

КИНЕТИКА И КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ИЕРАРХИЯ НАНОДЕФЕКТОВ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ НАГРУЖЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

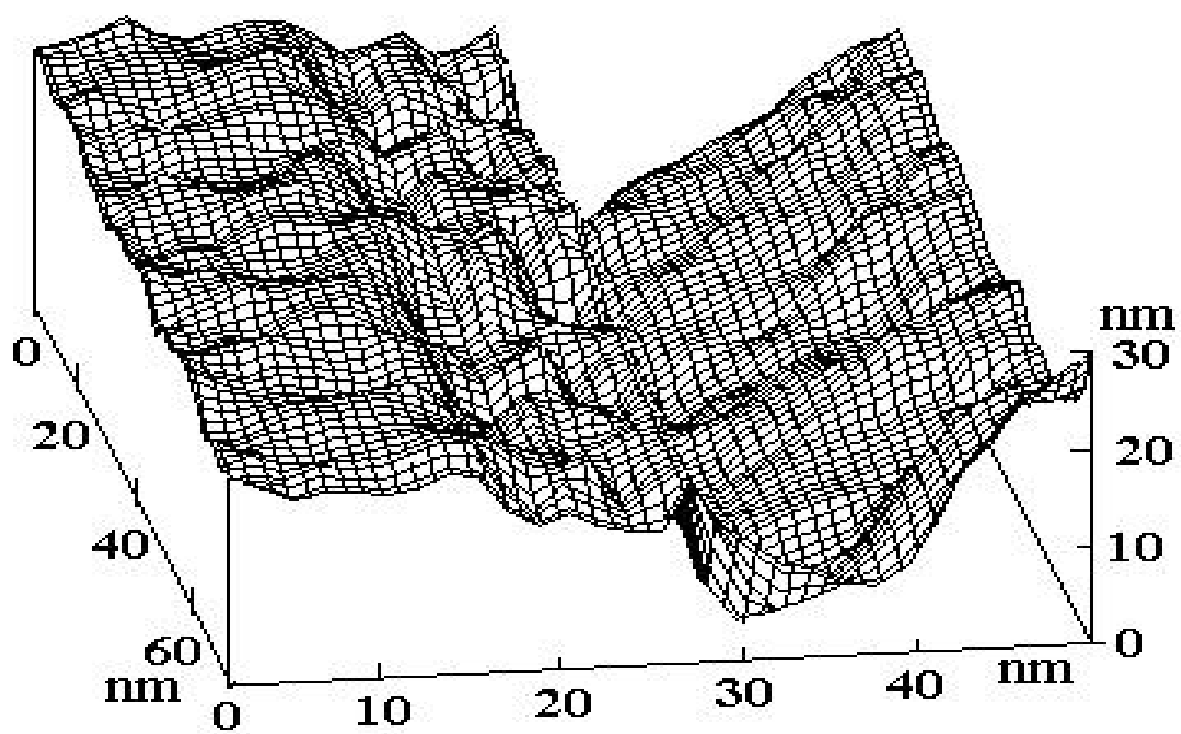
В. Б. Кулик, Х.Ф. Махмудов

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

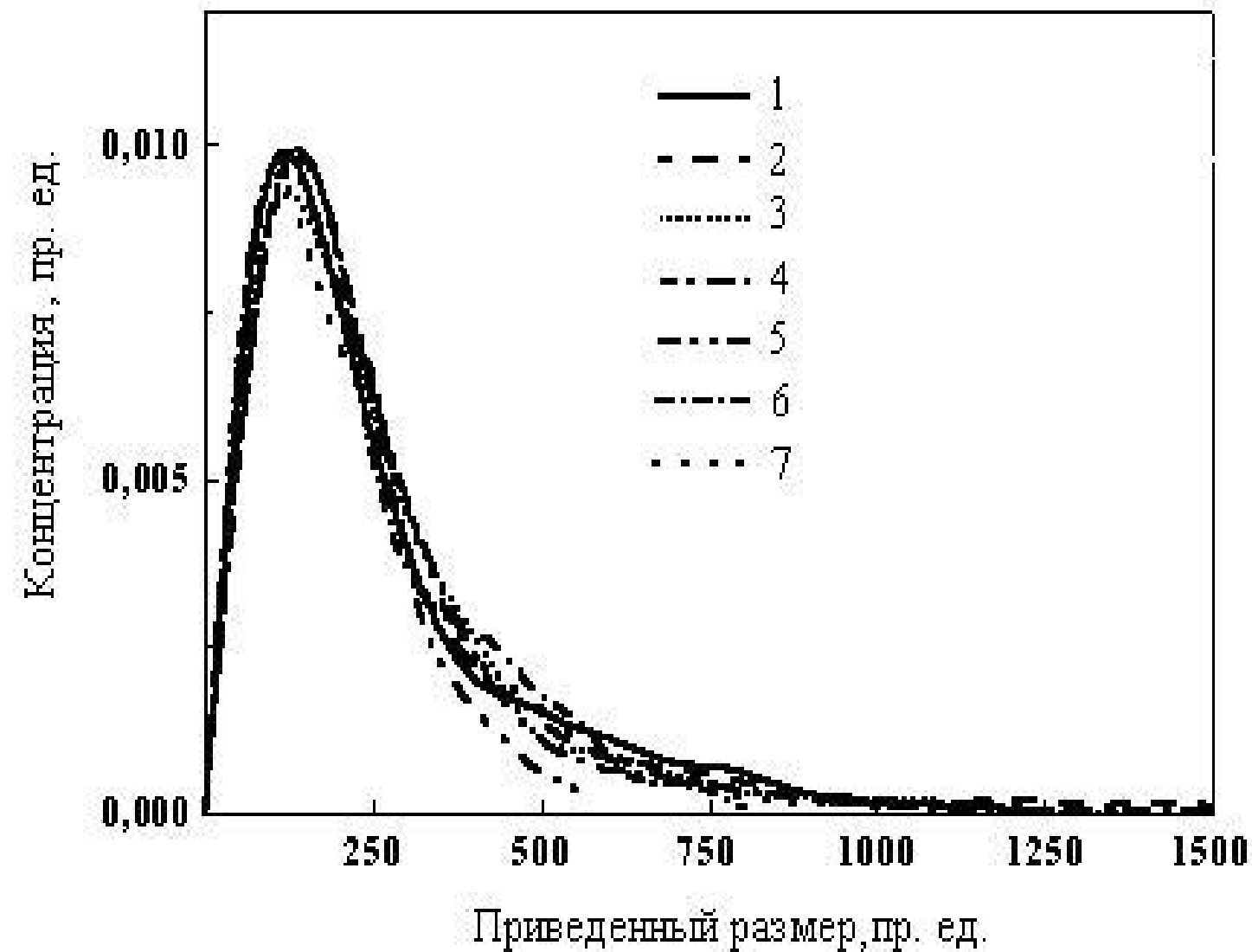
h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Проведенные недавно исследования процесса накопления акустических сигналов от нагруженных гранитов [1,2] показали, что кинетика разрушения имеет более сложный характер по сравнению с известным из [3] двухуровневым механизмом разрушения. Было обнаружено, что процесс накопления трещин имеет, по крайней мере, четыре иерархических уровня. **Цель данной работы – выяснить, имеет ли обнаруженный многоуровневый иерархический характер накопления трещин общий характер или он обусловлен особенностями разрушения горных пород.**

Для решения задачи были проанализированы и сопоставлены результаты исследований накопления трещиноподобных дефектов с линейными размерами $10 \dots 10^3$ нм на поверхности металлов и трещин с размерами $0,1 \dots 1$ мм в объеме гранитов «Westerly» и «Harcourt». Кинетика накопления дефектов с нанометровыми размерами на поверхности напряженных металлов изучалась при помощи сканирующей туннельной микроскопии, а трещин в объеме гранитов – при помощи акустической эмиссии.



Типичный трещиноподобный нанодефект, образовавшийся на поверхности меди под действием одноосного растягивающего напряжения 400 МПа. Направление стенок параллельно плоскостям скольжения дислокаций, глубина дефекта ≈ 15 нм, а длина стенок ≈ 50 нм. С течением времени они укрупняются и достигают размеров 10 мкм.



Распределения дефектов по размерам в приведенных координатах на поверхностях меди (1-5), золота (6) и молибдена (7) под действием различных напряжений и в различные моменты времени после приложения напряжения

Для описания распределения использовано выражение для канонического распределения термодинамической вероятности флуктуаций энергии при постоянном объеме, полученное Гиббсом [4,5]. В результате преобразований было получено выражение для распределения нанодефектов по размерам на поверхности, которое хорошо описывает экспериментальные результаты для всех исследованных металлов [6,7].

