

07

## Микротрещины в гетерогенном твердом теле (песчанике) при трении

© В.И. Веттегрень<sup>1,2</sup>, А.В. Пономарев<sup>2</sup>, Р.И. Мамалимов<sup>1,2</sup>, И.П. Щербаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 11 марта 2019 г.

В окончательной редакции 11 марта 2019 г.

Принята к публикации 12 марта 2019 г.

При помощи триболюминесценции проведены исследования скорости роста и размеров микротрещин, образующихся в поверхностном слое гетерогенного природного твердого тела (песчаника) при трении. Найдено, что при разрушении кристаллических решеток плагиоклаза и кварца, входящих в состав песчаника, возникают сигналы триболюминесценции. Каждый сигнал соответствует микротрещине, поверхность которой содержит электронно-возбужденные свободные радикалы  $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$  и ионы  $\text{Fe}^{3+}$ . По скорости и времени роста интенсивности сигналов определены скорость роста и размеры микротрещин. Оказалось, что скорость роста микротрещин меньше скорости упругой волны ( $\sim 700$  м/с) и варьирует от  $\sim 380$  до  $\sim 650$  м/с. Размеры микротрещин заключены в пределах от  $\sim 4$  до  $\sim 7$   $\mu\text{m}$ . Предполагается, что изменения скорости и размеров микротрещин вызваны вариацией величин барьеров, при прорыве которых возникают микротрещины.

**Ключевые слова:** скорость роста микротрещин, размеры микротрещин.

DOI: 10.21883/FTT.2019.07.47844.413

### 1. Введение

Известно [1–5], что процесс разрушения металлов, кристаллов и полимеров под действием механического напряжения начинается с рождения, роста и объединения мельчайших „зародышевых“ трещин с размерами от  $\sim 100$  нм до нескольких  $\mu\text{m}$  [3,4]. До последнего времени не была определена скорость роста таких трещин, поскольку отсутствовал метод, позволяющий ее измерять с наносекундным разрешением. Перспективным для решения этой проблемы является метод регистрации и анализа сигналов триболюминесценции (ТЛ), возникающей при образовании микротрещин во время разрушения гетерогенных природных диэлектриков. Как показали исследования [6–13], этот метод позволяет наблюдать образование и рост микротрещин в гетерогенных природных материалах.

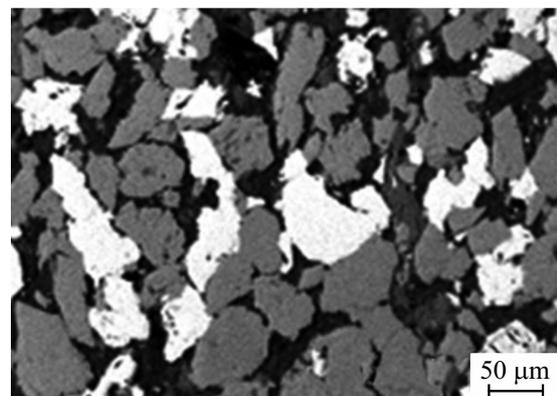
Цель настоящей работы — определение скорости роста и размеров „зародышевых“ микротрещин, образующихся при трении гетерогенного природного твердого тела — песчаника.

### 2. Объект и методы исследования

Образцы готовили из блоков штурфов рифейского песчаника полуострова Средний, расположенного на северном побережье Кольского полуострова. На рис. 1 показан фрагмент фотографии поверхности исследован-

ного образца. Анализ таких фотографий [11] показал, что  $\sim 80\%$  vol. песчаника занимают кристаллы кварца и плагиоклаза,  $\sim 15\%$  vol. — гидрослюд и  $\sim 5\%$  vol. — анатаза. Средние размеры кристаллов кварца и плагиоклаза  $\approx 60$   $\mu\text{m}$  [11].

Для решения поставленной задачи использовалась установка, описанная в [10]. Она состоит из вращающегося диска и прижатого к нему стержня из песчаника. Диаметр диска — 140 мм, а стержня — 9.5 мм. Конец стержня затачивали на точильном круге. Диаметр конца заточенного стержня — 2 мм. Линейная скорость вращения диска,  $V_d = 26$  м/с. При прижатии стержня к



**Рис. 1.** Фотография поверхности исследованного образца песчаника.

вращающемуся диску возникала ТЛ. Излучение через кварцевый световод подавалось на поверхность фотоэлектронного умножителя РЕМ 136, а с него — на вход аналогово-цифрового преобразователя ADS-3112. Там сигналы ТЛ оцифровывались и с временным разрешением 2 ns записывались в память компьютера для дальнейшей обработки и хранения.

