

07

## О локальных полях напряжений в гетерогенных средах, определяемых по параметрам акустической эмиссии

© В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Vladimir.Hilarov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 26 января 2021 г.

В окончательной редакции 26 января 2021 г.

Принята к публикации 30 января 2021 г.

Из анализа пауз между акустическими сигналами, зарегистрированными в процессе механического воздействия, рассчитаны локальные внутренние напряжения в двух различных по структуре природных гетерогенных материалах. Показано, что изменение характера накопления этих напряжений может служить прогностическим признаком приближающегося разрушения.

**Ключевые слова:** кинетическая концепция прочности, акустическая эмиссия, локальные механические напряжения.

DOI: 10.21883/FTT.2021.06.50940.011

### 1. Введение

Информация о локальных полях напряжений, действующих в материале, необходима для безопасной эксплуатации сооружений и конструкций, изготовленных из этих материалов. В предыдущей работе [1] мы показали, что эти напряжения могут быть рассчитаны на основании кинетической концепции прочности Журкова [2,3] и экспериментальных данных, полученных методом акустической эмиссии (АЕ). Предполагается, что внешняя механическая нагрузка выводит материал из равновесного состояния. В качестве отклика на воздействие материал пытается перейти в новое равновесие, проходя через последовательность метастабильных состояний со временами жизни  $\Delta t_i$ , которые могут быть получены из данных акустической эмиссии и представляют собой паузы между последовательными акустическими событиями. Акустические события (сигналы) возникают в результате перестройки структуры материала за счет двойникования, образования или прорастания трещины и т.д. [4–6]. Переход в следующее метастабильное состояние происходит термофлуктуационно по закону Журкова. Отметим, что переход происходит локально в конкретном месте образца в определенный момент времени, т.е.  $\sigma = \sigma(\mathbf{r}, t)$ , понимая под  $\sigma$  первый инвариант тензора напряжений [1]. Учитывая это, формулу для локальных внутренних напряжений можно записать в виде

$$\sigma(r, t_i) = \left( \frac{U_0 + kT}{\gamma} \right) \ln \left( \frac{\tau_0}{\Delta t_i} \right), \quad (1)$$

где  $U_0$  — энергия активации процесса,  $\tau_0$  — характерное время тепловых колебаний атомов,  $\gamma$  — активационный объем (эти величины предполагаются далее константами материала),  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. Для численных расчетов значения

этих констант принимались равными  $U_0 = 160 \text{ kJ/mol}$ ;  $\gamma = 1 \text{ kJ/mol}\cdot\text{MPa}$ ;  $\tau = 10^{-13} \text{ s}^{-1}$  [7]. Как отмечено в [1], формула (1) представляет собой нижнюю оценку внутренних напряжений.