$$n_e(y) = \sum_{i=1}^n n_{0i} y_i^2 \exp(-\beta y_i \Delta U_{0i}) \quad (1)$$

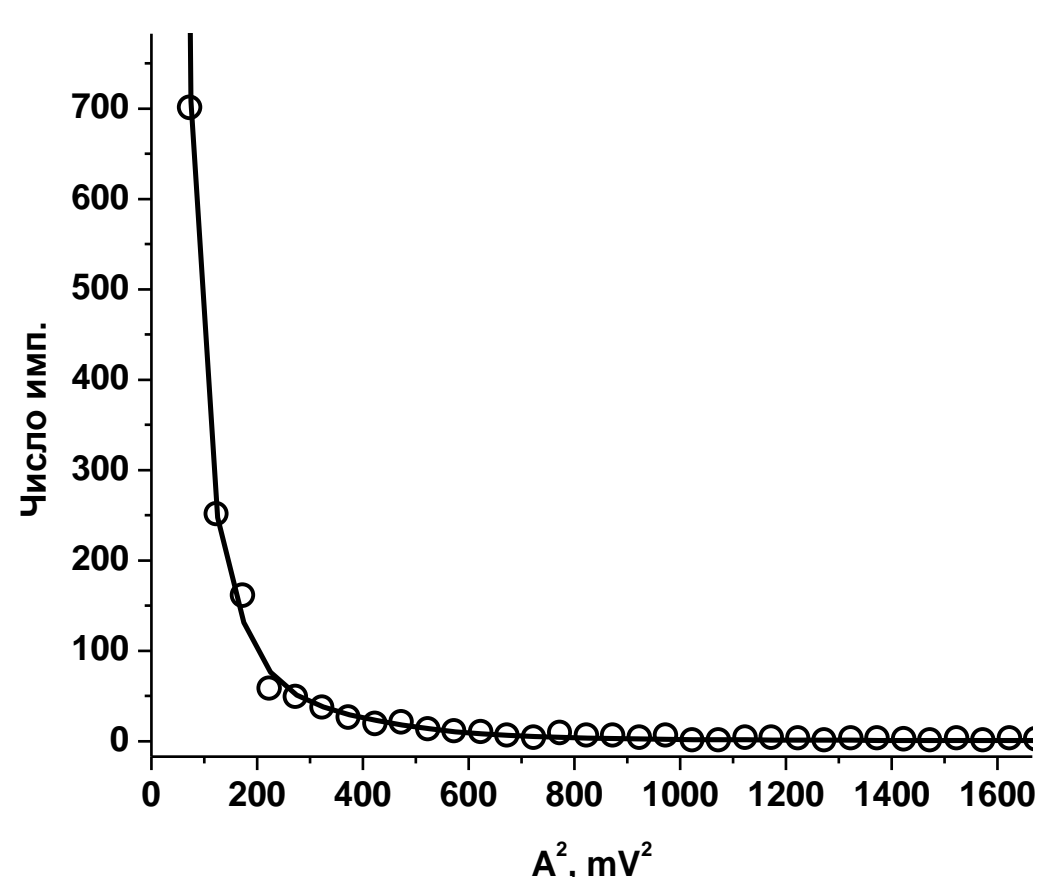
n_{0i} – концентрация нанодефектов с длиной стенок y_i ; $n_{0i} \equiv C_{ai} \beta (\Delta U_{0i})^2 / 2$ ΔU_{0i} – энергия образования дефекта; C_{ai} – нормировочная постоянная; $\beta \equiv 1/k_B T$.

Использование выражения (1) подразумевает, что совокупность нанодефектов состоит из нескольких статистических термодинамических ансамблей, отличающихся средними значениями размеров нанодефектов и энергиями их образования. Эти представления для исследованных металлов были прямо подтверждены в работах [6,7]. На этом основании был сделан вывод: трещиноподобные нанодефекты образуют статистические ансамбли, а их распределения по размерам заданы максимальным значением энтропии [8].

Энергия, выделяемая при образовании трещин, пропорциональна квадрату амплитуды акустического сигнала A^2 , и выражение (1) преобразуется к виду

$$n_e(y) = \sum_{i=1}^n n_{0i} A_i^4 \exp(-\beta A_i^2 \Delta U_{0i}). \quad (2)$$

Исследования показали, что распределение квадратов амплитуд акустических сигналов также хорошо описывается выражением (2). Результат сжатия позволил заключить, что распределение трещин по размерам в исследованных гранитах также задано максимальным значением энтропии.



Аппроксимация распределения квадратов амплитуд акустических сигналов от гранита «Westerly» по выражению (4)

Исследования, проведенные в последние годы [6-8], показали, что выражения (1) и (2) описывают распределения по размерам нанодефектов в металлах, структурных образований в полимерах, бактерий и грибов, длин протеиновых молекул и т. д. Следовательно, они имеют общий характер: во всех исследованных твердых телах структурные образования и трещины образуют совокупность статистических термодинамических ансамблей, распределение в каждом из которых задано максимальным значением энтропии и описывается выражением Гиббса для флуктуаций.

Список литературы

1. Н. Г. Томилин, Е. Е. Дамаскинская, В. С. Куксенко, Физика твердого тела, 1994, 36, с. 3101-3122.
2. V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaja et al. Pure Applied Geophysics, 1996, 146, p. 253-263.
3. В. П. Тамуж, В. С. Куксенко. Микромеханика разрушения полимерных материалов / Рига: Зинатне. 1978.
4. B. L. Lavenda, Statistical Physics. A Probabilistic Approach. N.Y.: J. Wiley & Sons Inc. 1997.
5. Gibbs J. W. Elementary Principles in Statistical Mechanics. Yale University Press, New Haven, CT, 1902.
6. Н. Г. Килиан, М. Коерф, В. И. Веттегрень, Progress in Colloid and Polymer Science, 2001, p. 172.
7. Х. Г. Килиан, В. И. Веттегрень, В. Н. Светлов, Физика твердого тела. 2001, 43, с. 2107-2111.
8. А.Г.Сырков, Н.Р. Прокопчук, И.В. Плескунов, Нанозифика и наноматериалы: Сборник научных трудов Международного симпозиума, посвященного 110-летию В.Б. Алесковского и 115-летию Л.А. Сена, Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2022 года. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2022. с. 8-20.