Спектр ТЛ регистрировали оптоволоконным спектрометром AvaSpec-ULSi2048L-USB2OE. Оказалось, что при трении песчаника связи Si–O–Si в кристаллических решетках кварца и плагиоклаза разрываются. После их разрыва образуются микротрещины, на берегах которых расположены возбужденные свободные радикалы  $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$  и ионы  $\text{Fe}^{3+}$ , замещающие ионы  $\text{Si}^{4+}$  в кристаллических ячейках плагиоклаза и кварца [10]. При релаксации возбуждения возникают сигналы ТЛ [6–13].

Прежде чем перейти к изложению полученных результатов, нужно отметить, что, если давление стержня на вращающийся диск превышало  $\sim 1$  МПа, число сигналов люминесценции резко возрастало. В этих условиях они налагались друг на друга, что не позволяло исследовать каждый из них в отдельности. Поэтому описанные ниже результаты получены при давлении 1 МПа.

### 3. Скорость образования и размеры микротрещин

Фрагмент временной зависимости интенсивности сигналов ТЛ при трении показан на рис. 2. Видно, что она имеет вид одиночных сигналов, которые состоят из 4 наложенных друг на друга максимумов (рис. 3). Каждый сигнал длился  $\approx 25$  ns, а средняя величина временного интервала между ними на два порядка больше,  $\approx 5 \mu\text{s}$ . Каждый из максимумов на рис. 3 соответствует микротрещине, на берегах которой располагаются электронно-возбужденные радикалы и ионы [10,11]. В та-

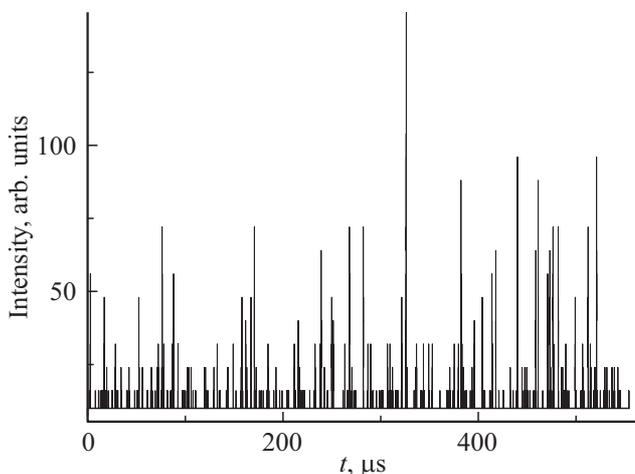


Рис. 2. Фрагменты временной зависимости ТЛ при трении песчаника.

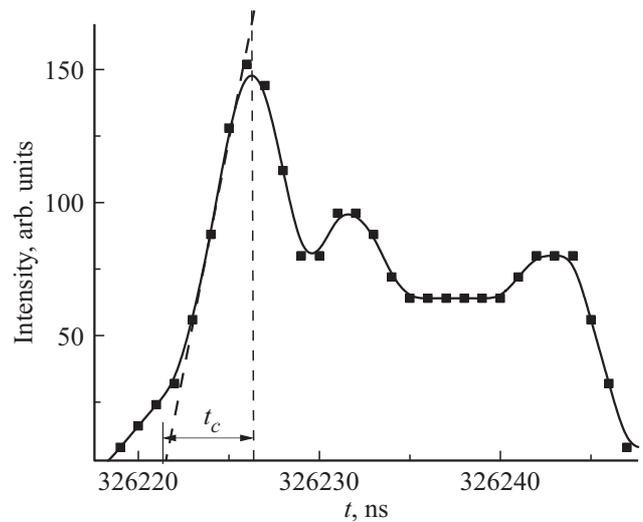


Рис. 3. „Одиночный“ сигнал ТЛ при трении песчаника.

ком случае появление четырех максимумов в сигнале люминесценции показывает, что микротрещины формируются группами: по четыре микротрещины в каждой из них. Интенсивность второго, третьего и четвертого максимумов всегда была в 1.5–2.5 раза меньше, чем первого. Она пропорциональна площади поверхности трещин [6–13]. Поэтому наблюдаемый вид сигнала показывает, что вслед за первой микротрещиной всегда образуется еще три микротрещины, причем каждая из них имеет площадь поверхности в 1.5–2.5 раза меньше, чем первая. Вероятно, при образовании первой микротрещины напряжения около нее изменяются, что и приводит к появлению остальных трех микротрещин меньшего размера.

