ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 1, с. 87–93

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.343

О ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА РАЗРУШЕНИЯ, ОЦЕНЕННОГО РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

© 2021 г. Л. Р. Ботвина[1,*], А. Д. Завьялов[2], И. О. Синев[1,3]

Представлено академиком РАН О.А. Банных 01.10.2020 г.
Поступило 02.10.2020 г.
После доработки 06.11.2020 г.
Принято к публикации 06.11.2020 г.

Получены временные зависимости концентрационного параметра разрушения, характеризующего процесс накопления дефектов, образующихся в нагружаемых объектах – образцах сталей в лабораторных экспериментах и в очаговой зоне сильного землетрясения. При растяжении образцов из конструкционных сталей концентрационный параметр разрушения оценивали по количеству и длине микротрещин (k_c) и по числу и энергии сигналов акустической эмиссии (k_{ae}). При анализе сейсмичности параметр k_{sf} определяли по потоку сейсмических событий, зарегистрированных в процессе многолетнего мониторинга сейсмичности в очаговой зоне одного из сильных землетрясений Камчатки. Установлено, что временные зависимости концентрационных параметров, полученных в условиях лабораторных экспериментов на металлических образцах и в условиях реального сейсмоактивного региона, отвечают степенным соотношениям.

Ключевые слова: концентрационный параметр разрушения, сейсмичность, поврежденность, акустическая эмиссия

DOI: 10.31857/S2686739721010059

ВВЕДЕНИЕ

Анализ закономерностей разрушения, происходящих на разных масштабных уровнях и в материалах различного генезиса, показывает возможность развития единого подхода к прогнозированию разрушения, основанного на кинетическом подобии эволюции поврежденности в деформируемом твердом теле, выраженном в определенной стадийности развития процесса разрушения [1].

Поскольку эта стадийность приводит к изменениям физических свойств, механические и физические характеристики используются в качестве диагностических параметров, определяющих стадии процесса разрушения.

Исследования по применению акустической эмиссии для диагностики разрушения металлических образцов и бетонов общеизвестны [2, 3], а из многих работ прошлого столетия [4, 5] следует также полезность использования характеристик акустической эмиссии, оцененных в процессе испытания образцов из горных пород при моделировании сейсмических процессов. В продолжение этих исследований в работах [6, 7] впервые проведено сравнение структуры сейсмического процесса со структурой акустического режима образцов горных пород в процессе сжатия и предложен способ оценки параметра концентрации акустических импульсов по данным об их числе и энергии.

При испытании металлических образцов в [8, 9] продемонстрирована возможность использования в качестве аналога магнитуды землетрясения “магнитуды разрушения”, оцениваемой по известному в сейсмологии соотношению и работе разрушения, определяемой по площади под кривой нагружения лабораторного образца. Установлена зависимость этого параметра от длительности акустического затишья, наблюдаемого перед разрушением металлических образцов из разных сталей [8], а также от радиуса корреляции (пла-

[1] *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*
[3] *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
**E-mail: lbotvina@imet.ac.ru*

