

Исследование локальных внутренних напряжений при одноосном сжатии монокристалла кварца

© Е.Е. Дамаскинская¹, В.Л. Гиляров¹, С.О. Дроздов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 2 июня 2022 г.

В окончательной редакции 2 июня 2022 г.

Принята к публикации 22 июня 2022 г.

На основании анализа интервалов времени между сигналами акустической эмиссии, полученными в процессе одноосного сжатия цилиндрического образца монокристалла кварца, были оценены локальные напряжения. Показано, что снижение способности материала к монотонной релаксации напряжений во времени может служить сигналом скорого разрушения материала.

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

DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53099.397

1. Введение

Информация о полях напряжений, действующих в объеме материала в процессе деформирования, представляется чрезвычайно важной для понимания механизмов, контролирующих развитие процесса разрушения. Существенным фактором, влияющим на развитие разрушения, являются локальные напряжения, возникающие в данной области материала, которые существенно отличаются от средних, задаваемых нагрузкой. В настоящее время не существует прямых экспериментальных методов, позволяющих измерять локальные напряжения, возникающие в объеме. В то же время именно эти напряжения играют наиболее существенную роль в образовании дефектов и эволюции дефектной структуры.

В ряде работ [1–5] показано, что процессы структурной перестройки в кварце при высоких давлениях, нагреве и фазовых превращениях сопровождаются сигналами акустической эмиссии (АЕ).

В настоящей работе был использован метод оценки локальных внутренних напряжений, основанный на кинетической концепции прочности Журкова [6,7] и анализе параметров сигналов АЕ [8]. С помощью этого метода было проведено исследование локальных напряжений, возникающих при одноосном сжатии цилиндрического образца монокристалла кварца, и предпринята попытка выявления закономерностей, указывающих на приближение к потере целостности образца.

2. Эксперимент

В работе использован синтетический кристалл кварца ориентации Z, выращенный способом гидротермального синтеза во Всесоюзном научно-исследовательском

институте синтеза минерального сырья [9]. Цилиндрические образцы ($d = 10 \text{ mm}$, $h = 20–24 \text{ mm}$) вырезались из кристалла перпендикулярно граням пинакоида $\{0001\}$, осью образца является направление $\langle 0001 \rangle$ (рис. 1).

Образцы подвергались одноосному квазистатическому сжатию со скоростью нагружения (смещения нагружающих плит) $5 \mu\text{m}/\text{min}$ на электромеханической машине AGX-Plus (Shimadzu, Япония, максимальное усилие 30 tons). Силу прикладывали параллельно оси цилиндра.

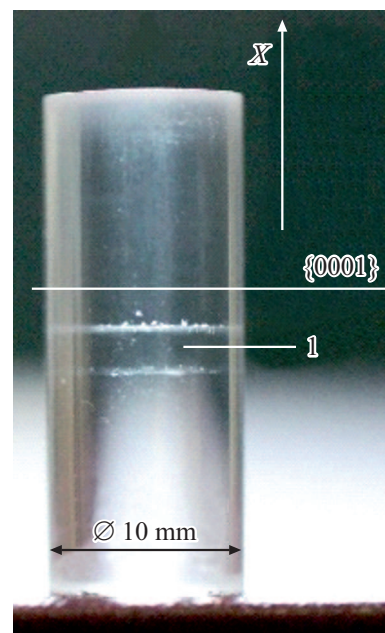


Рис. 1. Образец монокристалла кварца (цифрой 1 указана область образца, где находится затравка; пунктирные белые точки — исходные поверхности затравки).