Рассмотрим более подробно временную зависимость интенсивности первого максимума. Она обусловлена временной зависимостью двух процессов. Первый — рост интенсивности люминесценции при увеличении площади поверхности микротрещин. Второй — ее затухание после остановки микротрещины. Дифференцируя начальный участок максимума, можно найти максимальную скорость роста его интенсивности  $dI/dt$ , она пропорциональна максимальной скорости роста площади микротрещины  $dS/dt$ . Оказалось, что величина  $dI/dt$  для разных сигналов, а значит, и скорость роста площади поверхности трещин, варьирует в несколько раз. Оценим ее.

На рис. 4 в полулогарифмических координатах приведено распределение скоростей сигналов люминесценции. Экспериментальные точки укладываются на прямую линию:

$$\ln N = \ln N_0 - b(dI/dt), \quad (1)$$

где  $N_0$  и  $b$  — опытные параметры.

Экстраполируем эту линию к  $\ln N = 0$ , и получим предельное значение  $(dI/dt)_{\text{lim}} \approx 24 \mu\text{V/ns}$  (см. рис. 4). Предположим, что это предельное значение скорости

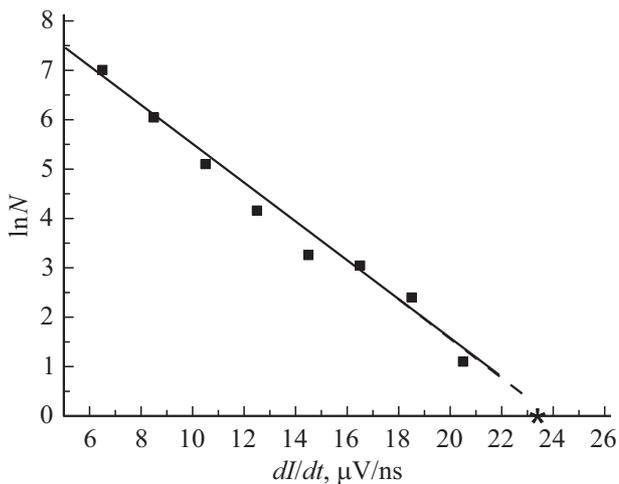


Рис. 4. Распределение скоростей роста интенсивности сигналов ТЛ.

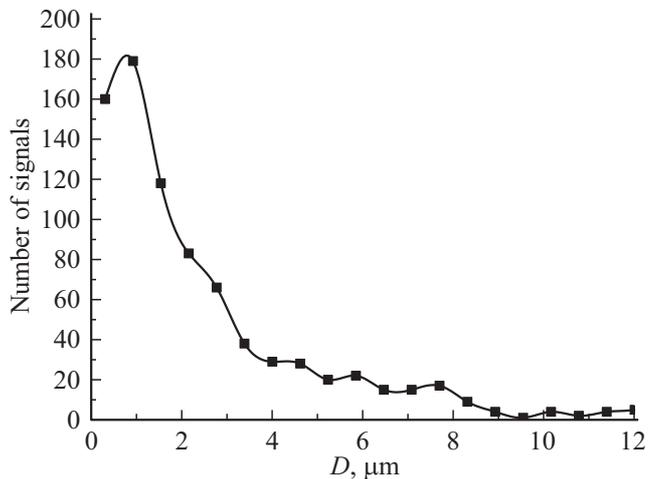


Рис. 5. Распределение расстояний между группами микротрещин.

роста сигналов ТЛ соответствует скорости упругой волны  $V_e$ , которая для рифейского песчаника равна  $\approx 700$  м/с [10]. Поскольку интенсивность сигнала люминесценции пропорциональна площади поверхности трещины, то скорость роста ее линейного размера  $dL/dt$  можно вычислить как

$$dL/dt = Q\sqrt{dI/dt}, \quad (2)$$

где  $Q$  — коэффициент пропорциональности.

Тогда имеем следующее уравнение:  $700 \text{ nm/ns} \approx Q(24 \mu\text{V/ns})^{1/2}$ . Откуда получаем  $Q \approx 143 \text{ nm}/(\mu\text{V} \cdot \text{ns})^{1/2}$ .

