

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ СВЕТОРАССЕЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ГЕОМЕТРИИ АНСАМБЛЯ ТРЕЩИН В МОНОКРИСТАЛЛАХ NaCl ПРИ ОДНООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Бойко Ю.И., Волосюк М.А., Кононенко В.Г

Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, г. