов. Пьезоприемник собственной конструкции (датчики 1, 2), имеющий полосу пропускания в области 5 МГц — 100 кГц, крепили к боковой поверхности образца или монтировали в тензоблок. При нагружении образца генерируемый АС достигал пьезоприемника. Преобразуемый в электрический АС после усиления подвергался обработке на приборе А-Line 32D (PCI-8E), т. е. формировались стандартные импульсы, амплитуды и длительности которых были пропорциональны амплитуде и длительности огибающей АС. Далее стандартные импульсы поступали на амплитудный и временной кодировщики анализатора импульсов, а затем после цифровой обработки в виде 12-разрядного двоичного кода направлялись в ЭВМ для анализа и хранения. В результате для каждого АС поступала информация о времени появления сигнала, амплитуде и длительности его огибающей. Алгоритм метода представлен на рис. 1.

Изучали два типа образцов. Первый — пористое стекло (пороситалл) — является модельным композитным материалом, в котором матрицей служит стекло, а включением — поры. Расстояние между порами соизмеримо с их диаметром и в среднем было порядка 0.1 мм. При одноосном сжатии цилиндрических образцов из пористого стекла элементарным актом разрушения является разрыв перемычки между ближайшими порами. Второй тип — однонаправленные органопластики. Их нагружение проводили одноосным растяжением. Для этого материала элементарными актами микроразрушения являлись разрывы отдельных армирующих волокон, а также отслоения волокон от матрицы. В обоих случаях нагружение проводили с постоянной скоростью деформирования. Возникающие при микроразрывах АС были достаточно мощными и легко регистрировались пьезоприемником.



Рис. 1. Алгоритм автоматизированного метода статистической обработки данных.

1 — преобразователь АЭ (приемник 1); 2 — преобразователь АЭ (приемник 2); 3 — центральный блок сбора и обработки на базе промышленного компьютера; 4 — образец; t_1 — время прихода сигнала на первый приемник; t_2 — время прихода сигнала на второй приемник.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим интервал времени Δt между двумя последовательными микроразрывами. На опыте Δt оказывается случайной величиной, т. е. кинетика образования трещин имеет статистический характер. Гистограмма распределения Δt на начальном участке нагружения приведена на рис. 2.

Проведя преобразование в полулогарифмических координатах, можно графически показать, что данное распределение является показательным (для не слишком малых Δt). Такого распределения величины Δt следовало ожидать исходя из общих соображений. Действительно, пусть в теле имеется Q микроэлементов с функцией $p(t)$ времени t их жизни под нагрузкой. Это означает, что к моменту t разрушилось $q(t) = Qp(t)$ таких элементов. Следующий элемент разрушится в интервале $t, t + \Delta t$, где Δt — случайная величина. Найдем ее функцию распределения $f_t(\Delta t)$. Очевидно, $f_t(\Delta t) = 1 - \chi_t(\Delta t)$, где $\chi_t(\Delta t)$ — вероятность того, что интервал ожидания между двумя последовательными актами микро-разрушения больше Δt . Она равна вероятности неразрушения ни одного элемента в интервале $t, t + \Delta t$, т. е.

$$\chi_t(\Delta t) = [1 - \Delta p(t, \Delta t)]^{Q-q};$$

$$\Delta p(t, \Delta t) = p(t + \Delta t) - p(t) = \int_t^{t+\Delta t} \dot{p}(t') dt' = \dot{p}(t^*) \Delta t,$$

$t < t^* < t + \Delta t$, при малых Δp и больших $Q - q$, используя определение числа e (основания натуральных логарифмов);

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{a}{x} \right)^x = e^{-a},$$

асимптотически имеем $\chi = \exp(Q - q)\Delta p$,

откуда $f_t(\Delta t) = 1 - \exp Q[l - p(t)] \dot{p}(t^*) \Delta t$.

В случае малых $p \ll 1$ окончательно находим

$$f_t(\Delta t) = 1 - \exp(-\Delta t / \bar{\Delta t}); \quad \bar{\Delta t} = 1 / Q\dot{p}(t^*). \quad (1)$$

Таким образом, распределение интервалов времени Δt между двумя последовательными одиночными микроразрывами является показательным. Будучи контролируемой статистикой времен ожидания тепловых разрушающих флуктуаций функция $p(t)$ в условиях нагружения с постоянной скоростью роста напряжения $\dot{\sigma}$ при $p \ll 1$ есть [Петров, Горобей, 1978]

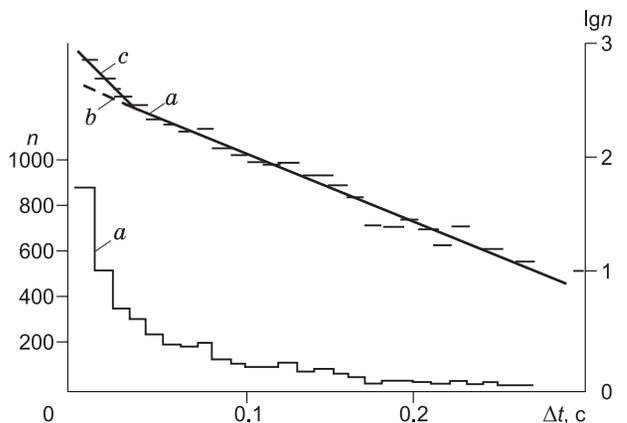
$$p(t) = \frac{\tau}{\Theta_0} (e^{t/\tau} - 1); \quad \tau = \frac{kT^0}{\gamma \dot{\sigma}}; \quad \Theta_0 = \tau_0 \exp \frac{U_0}{kT^0},$$

где τ_0, U_0, γ — параметры формулы Журкова [Журков, 1968], $T, ^\circ\text{C}$ — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана. Отсюда следует, что на начальной стадии

$$\dot{p}(t < \tau) = \frac{1}{\Theta_0},$$

Рис. 2. Зависимости числа n АС от интервала Δt между ними на начальном участке нагружения пористого стекла:

a — все сигналы; b — одиночные АС; c — коллективные АС.



т. е. процесс является стационарным (в распределении (1) среднее $\overline{\Delta t}$ и другие числовые характеристики не зависят от времени). При больших временах

$$\dot{p}(t > \tau) = \frac{1}{\Theta_0} e^{-t/\tau}$$

режим генерации микроразрывов становится нестационарным.

Выясним причину отклонения от показательного распределения, наблюдаемого на рис. 2, в области малых Δt . Обратимся к спектрам АС по их амплитудам A и длительностям T (рис. 3).

Можно видеть, что на двумерных распределениях выделяются две ветви: α и β . В обеих ветвях число АС уменьшается с ростом A и T . Однако для α -ветви наблюдается пропорциональная связь между A и T , тогда как для второй, β -ветви, такая связь отсутствует: для АС с малыми амплитудами наблюдаются аномально большие длительности. Специальными исследованиями было установлено, что первая ветвь обусловлена одиночными разрывами, а вторая — коллективным разрывом нескольких микроэлементов (перемычек, волокон) в некоторой неустойчивой области, инициируемым одиночным разрывом, как «спусковым крючком». Сепарирование одиночных и коллективных разрывов легко осуществляется по величине отношения A/T для АС. На рис. 2 приведены распределения по интервалам Δt для всех (одиночных и коллективных) АС. Для одиночных АС распределение практически совпадает с общей зависимостью, и лишь для малых Δt точки лежат на ее продолжении. Для коллективных АС вся зависимость находится в области малых Δt . Средний интервал времени Δt между одиночными разрывами в начале нагружения равен 0.05 с и затем уменьшается, а для коллективных разрывов $\Delta t_k = 0.01$ с и практически не зависит от Δt_0 , что отражает стимулированное происхождение коллективных АС. Дополнительную информацию дает анализ коэффициентов вариации v временных интервалов Δt . На рис. 4. они приведены в зависимости от номера выборки, т. е. фактически от текущего времени t для одиночных и коллективных АС.

Для одиночных АС коэффициент вариации v_0 на начальной стадии близок к 1, но на заключительной стадии величина v_0 резко возрастает и к моменту разрушения $v_0 = 3.5$. Для коллективных АС коэффициент вариации $v_k = 2...3$ с самого начала и со временем практически не изменяется вплоть до разрушения образца. Обсудим эти результаты. Для показательного распределения коэффициент вариации равен 1, так что результат $v_0 = 1$ следовало ожидать ввиду установленного ранее показательного характера распределения интервалов между одиночными АС. По-видимому, значения $v > 1$ свидетельствуют о действии нескольких различных статистических факторов. В случае показательного распределения (1), в котором величина Δt распределена логнормально с дисперсией d , что вызвано разбросом ряда локальных свойств элементов твердого тела, описываемым в силу теоремы Ляпунова нормальным распределением характеристического параметра $\gamma\sigma/kT^0$, согласно [Петров, Орлов 1975]

$$v = \sqrt{2e^d - 1}.$$

Таким образом, $v > 1$ при $d > 0$ и возрастает с ростом d . Ненулевые значения d , отражающие разброс прочностных свойств элементов тела, очевидно, присущи процессам в очагах разрушения, формирование которых обусловлено статистическими флуктуациями структурных условий и концентрации накопленных микротрещин. Это видно из данных для коэффициента вариации v_k интервалов между коллективными АС (см. рис. 3), согласно которым $v_k > 1$. Постоянство v_k со временем вполне естественно, поскольку коллективные АС отражают с самого начала очаговые процессы. В названном аспекте возрастание v_0 до уровня v_k означает переход от накопления делокализованных микроразрывов к стадии образования и роста очага разрушения. Поэтому возникновение неравенства $v_k > 1$ для одиночных АС и его усиление может использоваться для целей прогноза разрушения.

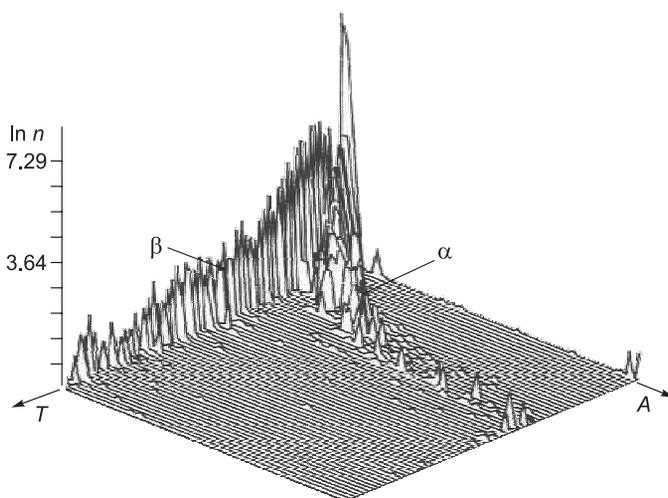
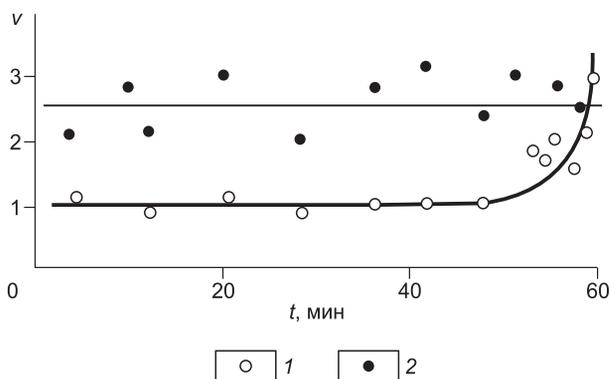


Рис. 3. Распределение числа n АС в пористалле по амплитуде A и длительности T .

Выделены ветви α и β , различающиеся по отношению A/T .

Рис. 4. Коэффициенты вариации v в временных интервалах между АС в различные моменты времени t :

1 — одиночные АС (v_0), 2 — коллективные АС (v_k).



Несмотря на то, что направления микромеханики разрушения гетерогенных материалов и прогнозирование макроскопического разрушения к настоящему времени развиты достаточно хорошо, тем не менее имеется еще очень много проблем как научных, так и практических. По каждому направлению рассмотрим несколько проблем, которые предстоит решать в будущем.

Кинетическая проблема прочности

Некоторые ограничения формулы Журкова [Журков, 1968]. Здесь отметим следующее: пока очень слабо развита кинетика разрушения при одновременном воздействии механического поля и других факторов, влияющих на процесс разрушения. Особенно важным является влияние окружающей среды, в том числе агрессивных сред. Мы прекрасно знаем, что практически все конструктивные материалы старятся даже без воздействия механического поля. Это старение резко ускоряется, когда материалы находятся в механическом поле. Кроме термических флуктуаций и разрывов сплошности под их воздействием в этих случаях протекают различные процессы, в частности электрохимические, которые резко изменяют поверхность соприкосновения с агрессивной средой. В принципе эти процессы являются также термоактивационными в ряде случаев, но в попытке описать эти усложненные условия разрушения к настоящему времени нет большого успеха. И это одна из важных научных проблем. Кроме того, эта проблема имеет огромную практическую значимость. Прежде всего, это связано с нефтедобычей и нефтеперерабатывающей промышленностью, газовой промышленностью, с работой конструкций в морской среде, выходом из строя в результате коррозии подводных, надводных судов и т.д.

Кроме того, имеется много конструкционных материалов достаточно хрупких, на которых формула Журкова не работает, выяснение причин этого также является важной научной и практической задачей. Тем не менее в целом мы полагаем, что сам принцип участия тепловых флуктуаций в процессе разрушения в самых различных слоях имеет место. И в будущем возможность описания процессов разрушения с единой позиции будет одним из наиболее интересных направлений.

Микромеханика разрушения твердых тел

Пока что микромеханика разрушения твердых тел наиболее успешно развита для полимерных материалов и частично для металлов и горных пород. Тем не менее в настоящее время имеется огромный спектр различных материалов, особенно новых конструкционных, в том числе композиционных, но еще недостаточно экспериментальных данных по накоплению и развитию микродефектов в них для того, чтобы основные положения микромеханики разрушения распространять и на эти материалы. Безусловно, структура материала, их физико-механические свойства, диапазон температурных условий эксплуатации привносят специфику в процесс разрушения. Это огромное поле научной и практической работы в будущем.

Прогнозирование макроскопического разрушения

Это направление является наиболее молодым из отмеченных. Оно появилось как естественное следствие в развитии первых двух направлений. И в принципе не могло быть без развития кинетического направления о науке прочности. Это прежде всего связано с кинетической концепцией прочности твердых тел, предложенной С.Н. Журковым [1968] и развитой его школой. Согласно уравнению С.Н. Журкова, долговечность нагруженного тела или время до его разделения на части можно рассчитать, если известны входящие в уравнение параметры. Впервые в выражениях для определения прочности появилось время, причем введено оно не произвольно, а как фундаментальный физический параметр. Пространственно-временные параметры подготовки землетрясений будут рассматриваться на основе кинетических представлений о прочности твердых тел и иерархической модели разрушения горных пород, неоднократно представляемых на сейсмологических и геофизических конференциях [Томилин, Куksenко, 2004; Kuksenko, 2005; Куksenко и др., 2007, 2010; Kuksenko и др., 2011; Махмудов и др., 2015; Менжулин и др., 2015].

В статье мы показали возможность подхода и модели решения микросейсмического мониторинга и прогнозирования катастроф. Более того, на ряде работающих объектов успешно проведена диагностика их работоспособности, и тем не менее решение этой проблемы в будущем [Соболев, Пономарев, 2003; Завьялов, 2005, 2006; Куксенко и др., 2007; Кочарян и др., 2011; Веттегрень и др., 2012; Беседина и др., 2013; Adushkin, Oparin, 2014; Носов, 2014; Махмудов и др., 2015; Мельников и др., 2015; Мельников, Козырев, 2015; Менжулин и др., 2015; Baddari et al., 2015; Stanchils et al., 2015; Адушкин и др., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До настоящего времени продолжают научные дискуссии о принципиальной возможности прогнозирования разрушения материалов. Однако сейчас можно с уверенностью сказать, что даже при наличии технических трудностей реализации задачи прогнозирования разрушения конкретных объектов и конструкций принципиальная возможность решения этой проблемы доказана. Кинетическая концепция прочности впервые показала, что разрушение нагруженного тела является термоактивированным процессом, а макроразрыв является лишь его завершающей стадией. Для одиночных микроразрывов распределение величины Δt является показательным с коэффициентом вариации $v_0 = 1$. Среднее значение Δt_0 в начале нагружения (с постоянной скоростью деформирования) не зависит от времени, а перед разрушением образца с ростом t убывает. При коллективном разрыве группы элементов материала (выявляемом по аномально малому отношению амплитуды акустического сигнала к его длительности) показательное распределение несправедливо и коэффициент вариации $v_k > 1$. Перед разрушением образца коэффициент вариации интервалов между одиночными разрывами v_0 резко возрастает и достигает (или превосходит) соответствующего значения v_k для коллективных разрывов. Это вызвано переходом в процессе трещинообразования от делокализованного накопления на стадию образования и роста очага разрушения. В качестве параметров, характеризующих пространственно-временные особенности разрушения, можно выбрать средние значения временных интервалов Δt между хронологически последовательными событиями и их коэффициентами вариации $v_{\Delta t}$, которые рассчитываются для скользящих выборок фиксированного размера. В этом случае критерием перехода процесса разрушения на очаговую стадию будет одновременное уменьшение Δt и увеличение $v_{\Delta t}$. Обратное синхронное изменение рассматриваемых статистических параметров свидетельствует о начале релаксации очаговой зоны. Все больше происходит катастроф в результате техногенной деятельности человека. Потребность же прогнозирования макроскопического разрушения огромна. Можно отметить, что микросейсмический мониторинг, а также прогнозирование катастроф могут избавить человечество не только от большого количества жертв, но и огромных экономических потерь.

ЛИТЕРАТУРА

Адушкин В.В., Будков А.М., Кочарян Г.Г. Особенности формирования зоны разрушения взрыва в массиве скальных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2007, № 3, с. 65—76.

Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // ДАН, 2016, т. 467, № 1, с. 86—90.

Байкова Л.Г., Пух В.П., Федоров Ю.К., Синани А.Б., Тихонова Л.В., Киреев М. Ф. Физика и химия стекла, 2008, т. 34, № 2, с. 162—170.

Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г. Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2013, № 5, с. 20—36.

Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г., Герус А.И., Долгая А.А. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела, 2016, т. 58, № 3, с. 547—557.

Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Динамика микротрещин и временные зависимости деформации поверхности гетерогенного тела (гранита) при ударе // Физика твердого тела, 2012, т. 54, № 7, с. 1342—1346.

Гезалов М.А., Куксенко В.С., Слуцкер А.И. Образование субмикроскопических трещин в полимерах под нагрузкой // Физика твердого тела, 1969, т. 11, вып. 2, с. 296—302.

Гульельми А.В., Зотов О.Д., Завьялов А.Д. Динамика афтершоков Суматра-Андаманского землетрясения // Физика Земли, 2014, № 1, с. 66—77.

Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности // Вестник АН СССР, 1968, № 3, с. 46—52.

Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР, 1981, т. 259, № 6, с. 1350—1353.

Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // Физика твердого тела, 2005, т. 47, № 6, с. 1000—1008.

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. М., Наука, 2006, 256 с.

Козырев А.А., Журавлева О.Г., Федотова Ю.В. О кластеризации сейсмических событий при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2015, № 2, с. 108—113.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования малопрочных тонких слоев геоматериалов // Физическая мезомеханика, 2011, т. 14, № 6, с. 63—70.

Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Мансуров В.А., Микулин В.А. Закономерности развития микроочага разрушения // Физика земли, 1985, № 7, с. 87—93.

Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. Прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии // Письма в Журнал технической физики, 2007, т. 33, № 2, с. 31—35.

Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.Ц. Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2010, № 4, с. 29—40.

Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Ильинов М.Д., Абдурахмонов З.М. Микроскопический анализ образцов мрамора (CaCO_3) в условиях объемного сжатия // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2014, № 3 (20), с. 98—108.

Лексовский А.М., Губанова Г.Н., Юдин В.Е., Баскин Б.Л. Коллективные эффекты в системе дефектов масштаба структурного элемента при деформировании гетерогенного материала регулярного строения // Журнал технической физики, 2013, т. 83, № 6, с. 122—127.

Лукичев С.В., Наговицын О.В., Семенова И.Э., Белгородцев О.В. Подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ в системе MINEFRAME // Горный журнал, 2015, № 8, с. 53—58.

Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З., Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2009, № 4, с. 55—59.

Махмудов Х.Ф. Термоактивационный механизм релаксации механоэлектрических эффектов в твердых диэлектриках // Журнал технической физики, 2011, т. 81, № 1, с. 76—81.

Махмудов Х.Ф. Поляризация мрамора в поле упругих сил при различных температурах // Деформация и разрушение материалов, 2012, № 8, с. 41—45.

Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков // Физика твердого тела, 2005, вып. 47, т. 5, с. 856—859.

Махмудов Х.Ф., Менжулин М.Г., Захарян М.В., Султонов У., Абдурахманов З.М. Диагностика потери устойчивости нагруженных конструкций и развитие очагов разрушения при воздействии сейсмозрывных и ударных воздушных волн // Журнал технической физики, 2015, т. 85, № 11, с. 79—85.