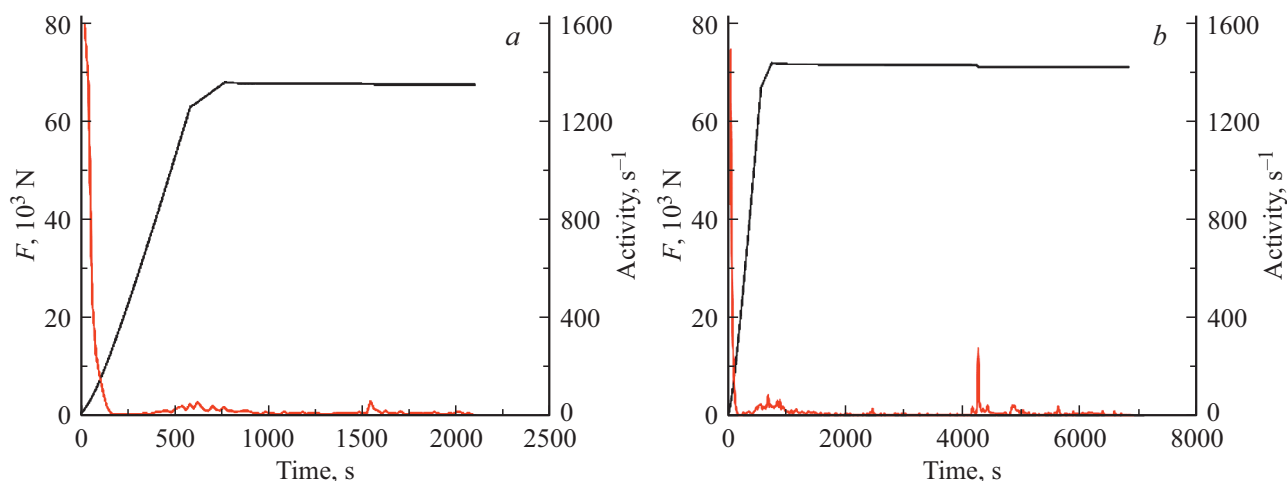


Рис. 2. Изменение силы, приложенной к образцу (черная кривая), и активность акустической эмиссии (красная кривая) на первом (а) и втором (б) этапах нагружения.

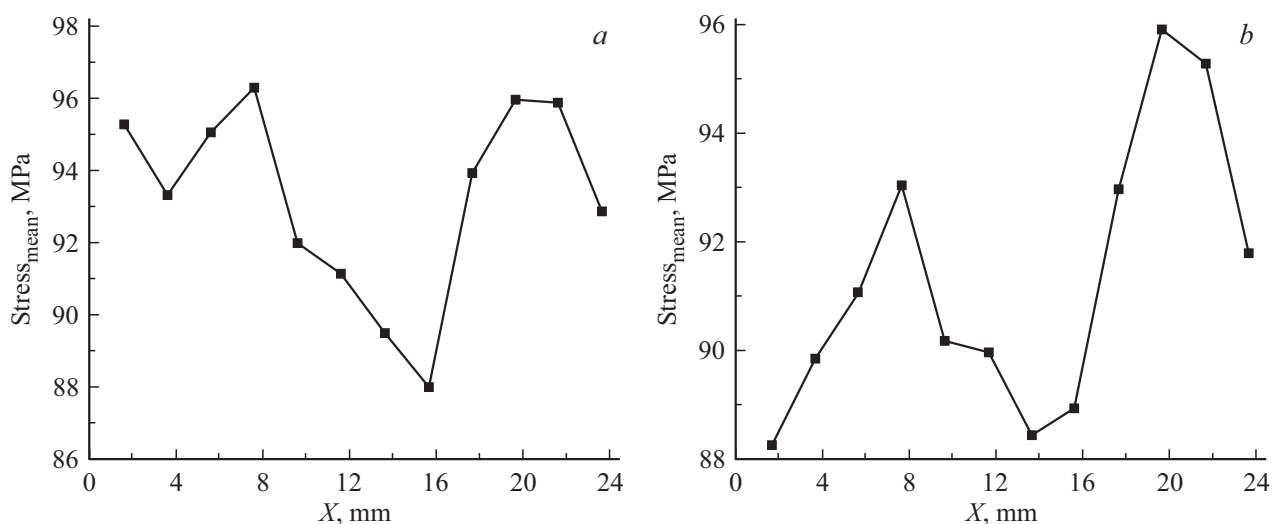


Рис. 3. Зависимость средних напряжений по координате на первом (а) и втором (б) этапах за все время нагружения.

Было выполнено поэтапное нагружение одного и того же образца, при этом максимальная сила последовательно увеличивалась на 4 кН по сравнению с предыдущим этапом. На каждом этапе образец выдерживался до тех пор, пока активность АЕ (число сигналов за определенный промежуток времени, в данном случае 50 с) не спадала до нуля. Всего было выполнено 18 этапов нагружения. Однако, число сигналов АЕ, зарегистрированных на первых 16 этапах (т.е. до силы 64 кН), оказалось недостаточным для статистического анализа. В связи с этим, был проведен анализ последних двух этапов нагружения (далее будем называть их „этап 1“ и „этап 2“), на первом из них сжатие осуществлялось до усилия 68 кН, на втором — до 72 кН (рис. 2). После завершения эксперимента образец сохранил свою целостность.

Регистрации сигналов акустической эмиссии в реальном времени в процессе нагружения образца производилась с помощью системы Amsy-5 Vallen (Германия).

Два пьезопреобразователя АЕ105А (частотный диапазон 450–1150 кГц) крепились в торцах образца. Точность определения координат гипоцентров сигналов АЕ — не хуже 2 мм. Каждый сигнал АЕ характеризовался временем излучения, координатой источника по высоте образца и энергией. Детали эксперимента были описаны ранее, например, [10].

3. Результаты и обсуждение

Локальные напряжения при сжатии были определены (вычислены) на основании кинетической концепции Журкова [6,7] и экспериментальных данных, полученных методом акустической эмиссии.

Детальные исследования дефектной структуры, проведенные с помощью рентгеновской компьютерной томографии и рентгеновской дифракционной визуализации (XDI — X-ray Diffraction Imaging) [11], показали, что

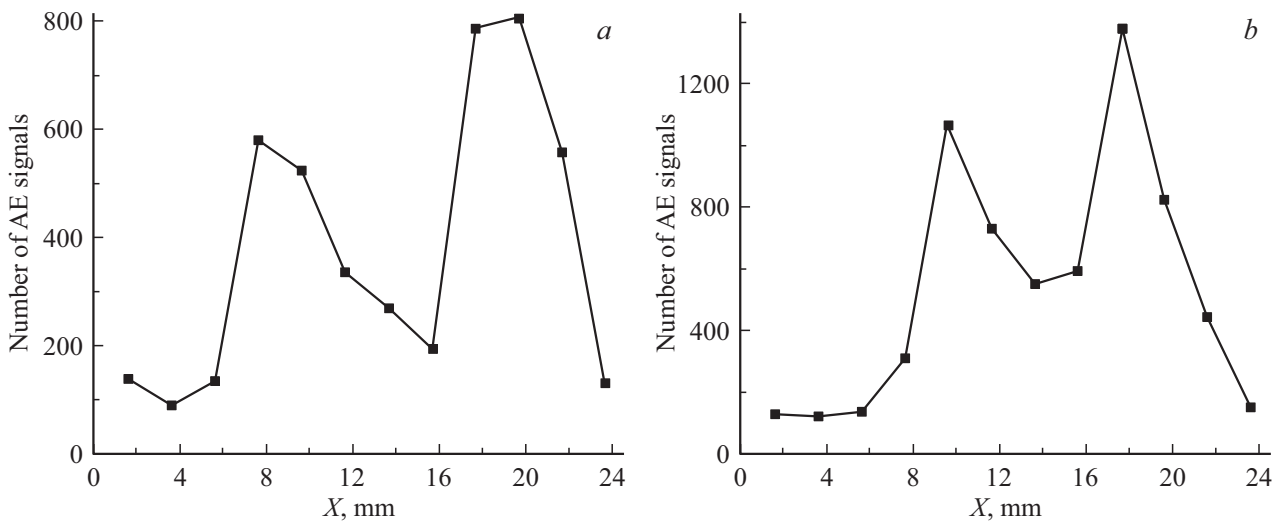


Рис. 4. Распределение числа сигналов АЕ по координате (высоте образца) на первом (а) и втором (б) этапах нагружения.

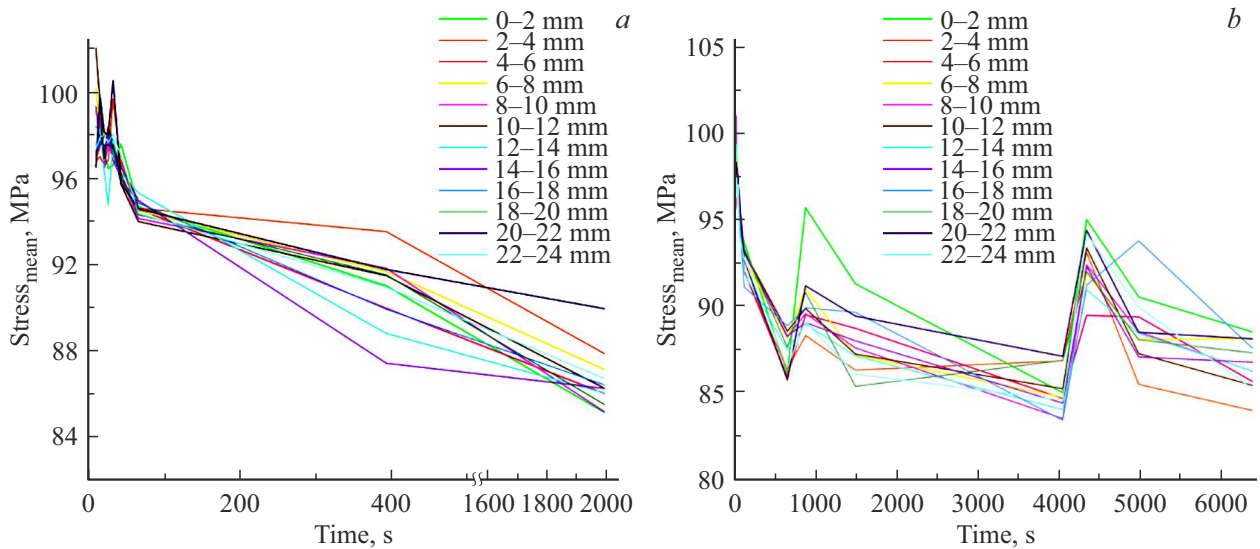


Рис. 5. Зависимость локальных напряжений в частях образца высотой 2 мм в зависимости от времени на первом (а) и втором (б) этапах нагружения.