Используя это значение  $Q$ , можно определить скорость роста любых микротрещин в исследованном образце. Так, например, минимальное значение  $dI/dt \approx 7 \text{ V/ns}$  (рис. 4) и, значит, минимальная скорость роста микротрещин, которая может быть зафиксиро-

вана нашей установкой,  $380 \text{ m/s}$ . Максимальное значение  $dI/dt \approx 20.5 \mu\text{V/ns}$  и максимальная скорость роста микротрещин  $650 \text{ nm/ns} = 650 \text{ m/s}$  — меньше скорости упругой волны.

Чем же вызвана широкая вариация скорости роста микротрещин? Известно [14–16], что микротрещины возникают при разрушении барьеров, препятствующих движению дислокаций по пересекающимся плоскостям скольжения. Скорость роста микротрещин определяется скоростью „сваливания“ дислокаций в трещину, которая, в свою очередь, задана локальными напряжениями в скоплениях дислокаций около барьеров. Чем больше величина барьера, тем больше скапливается около него дислокаций и тем больше скорость роста микротрещины. По-видимому, широкая вариация скорости роста микротрещин отражает вариацию величин барьеров.

Оценим время роста микротрещин. С этой целью проведем касательную к интенсивности, как показано на рис. 3. Продолжим ее до пересечений с осью времени и вертикальной прямой, проведенной через точку с максимальной интенсивностью  $I_m$ . Отрезок  $t_c$  на оси времени будет приблизительно равен времени роста интенсивности сигнала люминесценции. Тогда размеры микротрещин, которые могут быть зарегистрированы нашей установкой, можно вычислить как  $L = V_c t_c$ . Оказалось, что самые мелкие микротрещины имеют размер приблизительно  $4 \mu\text{m}$ , а наиболее крупные — приблизительно  $7 \mu\text{m}$ .

Определим расстояния  $D$  между группами микротрещин как:  $D = V_d t_d$ , где  $t_d$  — интервал между сигналами ТЛ. Вычисленное таким образом распределение расстояний показано на рис. 5. Видно, что величина  $D$  изменяется от  $\sim 0.3$  до  $\sim 12 \text{ mm}$ . Наиболее вероятное расстояние между появлением микротрещин,  $\sim 70 \mu\text{m}$ , близко к среднему размеру кристаллов кварца и плагиоклаза приблизительно  $60 \mu\text{m}$ .

Вероятно, микротрещины рождаются в основном на границах между этими кристаллами. Действительно, известно, что наибольшее число дислокаций в кристаллах содержится в границах зерен или поверхности кристаллов [17].

## 4. Заключение

При трении гетерогенного нанокристаллического твердого тела — песчаника образуются микротрещины с линейными размерами от  $\sim 4$  до  $7 \mu\text{m}$ . Скорость их роста изменяется приблизительно в два раза и оказывается меньше скорости упругой волны.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.Р. Регель, А.И. Слущкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М. (1974). 560 с.
- [2] В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев. ФТТ **47**, 5, 801 (2005).
- [3] В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Зинатне, Рига. (1978). 294 с.
- [4] В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. Политехника, СПб. (1993). 475 с.
- [5] П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. Поры в твердом теле. Энергоатомиздат, М. (1990). 376 с.
- [6] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ЖТФ **81**, 4, 148 (2011).
- [7] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. Физика Земли **5**, 58 (2012).
- [8] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ФТТ **54**, 7, 1342 (2012).
- [9] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. Физика Земли **5**, 134 (2016).
- [10] В.И. Веттегрень, Г.А. Соболев, А.В. Пономарев, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов ФТТ **59**, 931 (2017).
- [11] В.И. Веттегрень, А.В. Пономарев, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов. ФТТ **59**, 1557 (2017).
- [12] В.И. Веттегрень, А.В. Пономарев, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов. ФТТ **59**, 2263 (2017).
- [13] В.И. Веттегрень, А.В. Пономарев, К. Arora, Haris Raza, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков, И.В. Фокин. ФТТ **60**, 2266 (2018).
- [14] A.N. Stroh. Adv. Phys. **6**, 6, 418 (1957).
- [15] A.H. Cottrell. Theory of Crystal Dislocations. Gordon and Breach, NY. (1964). 91 p.
- [16] В.И. Владимиров. Физическая природа разрушения металлов. Металлургия, М. (1984). 280 с.
- [17] G. Gottstein. Physical Foundations of Materials Science. Springer, Berlin, Heidelberg (2004). 502 p.

*Редактор Е.Ю. Флегонтова*