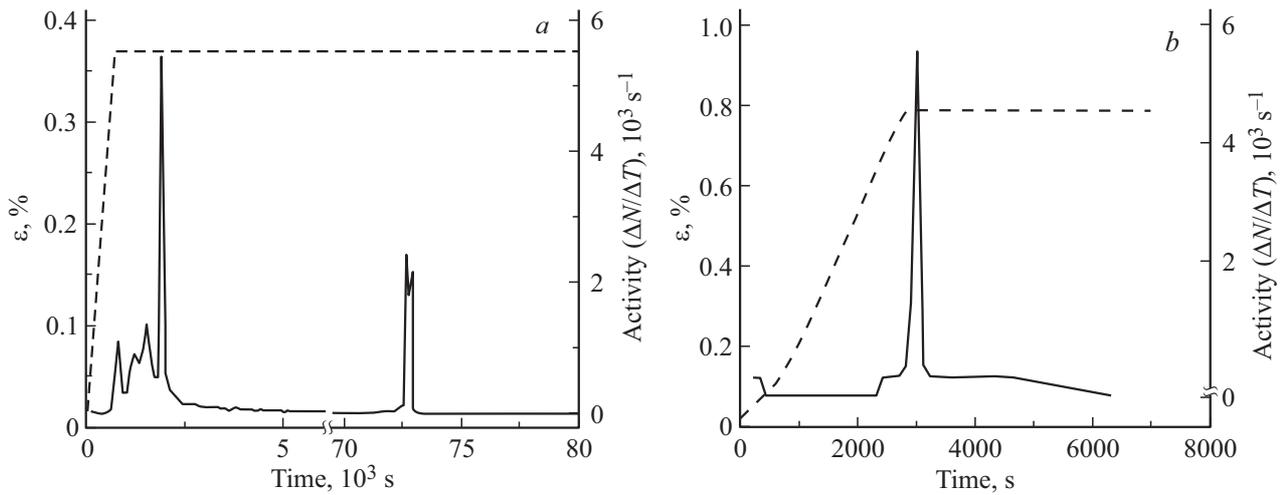
### 2. Описание эксперимента

Цилиндрические образцы ( $d = 10 \text{ mm}$ ,  $h = 20 \text{ mm}$ ), изготовленные из двух типов природных гетерогенных материалов (песчаник Berea и гранит Westerly), были подвергнуты одноосному квазистатическому сжатию со скоростью нагружения (смещения нагружающих плит)  $5 \mu\text{m/min}$ . Механическое напряжение прикладывали параллельно оси цилиндра. Сжатие осуществлялось до усилия, равного 0.9 от  $F_{\text{max}}$  ( $F_{\text{max}}$  — разрушающая нагрузка, определенная в предварительных экспериментах). Затем образец выдерживался при постоянной деформации до тех пор, пока активность АЕ не спадала до нуля.

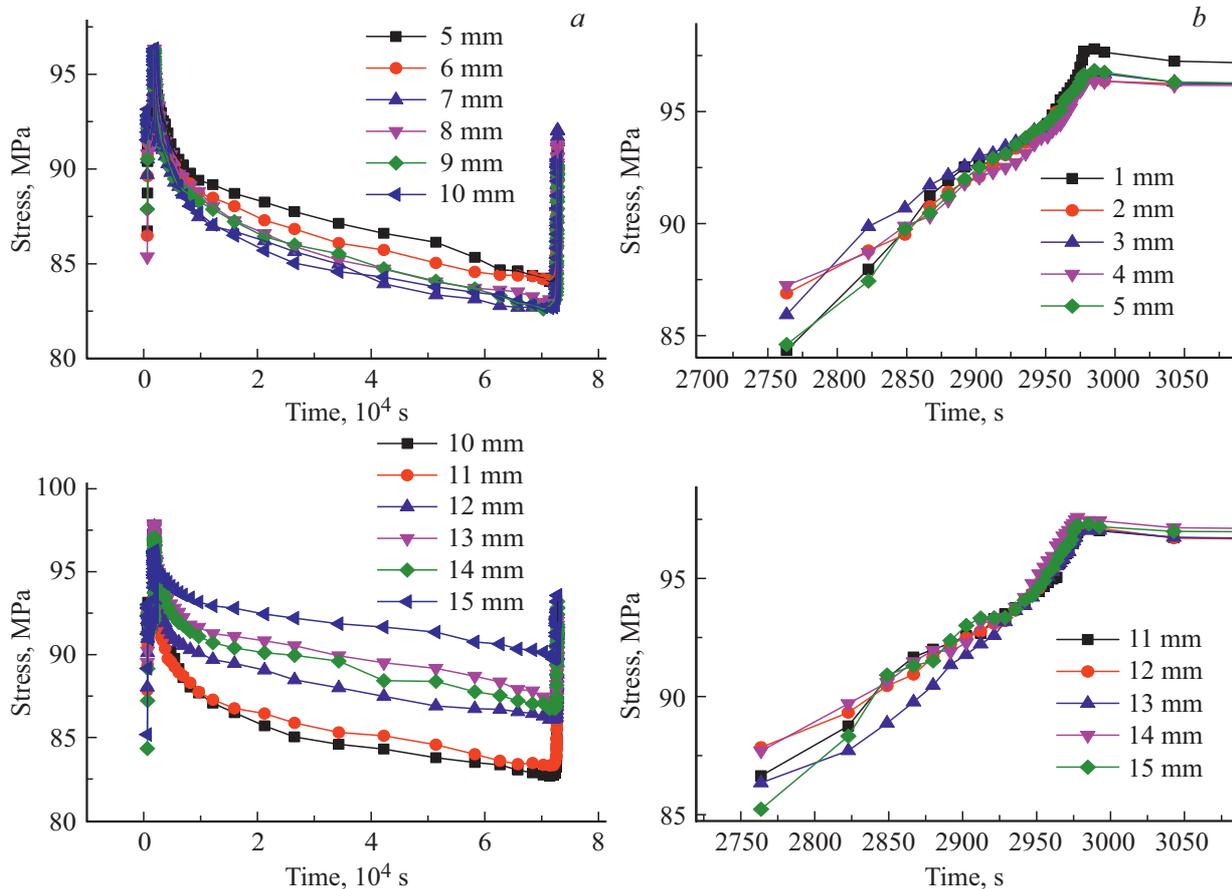
Выбранные материалы существенно отличаются по степени неоднородности и пористости: песчаник Berea — хрупкая осадочная порода с пористостью порядка 15–20% [8]; гранит Westerly [9] — существенно гетерогенный материал с практически нулевой пористостью. Более подробно минеральный состав материалов описан в [1,8,9].

На рис. 1 приведены временные зависимости деформации и активности АЕ (число сигналов в единицу времени). При расчете активности вся совокупность событий разбивалась на равные по времени интервалы (в данном случае, 100 s), затем определялось число событий в каждом интервале.

До механических испытаний выполнялась рентгеновская компьютерная томография образцов (с пространственным разрешением  $3 \mu\text{m}$ ). Отобраны образцы без



**Рис. 1.** Изменение деформации (штриховая линия), активности акустической эмиссии (сплошная линия) в процессе эксперимента: *a* — песчаник Berea, *b* — гранит Westerly.

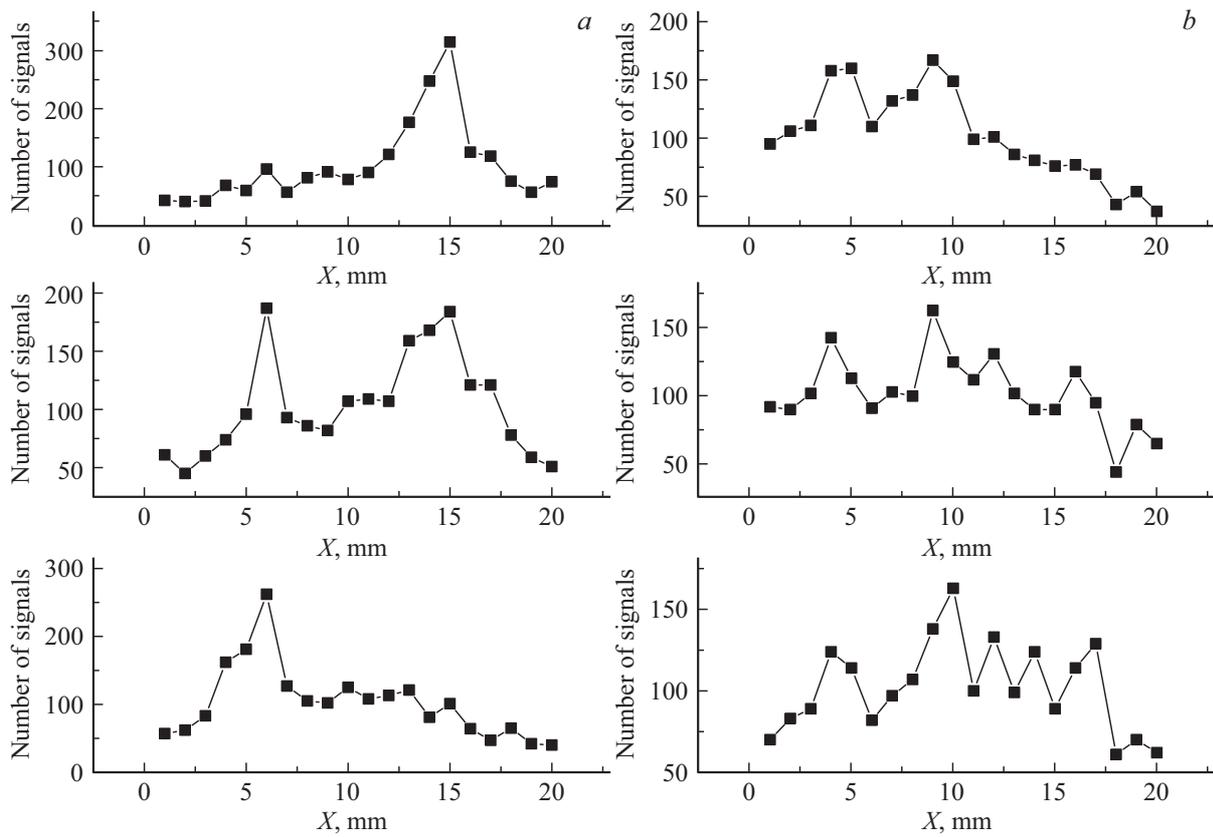


**Рис. 2.** Зависимость от времени локальных напряжений для песчаника Berea (*a*) и гранита Westerly (*b*).

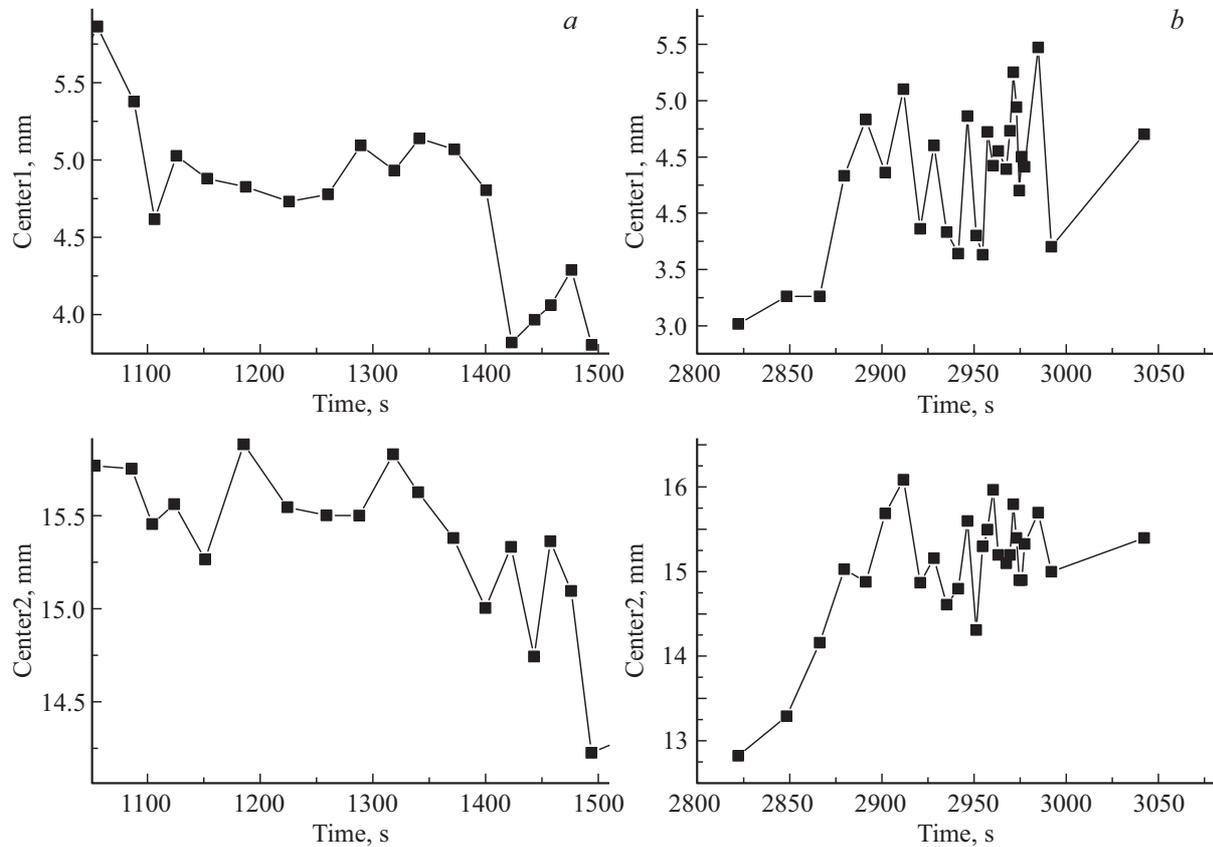
структурных аномалий, которые могут выступать концентраторами напряжений и источниками накопления повреждений.