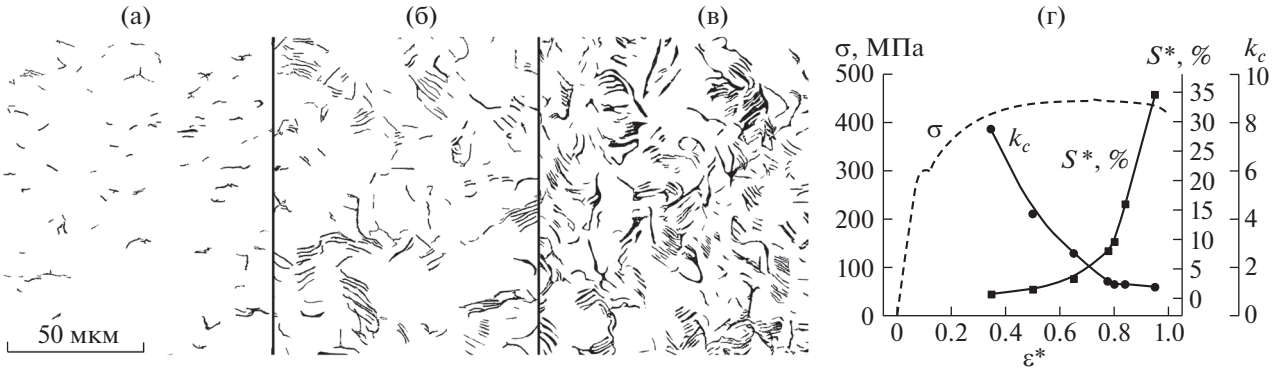

Рис. 1. Картины микротрещин в образце из стали 20 на разных этапах нагружения, соответствующие относительной деформации ε* 0.35 (а), 0.78 (б) и 0.95 (в) и деформационные зависимости напряжения (пунктирная кривая), площади пор и микротрещин на поверхности образца S^* и значений k_c-параметра (г) (по данным [13]).

стической зоны) процесса развития разрушения [9]. Соотношения, описывающие эти зависимости для металлических образцов, оказались подобными соотношениям, известным в сейсмологии и связывающим продолжительность сейсмического затишья и радиус корреляции землетрясения с его магнитудой.

Отмеченные выше аналогии привели к идее оценки в процессе растяжения металлических образцов акустического параметра k_{ae}, предложенного авторами [6, 7] и полученного ими для образцов горных пород с использованием энергии акустической эмиссии и соотношения для концентрационного параметра разрушения, характеризующего процесс накопления микротрещин, полученного в [10] для полимеров, а в дальнейшем и для образцов из других материалов, включая горные породы [11].

В процессе работы мы сравнили временные зависимости k_{ae} с временными зависимостями аналогичного параметра k_{sf} [12], оцененного по данным о сейсмических событиях в области очага Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. – одного из сильных землетрясений Камчатки, и параметра k_c, определенного по данным о накоплении механических дефектов в металлических образцах [1].

ПАРАМЕТР РАЗРУШЕНИЯ k_c, ОЦЕНИВАЕМЫЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ И ПЛОТНОСТИ МИКРОТРЕЩИН В ОБРАЗЦЕ

Параметр концентрации дефектов k_c, характеризующий процессы образования и накопления микротрещин, предложенный в [10] при изучении полимеров и использованный в дальнейшем для анализа процесса поврежденности в конструкционных металлических материалах [1, 13, 14], оценивается по соотношению:

$$k_c = \frac{1}{L_{cp}\sqrt[3]{n}}, \quad (1)$$

где L_{cp} – средняя длина микротрещин по ансамблю, n – их объемная плотность.

Этот параметр был определен на разных этапах растяжения плоских образцов из конструкционных сталей 20 [13] и 15Х2ГМФ [14] путем анализа картин микротрещин, полученных методом оптической микроскопии во время остановок лабораторного эксперимента. Пример таких картин, полученных для образцов из малоуглеродистой стали 20 на различных стадиях нагружения, представлен на рис. 1а–1в, а на рис. 1г приведены зависимости k_c и поврежденности материала S^* от относительной деформации ε*. Видно, что при напряжении, близком к пределу прочности, начинаются интенсивный рост поврежденности и уменьшение k_c-параметра до значений ниже 2 на финальной стадии разрушения. Точнее, его значения, оцененные по картинам микротрещин, меняются от 7.7 (рис. 1а) до 1.2 (рис. 1в), и подтверждают модель, предложенную в [15], согласно которой при снижении параметра k_c ниже трех, существенно возрастает вероятность слияния микротрещин перед формированием макротрещины. В образцах из стали 20 процесс слияния микротрещин отчетливо наблюдается при деформации ε* = 0.78 (рис. 1б), а при ε* = 0.95 (рис. 1в) его интенсивность резко увеличивается.