Мельников Н.Н., Козырев А.А. Изменение геодинамического режима геологической среды при ведении крупномасштабных горных работ на глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 56, 2015, с. 7—23.

Мельников Н.Н., Козырев А.А., Панин В.И. Техногенная сейсмичность — опасный антропогенный фактор при ведении горных работ в высоконапряженных массивах // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2015, № 5, с. 425—433.

Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Томилин Н.Г., Бенин А.В., Султонов У., Абдурахманов З.М. Диагностика потери устойчивости нагруженных железобетонных конструкций и развитие очагов разрушения при воздействии сейсмозрывных ударных воздушных волн // Научное обозрение, 2015, № 24, с. 37—46.

Носов В.В. Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия, 2014, № 12, с. 24—35.

Носов В.В., Бураков И.Н. Микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов // Дефектоскопия, 2004, № 2, с. 53—61.

Носов В.В., Ельчанинов Г.С. Влияние неоднородности прочностного состояния на акустическую эмиссию конструкционных материалов // Дефектоскопия, 2011, № 12, с. 55—66.

- Носов В.В., Лаврин В.Г.** Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатанной полосы методом акустической эмиссии // Дефектоскопия, 2012, № 3, с. 18—26.
- Опарин В.Н., Востриков В.И., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н.** Измерительная система и испытательный стенд для контроля эволюции акустодоформационных и тепловых полей, индуцируемых в процессах флюидоразрушения твердых тел // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2015, № 3, с. 180—191.
- Петров В.А.** Термодинамический подход к микромеханике разрушения твердых тел // Физика твердого тела, 1983, т. 25, вып. 10, с. 3110—3112.
- Петров В.А., Орлов А.Н.** Термофлуктуационная природа разброса долговечности твердых тел под нагрузкой // Физика твердого тела, 1975, т. 17, вып. 3, с. 787—794.
- Петров В.П., Горобей Н.Н.** Статистика тепловых разрушающих флуктуаций в нестационарных условиях // Физика твердого тела, 1978, т. 20, вып. 11, с. 3505—3508.
- Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Любушин А.А., Шозиев Ш.П.** Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования // Физика Земли, 2015, № 2, с. 126—138.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.** Кинетическая природа прочности твердых тел. М., Наука, 1974, 560 с.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренков В.Ф.** Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., Наука, 1987, 100 с.
- Соболев Г. А., Пономарев А. В.** Физика землетрясений и предвестники. М., Наука, 2003, 270 с.
- Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Ружич В.В., Киреев С.М., Смутьская А.И., Мамалимов Р.И., Кулик В.Б.** Исследование нанокристаллов зеркала скольжения из зоны сейсмодислокации // Геофизические исследования, 2015, т. 16, № 4, с. 5—14.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.** Механика деформирования и разрушения горных пород. М., Недра, 1992, 270 с.
- Тамуж В.П., Куксенко В.С.** Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига, Зинатне, 1978, 294 с.
- Томилин Н.Г., Куксенко В.С.** Статистическая кинетика разрушения горных пород: энергетическая иерархия процесса // Физика Земли, 2004, № 10, с. 16—25.
- Щербаков И.П., Чмель А.Е.** Ударное разрушение гранитов в диапазоне температур 20—500 °С // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (10), с. 1543—1549.
- Щербаков И.П., Куксенко В.С., Чмель А.Е.** Особенности временной корреляции образования трещин при ударном разрушении горных пород // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (2), с. 302—308.
- Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part III // J. Min. Sci., 2014, v. 48, № 2, p. 203—222.
- Ammon C.J., Kanamori H., Lay T.** A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril islands // Nature, 2008, v. 451, № 7178, p. 561—565.
- Baddari K., Frolov A.D., Tourtchine V., Makdeche S., Rahmoune F.** Effect of temperature on the physical precursors of rock block failure // Acta Geophys., 2012, v. 60, № 4, p. 1007—1029.
- Baddari K., Frolov A. D., Tourtchine V., Rahmoune F., Makdeche S.** Effect of stress-strain conditions on physical precursors and failure stages development in rock samples // Acta Geophys., 2015, v. 63, № 1, p. 62—102.
- Beeler N. M.** Review of the physical basis of laboratory-derived relations for brittle failure and their implications for earthquake occurrence and earthquake nucleation // Pure Appl. Geophys., 2004, v. 161, № 9-10, p. 1853—1876.
- Cai M., Liu D.** Study of failure mechanisms of rock under compressive-shear loading using real-time laser holography // Int. J. Rock Mechan. Min. Sci., 2009, v. 46, № 1, p. 59—68.
- Chen F., Chen D.-Y., Cao Q.-P., Yu S.-J., Xu D.-J., Chen C.-X., Yu Y.-L., Sheng J.-H.** Study on the property of apparent resistivity changes of rock samples by in situ shear and friction test // Acta Seismol. Sinica, 1993, v. 6, № 3, p. 721—729.
- Corrêa C.C., Nascimento R.S.V.** Study of shale-fluid interactions using thermogravimetry // J. Therm. Anal. Calorim., 2005, v. 79, № 2, p. 295—298.
- Dresen G., Stanchits S., Rybacki E.** Borehole breakout evolution through acoustic emission location analysis // Int. J. Rock Mechan. Min. Sci., 2010, v. 47, № 3, p. 426—435.
- Kuksenko V.S.** Diagnostics and forecasting of breakage of large-scale objects // Phys. Solid State, 2005, v. 47, № 5, p. 812—816.
- Kuksenko V.S., Makhmudov Kh.F., Mansurov V.A., Sultonov U., Rustamova M.Z.** Changes in structure of natural heterogenous materials under deformation // J. Min. Sci., 2009, v. 45, № 4, p. 355—358.