Контроль за образованием и развитием дефектов в процессе нагружения образца осуществлялся путем регистрации сигналов акустической эмиссии в реальном

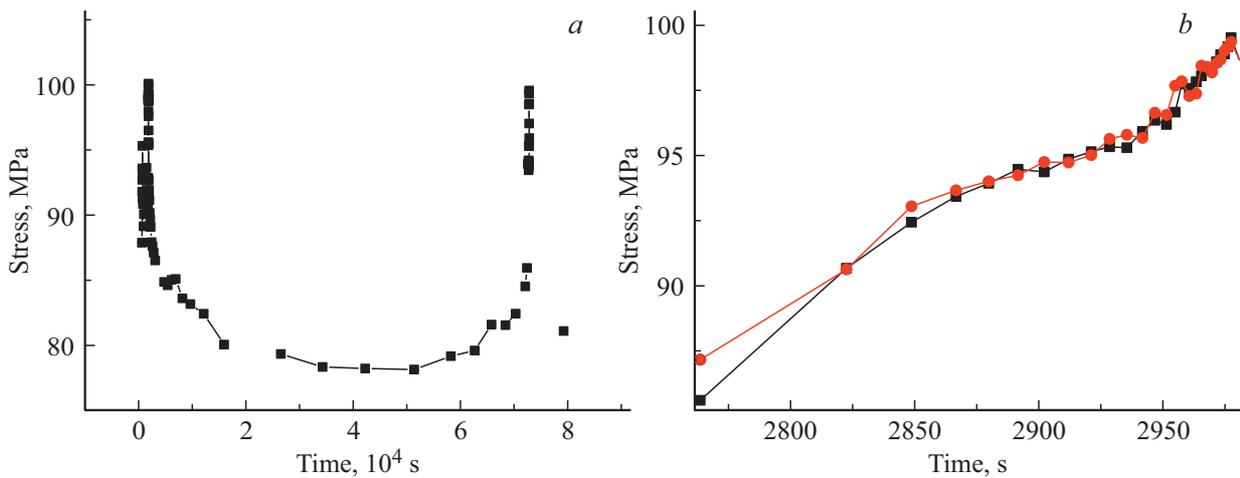
времени. Два пьезопреобразователя крепились к торцам образца, что дало возможность определять координаты гипоцентров сигналов АЕ. Каждый сигнал акустической эмиссии характеризовался временем излучения, координатой источника по высоте образца и энергией. Точность определения координат источника сигнала АЕ



**Рис. 3.** Распределение сигналов акустической эмиссии по координатам (для разных временных отрезков): *a* — песчаник Berea, *b* — гранит Westerly.



**Рис. 4.** Смещение координаты центров кластеров для песчаника Berea (*a*) и гранита Westerly (*b*).



**Рис. 5.** Зависимость от времени локальных напряжений в центрах кластеров для песчаника Berea (а) (один кластер) и гранита Westerly (б) (два кластера).

составляла около 1.5 mm. Детали эксперимента были описаны ранее, например, [10].

### 3. Основные результаты

Временные ряды данных акустической эмиссии разбивались на непересекающиеся последовательности, состоящие из 256 событий. Образцы разбивались на области по высоте цилиндра размером 1 mm. Каждое из событий выборки попадало в одну из таких областей. Для каждой области рассчитывались средние значения величины напряжений  $\sigma(x, t)$ . Некоторые из этих зависимостей приведены для рассматриваемых образцов на рис. 2. В начале и конце диапазона времен наблюдаются всплески локальных напряжений для песчаника Berea, связанные с повышенной акустической активностью в эти отрезки времени (которые хорошо видны на рис. 1). Вне этих отрезков локальные напряжения для песчаника Berea уменьшаются. В то же время для гранита Westerly наоборот происходит увеличение напряжений во времени. Такое поведение говорит о том, что у песчаника в отличие от гранита существует возможность релаксации напряжений. Кроме того, различие локальных напряжений в разных областях образца для песчаника значительно больше.

На рис. 3 приведены гистограммы распределения акустических событий по высоте образца (для трех разных интервалов времени). Из этого рисунка следует, что главным отличием песчаника от гранита является локализация разрушения в одном или двух очагах, в то время как в граните этих очагов больше. Заметим, что координаты очагов разрушения в песчанике примерно соответствуют координатам областей, в которых наблюдаются максимальные локальные напряжения на рис. 2 (~ 5 и 15 mm).

Методами нечеткой логики был проведен кластерный анализ непересекающихся последовательных выборок

( $\sigma, x$ ) из полного временного ряда. Каждая из таких выборок состояла из 256 событий АЕ. Для определения числа кластеров использовался алгоритм [11]. Для каждой точки выборки рассчитывается ее потенциал, зависящий от того насколько близко к ней находятся другие точки. Если рядом с точкой находится много других точек, то считается, что ее потенциал высок. Точка с наивысшим потенциалом принимается за центр первого кластера. Все точки вблизи этого центра выводятся из рассмотрения. Из оставшихся точек вновь выбирается точка с наивысшим потенциалом, и процедура повторяется до тех пор, пока все точки выборки не окажутся вблизи кластерных центров. Детали алгоритма изложены в [11]. Полученное на этом шаге число кластеров использовалось далее для расчета координат кластеров ( $x_c, \sigma_c$ ) методом *c*-средних.

На рис. 4 приведены зависимости от времени пространственных координат центров двух кластеров для очагов в песчанике и граните. Исходя из рис. 4, можно сделать заключение о том, как прорастают очаги разрушения в пространстве.

Так на начальной стадии в песчанике развиваются два очага с координатами в районе 5 и 15 mm. Эти очаги также хорошо видны на рис. 3. Далее их активность пропадает, и работает только одна широкая зона с максимумом примерно посередине образца (~ 10 mm, на рисунке не показана). На конечной стадии активность двух очагов возобновляется.

Для гранита Westerly множественное разрушение происходило на всем протяжении процесса. Видно, что очаг 1 прорастает от края образца к его центру, а очаг 2, наоборот, от центра к краю. Однако эти смещения центров очагов находятся на пределе точности определения координат источников сигналов (~ 1.5 mm).