Аналогичный параметр k_c был оценен по пространственному распределению активных разломов Северного Тянь-Шаня (рис. 2) [16], фактически представляющему собой временной срез процесса разрушения в рассматриваемом сейсмоактивном районе. В этом случае полученное значение k_c = 1.1 свидетельствует, согласно

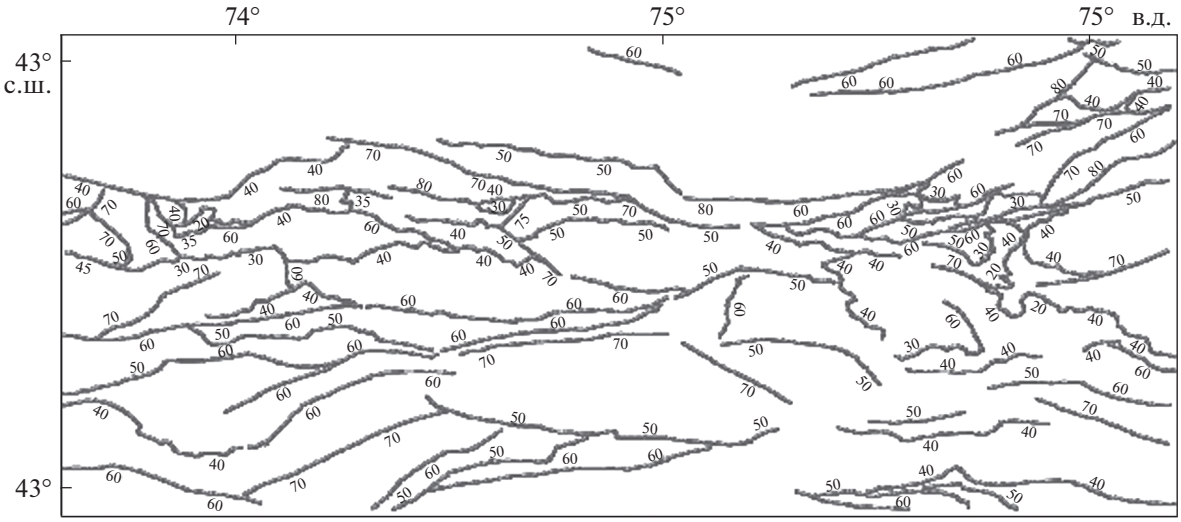

Рис. 2. Карта разломов Северного Тянь-Шаня с указанием углов погружения разломов от горизонта (по [16]).

модели [15], об активном развитии процесса взаимодействия и слияния сейсмогенерирующих разрывов, представленных на этой карте, что, собственно, и подтверждается достаточно высокой сейсмической активностью этого района.

ПАРАМЕТР РАЗРУШЕНИЯ k_{sf}, ОЦЕНИВАЕМЫЙ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Аналогичный параметр k_{sf}, названный параметром концентрации сейсмогенных разрывов и оцениваемый по данным о количестве и энергии сейсмических событий, произошедших в объеме горных пород, используется в сейсмологии для прогноза сильных землетрясений [10].

При этом длина разрыва земной коры (L_j), образовавшегося в результате землетрясения, вычисляется с использованием соотношения Ю.В. Ризниченко [17], связывающего длину разрыва с энергетическим классом землетрясения (K_j), равным логарифму значений выделившейся энергии (E, Дж):

$$\lg L_j\ (\text{км}) = aK_j + c, \tag{2}$$

$$K_j = \lg E, \tag{3}$$

где $a = 0.244$; $c = -2.266$ (коэффициенты a и c получены автором [17] по данным анализа большого числа сейсмических событий).

Далее, с использованием значений L_j и соответствующего кумулятивного числа сейсмических событий $\sum n_j$ по соотношению (1) производился расчет параметра плотности сейсмогенных разрывов k_{sf}.

В нашем случае мы рассчитывали параметр k_{sf} в очаговой области одного из сильнейших Камчатских землетрясений с магнитудой $M = 7.9$ (энергетический класс по региональному каталогу землетрясений Камчатки $K = 15.5$). Размер области был выбран 100 × 100 км по площади и 100 км в глубину. Заметим, что гипоцентр этого землетрясения находился на глубине 10 км. В расчетах использованы землетрясения с энергетическим классом $K \geq 9.5$, являющиеся представительными (регистрируемыми без пропусков) для всей Камчатки на протяжении всего периода наблюдений.

В [12] отмечено, что за несколько лет до момента будущего землетрясения в области его гипоцентра формируется зона пониженных значений k_{sf}, что подобно снижению k_c-параметра при слиянии микротрещин в металлическом образце при приближении к моменту его макроразрушения.

ПАРАМЕТР РАЗРУШЕНИЯ k_{ae}, ОЦЕНИВАЕМЫЙ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

По аналогии с оценкой k_{sf}, по количеству и энергии сигналов акустической эмиссии, регистрируемых в процессе деформирования образцов из конструкционных материалов, и с использованием соотношений (1, 2, 3), оценены значения параметров концентрации акустических событий k_{ae} при растяжении образцов из стали 15Х2ГМФ и стали 20:

$$k_{ae} = \frac{1}{L_{ae}\sqrt[3]{n_{ae}}}, \tag{4}$$

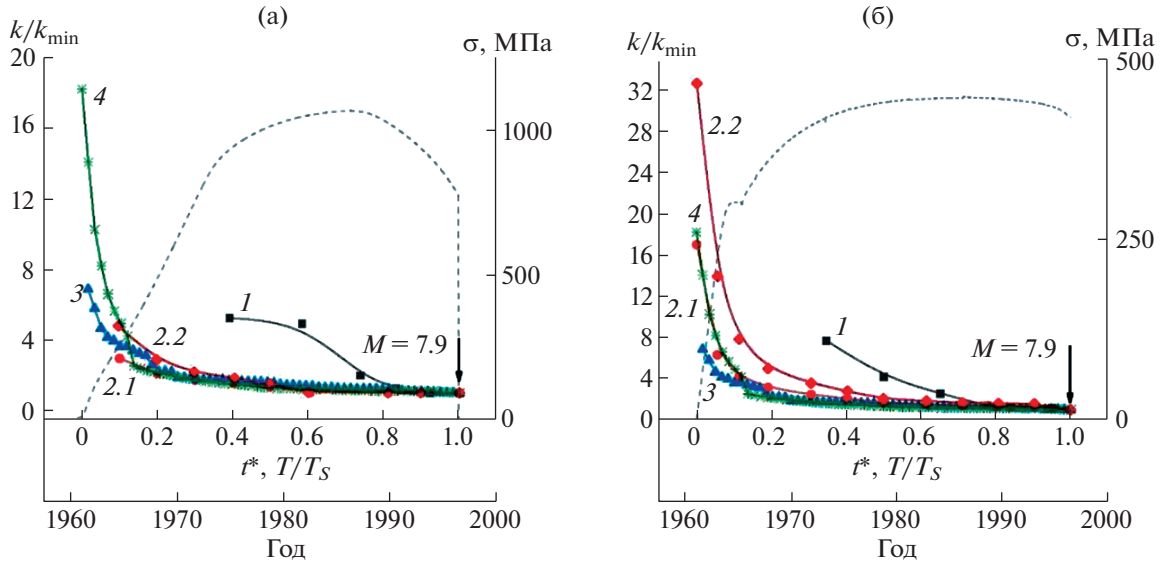

Рис. 3. Кривые нагружения (отмеченные пунктиром) образцов из стали 15Х2ГМФ (а) [14] и стали 20 (б) [13], отношения k/k_{min} текущих значений параметров k_c, k_{ae} *и* k_{sf} в функции относительного времени до разрушения образцов (t^*) и в функции относительного T/T_S и абсолютного времени до землетрясения (годы): k_c, оцененные по картинам микротрещин в сталях (кривые *1*); k_{ae}, оцененные для тех же сталей с использованием соотношений (6, 7) (кривые *2.1*) и соотношения (8) (кривые *2.2*); k_{ae} для образцов из гранита Вестерли (кривые *4*) [6, 7]; k_{sf} (кривые *3*) [12].

$$n_{ae} = \frac{\sum N_{ae}}{V_0}, \quad (5)$$

где n_{ae} – плотность сигналов акустической эмиссии в объеме образца V_0, $\sum N_{ae}$ – суммарное кумулятивное число сигналов акустической эмиссии на j-м этапе нагружения; L_{ae} – средняя кумулятивная длина микротрещин по ансамблю на j-м этапе нагружения, пропорциональная энергии акустической эмиссии E_{ae} и оцененная по соотношениям (6) и (7)

$$\lg L_{ae} = aK_{ae} + c, \quad (6)$$

$$K_{ae} = \lg E_{ae}. \quad (7)$$

При выборе значений коэффициентов a и c мы исходили из следующих соображений. В своей работе Ю.В. Ризниченко [17] допускает использование соотношения (2) в широком интервале энергетических классов (от 0 до 20). Энергетические классы акустических импульсов, равные логарифму значений выделившейся энергии акустической эмиссии, при испытании металлических образцов близки к нулю в сравнении со значениями K при образовании сейсмогенных разрывов, т.е. они попадают в указанный интервал. Однако, при длине микротрещин в металлических образцах ~5 мкм, $\lg L_{ae} = \lg(5 \times 10^{-9}) = -8.301$, т.е. коэффициент в формуле Ризниченко принимаем $c = -8.3$. Угловой коэффициент a, равный показателю степенной зависимости Ризниченко ($L_{ae} \sim E^a$), оставляем прежним, допуская, что на масштабном уровне, соответствующем разрушению металлических образцов, этот показатель сохраняется.

Поэтому для оценки значений k_{ae} для металлических образцов по соотношению Ризниченко мы выбрали следующие значения коэффициентов в уравнении (6): $a = 0.244$ и $c = -8.301$. Результаты оценки k_{ae} с учетом этих коэффициентов представлены на рис. 3 (кривые *2.1*).

При испытании гранита авторы [7] оценивали параметр k_{ae} по другому соотношению, исходя из соображения, что акустическая энергия E_j, выделившаяся при образовании трещины длиной l_j, пропорциональна l_j^3. Принимая E_j, равной квадрату амплитуды акустического сигнала U_j^2, и $l_j = \eta U_j^{2/3}$, где η – постоянный коэффициент, с использованием соотношения (1) они получили:

$$k_{ae} = P_к = \nu n^{2/3} / \sum U_j^{2/3}, \quad (8)$$

где $\nu = 1/\eta V^{1/3}$, а V – объем нагруженного объекта. Результаты оценки k_{ae} по соотношению (8) для образцов из гранита представлены на рис. 3 (кривые *4*).

Подобное соотношение было использовано нами и для оценки параметра k_{ae} по данным измерения акустической эмиссии при растяжении металлических образцов, результаты представлены на рис. 3 (кривые *2.2*).

Таблица 1. Значения показателей m в соотношении (9) по данным оценки k_c-, k_{ae}-, k_{sf}-параметров

Материал	$k_c(R^2)$	$k_{ae}(R^2)$, оцененный с использованием соотношений (6, 7)	$k_{ae}(R^2)$, оцененный по соотношению (8)	$k_{sf}(R^2)$ – Кроноцкое землетрясение
15Х2ГМФ	2.0 (0.88)	0.5 (0.93)	0.7 (0.97)	0.5 (0.97)
Сталь 20	2.0 (0.98)	0.5 (0.98)	0.5 (0.89)	
Гранит Вестерли (по [6, 7])	–	–	0.6 (0.95)	

Примечание. В скобках указаны значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2.

Рассмотрим временные зависимости оцененных концентрационных параметров разрушения, которые важны с позиции возможного прогнозирования с их использованием критического события.

ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ k_c, k_{sf} И k_{ae} ВО ВРЕМЕНИ

На рис. 3 приведены временные зависимости отношений текущих значений оцененных параметров к минимальным значениям, определенным для каждого из них. По оси абсцисс отложено относительное время t^* до разрушения металлических образцов (кривые *1* и *2*) и образцов из гранита (кривые *4*), и относительное время до землетрясения T/T_S с магнитудой $M = 7.9$ ($K = 15.5$), момент которого отмечен стрелкой (кривые *3*). Приведена также и текущая временная шкала развития сейсмического процесса (годы).