даже при малых нагрузках в образце монокристалла кварца образуются микротрещины, которые и являются источниками сигналов акустической эмиссии.

В согласии с кинетической концепцией С.Н. Журкова внешняя нагрузка выводит материал из равновесного состояния. В качестве отклика на это воздействие материал переходит в новое равновесное состояние, проходя при этом через последовательность метастабильных состояний со временами жизни Δt_k которые могут быть получены из данных акустической эмиссии и представляют собой паузы между последовательными акустическими событиями.

Сами напряжения рассчитываются по формуле

$$\sigma(t_k) = \frac{U_0 + kT \ln \frac{\tau_0}{\Delta t_k}}{\gamma}$$

Для анализа изменения локальных напряжений по координате выполнялась следующая процедура: осуществлялось разбиение сигналов АЕ по высоте образца с шагом 2 мм, затем в каждой области вычислялись средние напряжения. В результате были получены зависимости средних напряжений от координаты (рис. 3, а, б) за все время эксперимента. Видно, что максимальные локальные напряжения достигаются в пространственных областях с координатами ≈ 5 и 18 мм.

На рис. 4, а, б представлены распределения числа сигналов АЕ по высоте образца на первом (а) и втором (б) этапах нагружения. Сопоставление зависимостей, представленных на рис. 3 и 4, позволяет говорить о том, что координаты очагов разрушения (~ 5 и 18 мм) соответствуют координатам областей повышенных локальных напряжений.

На рис. 5, *a, b* представлены зависимости локальных напряжений в частях образца высотой 2 мм в зависимости от времени. Для построения данных зависимостей временные ряды параметров сигналов акустической эмиссии разбивались на неперекрывающиеся выборки, содержащие по 500 сигналов. Затем для каждой последовательности производилось разбиение по высоте (по 2 мм). Каждое из событий выборки попадало в одну из таких областей. Для каждой области вычислялись средние значения локальных напряжений.

Подобный характер зависимостей мы наблюдали ранее [8] в аналогичных экспериментах по деформированию песчаника.

Как следует из рис. 2, *a, b*, наибольшая активность сигналов АЕ (а значит и наибольшая интенсивность образования трещин) достигалась в начальные моменты времени.

На рис. 5, *a, b* видно, что материал на первом этапе нагружения обладает большей способностью к монотонной релаксации напряжений, чем на втором.

На основании этого наблюдения можно отметить следующую закономерность: при увеличении степени разрушения материала, его способность к монотонной релаксации напряжений снижается.

4. Заключение

Вследствие эволюции дефектной структуры — образования и прорастания трещин — характер (особенности) развития разрушения в образце монокристалла кварца приобрел сходство с разрушением песчаника (гетерогенного материала).

Установлено, что в процессе нагружения образца кварца происходит снижение локальных напряжений. При этом при увеличении степени разрушения материала, его способность к монотонной релаксации напряжений также уменьшалась.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Schmidt-Mumm. *Phys. Chem. Minerals* **17**, 545 (1991).
- [2] P.W.J. Glover, P. Baud, M. Darot, P.G. Meredith, S.A. Boon, M. Le Ravalec, S. Zoussi, T. Reuschle. *Int. J. Geophys.* **120**, 3, 775 (1995).
- [3] J. Gasc, A. Schubnel, F. Brunet, S. Guillon, H.-J. Mueller, C. Lathe. *Phys. Earth. Planetary Interiors* **189**, 3–4, 121 (2011).
- [4] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ЖТФ* **81**, 4, 148 (2011).
- [5] N.E. Timms, D. Healy, J.M. Reyes-Montes, D.S. Collins, D.J. Prior, R.P. Young. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. В **7**, B07202 (2010).
- [6] S.N. Zhurkov. *J. Fracture Mech.* **1**, 311 (1965).
- [7] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. *Кинетическая природа прочности твердых тел*. Наука, М. (1974). 560 с.
- [8] В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская. *ФТТ* **63**, 6, 783 (2021).
- [9] Синтез минералов. / Под ред. Б.А. Дороговин. 2-е изд. ВНИИСИМС. Т. (2000). Т. 1. 642 с.
- [10] Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов. *ФТТ* **60**, 9, 1775 (2018).
- [11] Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Ю.Г. Носов, К.М. Подурец, А.А. Калоян, Д.В. Корост, И.А. Пантелеев. *ФТТ* **64**, 4, 455 (2022).

Редактор Т.Н. Василевская