На рис. 5 представлены зависимости от времени напряжений в центрах кластеров для песчаника и гранита. Здесь можно отметить, что при приближении к моменту разрушения характер этих зависимостей меняется: вместо уменьшения напряжения для песчаника оно

начинает увеличиваться. Для гранита, где напряжения накапливаются, изменяется характер их накопления — оно становится более быстрым.

#### 4. Обсуждение результатов

Различие в характере роста очагов разрушения и распределении локальных напряжений по объему образца в песчанике и граните, очевидно, связано с разной структурой этих материалов. Песчаник представляет собой относительно однородный материал, обладающий значительной пористостью (до 20%). Отмеченная выше релаксация напряжений в песчанике, по-видимому, связана с закрытием имеющихся в материале пор под действием внешнего приложенного напряжения. Гранит является сильно гетерогенным материалом, практически не содержащим пор. Поэтому релаксация напряжений здесь отсутствует, и вместо этого происходит их накопление. Явно выраженная гетерогенность обуславливает тот факт, что в граните происходит множественное разрушение по всей длине образца. Напротив однородность песчаника способствует большей локализации очагов разрушения. Такое поведение соответствует модели клеточного автомата, предложенной в [12].

Изменение характера релаксации напряжений во времени может явиться признаком приближающегося разрушения. Для песчаника таким признаком может служить невозможность дальнейшей релаксации (уменьшения внутренних напряжений) и замена ее накоплением (ростом) этих напряжений (рис. 5, *a*). Для гранита, в котором стадия уменьшения напряжений отсутствует, в качестве такого признака может выступать ускоренное накопление напряжений (рис. 5, *b*). Нужно отметить, что на рис. 5, соответствующем центру кластеров ( $\sigma, x$ ), эти признаки выражены более явно, чем на рис. 2.

Интересным представляется тот факт, что гетерогенность структуры гранита приводит к тому, что распределение внутренних напряжений слабо зависит от места в образце (рис. 2, *b*), что и отвечает множественному характеру разрушения в этом материале. В песчанике, как следует из рис. 2, *a* распределение напряжений неоднородно по образцу и принимает максимальные значения в очагах разрушения, которые представлены на рис. 3 и 4. Таким образом, гетерогенность структуры приводит к гомогенности внутренних напряжений, и наоборот.

Заметим, что речь идет о существенно неупругих напряжениях.

#### 5. Заключение

Таким образом, предложенный метод вычисления (оценки) локальных внутренних напряжений, который базируется на термофлуктуационной природе прочности, представляется перспективным для выявления этих напряжений в процессе разрушения (накопления дефектов), а также характера их релаксации во времени в

различных областях материала. Изменение характера релаксации внутренних напряжений может служить признаком приближающегося разрушения.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская. ФТТ **63**, 4, 515 (2021).
- [2] S.N. Zhurkov. J. Fracture Mechanics **1**, 311 (1965).
- [3] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М. (1974), 560 с.
- [4] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ЖТФ **83**, 1, 144 (2013).
- [5] T.H.W. Goebel, T.W. Becker, D. Schorlemmer, S. Stanchits, C. Sammis, E. Rybacki, G. Dresen. J. Geophys. Res. **117**, B03310 (2012).
- [6] Xinglin Lei, Shengli Ma. Earthquake Sci. **27**, 627 (2014).
- [7] В.П. Ефимов. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых **3**, 11 (2006).
- [8] P. Churcher, P. French, J. Shaw. SPE Int. Symp. Oilfield Chem. 21044 (1991).
- [9] F. Chayes. Am. J. Sci. **248**, 378 (1950).
- [10] Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов. ФТТ **60**, 9, 1775 (2018).
- [11] S.L. Chiu. J. Intellig. Fuzzy Systems **2**, 3, 267 (1994).
- [12] В.Л. Гиляров. ФТТ **53**, 4, 707 (2011).

Редактор Т.Н. Василевская