- Kuksenko V.S., Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G.** Fracture of granite under various strain conditions // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2011, v. 47, № 10, p. 879—885.
- Lockner D.A., Stanchits S.A.** Undrained poroelastic response of sandstones to deviatoric stress change // *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, 2002, v. 107, № 12, p. ETG 13-1—13-14.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., Ponomarev A.V.** Stick slip, charge separation and decay // *Pure Appl. Geophys. PAGEOPH*, 1986, v. 124, № 3, p. 601—608.
- Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A.** Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones // *Tectonophysics*, 1997, v. 277, № 1—3, p. 57—81.
- Shapiro S.A., Rothert E., Rathz V., Rindschwentner J.** Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced micro-seismicity // *Geophysics*, 2002, v. 67, p. 212—220.
- Simpson D.W., Leith W.S., Scholz C.H.** Two types of reservoir-induced seismicity // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1988, v. 78, № 6, p. 2025—2040.
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V.** Seismic regime relaxation properties from in situ and laboratory data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2004, v. 40, № 10, p. 807—816.
- Soloviev S.P., Spivak A.A.** Electromagnetic signals generated by the electric polarization during the constrained deformation of rocks // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2009, v. 45, № 4, p. 347—355.
- Stanchits S.A., Lockner D.A., Ponomarev A.V.** Anisotropic changes in *P*-wave velocity and attenuation during deformation and fluid infiltration of granite // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 2003, v. 93, № 4, p. 1803—1822.
- Stanchits S., Vinciguerra S., Dresen G.** Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite // *Pure Appl. Geophys.*, 2006, v. 163, № 5—6, p. 975—994.
- Stanchits S., Burghardt J., Surdi A.** Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission // *Rock Mech. Rock Engin.*, 2015, v. 48, p. 2513—2527.
- Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura, R.S.** The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // *J. Phys. Earth*, 1995, v. 43, № 1, p. 1—33.
- Vinciguerra S., Trovato C., Meredith P.G., Benson P.M.** Relating seismic velocities, thermal cracking and permeability in Mt. Etna and Iceland basalts // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2005, v. 42, № 7—8, p. 900—910.
- Wan Z.-J., Zhao Y.-S., Zhang Y., Wang C.** Research status quo and prospection of mechanical characteristics of rock under high temperature and high pressure // *Procedia Earth Planet. Sci.*, 2009, v. 1, № 1, p. 565—570.
- Wang D.-Y., Wu G., Ge X.-R.** Acoustic emission characteristics of limestone during compression and fracture after high temperature // *J. Shanghai Jiaotong Univer.*, 2011, v. 45, p. 743—748.
- Xing J., Sheno R.A., Wilson P.A., Xing J.T.** Fluid flow through porous media subjected to a boundary condition of variable pressure // *Proc. R. Soc. London, Series A*, 2004, v. 460, p. 1905—1920.

*Рекомендована к печати 1 сентября 2016 г.,
А.Э. Конторовичем*

*Поступила в редакцию 30 сентября 2015 г.,
после доработки — 13 июля 2016 г.*