Использование шкалы относительного времени дает нам возможность совместить на одном графике все временные зависимости оцененных параметров, характеризующих процессы разрушения на различных масштабных уровнях. Важно отметить, что правые концы всех графиков совмещены и соответствуют времени разрушения образцов и моменту землетрясения.

Как видно из рис. 3, значения всех параметров снижаются перед основным событием (разрушением образца или землетрясением), причем временные зависимости акустических параметров (кривые *2.1*, *2.2* и *4*) близки зависимости от времени сейсмического параметра (кривая *3*). Однако кривые *1*, отвечающие временным зависимостям параметра поврежденности k_c для сталей, смещены вправо относительно других кривых по временной оси в сторону финального разрушения.

Это объясняется тем, что кривые *1* характеризуют процесс накопления и слияния микротрещин непосредственно перед разрушением (интервал относительного времени от 0.4 до 1.0), тогда как кривые *2.1*, *2.2* и *4* описывают процесс разрушения на ранней стадии появления меньших по размеру дефектов, в основном, дефектов другого масштабного уровня (дислокаций в металле или микросдвигов в образцах горных пород), вызывающих, тем не менее, изменение акустических свойств материалов. Другими словами, временные зависимости оцененных параметров разрушения характеризуют разные стадии развития несплошностей. Отметим также, что временные графики всех трех параметров, полученные по независимым данным, ведут себя аналогичным образом перед возникновением макроразрушения (землетрясения), а их относительные величины практически совпадают.

Установлено, что все полученные временные зависимости отвечают степенным соотношениям вида:

$$k = At^{-m}, \tag{9}$$

с показателями m, представленными в табл. 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ временных зависимостей параметров k_{ae}, оцененных методом акустической эмиссии в сталях, показывает, что их значения выше значений k_c и отвечают ранней стадии развития поврежденности по сравнению с зависимостями параметра k_c, характеризующего реальную поврежденность S^*. Причина состоит в том, что уже на стадии упругой деформации в отдельных объемах образца появляется микротекучесть, обусловленная движением дислокаций, которые вносят вклад в увеличение числа акустических событий на начальной и последующих стадиях накопления повреждений. По этой причине, а также в силу того, что акустическая эмиссия регистрируется при движении любого дефекта, а не только при развитии микротрещин, трудно ожидать, что критическое значение k_{ae} будет обязательно удовлетворять модели [15], предполагающей соответствие средней длины микротрещин расстоянию между ними и $k_{ae} \leq 3$.

Временные зависимости k_{sf} и параметра k_{ae}, полученного при сжатии образцов гранита, также располагаются в области начальной стадии развития повреждений. Поэтому, хотя все три параметра оцениваются по подобным соотношениям, их вряд ли можно считать равнозначными.

Но, с другой стороны, все они снижаются со временем, подобно уменьшению величины наклона графика повторяемости (b-параметра) перед главным толчком [12], которому предшествует период затишья. Можно, вероятно, утверждать, что причина затишья и снижения k- и b-параметров одна и та же – локализация разрушения и связанное с ней уменьшение числа событий и увеличение размера дефекта. Более чувствительные, акустические характеристики реагируют на процесс локализации разрушения раньше.

Взаимосвязь оцененных по картинам микротрещин k_c- и b_c-параметра (углового коэффициента кривых, построенных в координатах кумулятивное число–длина микротрещин [1, 18]), а также снижение b_c-параметра в начале периода затишья перед разрушением [1, 14], подтверждают данные, полученные при испытании металлических образцов.

Результаты исследования, по нашему мнению, свидетельствуют об общей природе кинетических закономерностей процессов разрушения, происходящих на разных масштабных уровнях, и об информативности концентрационных параметров разрушения, в том числе акустического параметра k_{ae}. Временные зависимости этого параметра могут быть использованы для анализа и моделирования процесса разрушения на ранней стадии развития поврежденности, а также для прогнозирования критического события – разрушения образца или землетрясения. Действительно, хотя полученные временные зависимости параметров представлены в относительных координатах, установленные степенные соотношения, а главное, показатели в этих соотношениях не изменятся при построении кривых в ненормированных координатах, что позволит по начальным данным оценивать время основного события.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 16-58-48008 ИНД_ом и № 18-05-00096-а, а также программ государственных заданий ИМЕТ РАН (№ 075-00947-20-00) и ИФЗ РАН (№ 0144-2019-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ботвина Л.Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука. 2008. 334 с.
2. *Middleton C.A., et al.* Detecting and Monitoring Cracks in Aerospace Materials Using Post-Processing of TSA and AE Data // Met. 2019. V. 9. № 7. P. 748.
3. *Shiotani T., et al.* Application of AE Improved b-value to Quantitative Evaluation of Fracture Process in Concrete Materials // J. Acoust. Emiss. 2001. V. 19. P. 118–133.
4. *Scholz C.H.* Microfractures, Aftershocks, and Seismicity // Bull. Seismol. Soc. Am. 1968. V. 58. №3. P. 1117–1130.
5. *Mogi K.* Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and Its Relations to Earthquake Phenomena // Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. 1962. V. 40. P. 125–173.
6. *Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Завьялов А.Д.* Особенности формирования и эволюции акустического режима в образцах горных пород // ДАН. 1995. Т. 343. № 6. С. 818–823.
7. *Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Завьялов А.Д.* Структура акустического режима в образцах горных пород и сейсмический процесс // Физика Земли. 1995. № 1. С. 38–58.
8. *Ботвина Л.Р., Шебалин П.Н., Опарина И.Б.* Механизм временных вариаций сейсмичности и акустической эмиссии перед макроразрушением // ДАН. 2001. Т. 376. № 4. С. 480–484.
9. *Ботвина Л.Р., Тютин М.Р.* Фрактальные свойства картин множественного разрушения // ДАН. 2007.Т. 417. № 3. С. 385–388.
10. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Слуцкер А.И.* Образование субмикроскопических трещин в полимерах под нагрузкой // ФТТ. 1969. Т. 11. № 2. С. 296–307.
11. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С.* О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика земли. 1977. № 6. С. 11–18.
12. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы. Методика. Реализация. М.: Наука. 2006. 243 с.
13. *Ботвина Л.Р., Болотников А.И., Синев И.О.* Иерархия микротрещин при циклическом и статическом нагружении // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 6. С. 24–36.
14. *Ботвина Л.Р. и др.* Механические и физические свойства, механизмы разрушения и остаточная прочность стали 15Х2ГМФ, используемой для изготовления нефтяных штанг // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 9. С. 22–34.
15. *Панасюк В.В., Лозовий Б.Л.* О распространении двух трещин неравной длины // ДАН УССР. 1962. Т. 11. С. 1444–1447.
16. *Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И.* Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 6. С. 1225–1250.
17. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
18. *Ботвина Л.Р., Ротвайн И.М., Кейлис-Борок В.И., Опарина И.Б.* О характере зависимости Гутенберга-Рихтера на различных стадиях накопления повреждений и подготовки землетрясений // ДАН. 1995. Т. 345. С. 809–812.

ON THE TIME DEPENDENCES OF THE FRACTURE CONCENTRATION PARAMETER ESTIMATED BY DIFFERENT METHODS

L. R. Botvina[a,#], A. D. Zavyalov[b], and I. O. Sinev[a,c]

[a] *Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[c] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: lbotvina@imet.ac.ru*

Presented by Academician of the RAS O.A. Bannykh October 1, 2020

The time dependences of the fracture concentration parameter characterizing the process of accumulation of defects formed in loaded objects – steel samples in laboratory experiments and in the source zone of a strong earthquake were obtained. At tension of steel specimens, the concentration parameter was evaluated using the number and length of microcracks (k_c) and the number and energy of acoustic emission signals (k_{ae}). At analyzing seismicity, the k_{sf} parameter was determined from the seismic events flow recorded during long-term monitoring of seismicity in the source zone of one of the strong Kamchatka earthquakes. It has been established that the time dependences of the concentration parameters obtained in laboratory experiments on metal samples and in conditions of a real seismically active region correspond to power-law relationships.

Keywords: concentration parameter of fracture, seismicity, damage, acoustic emission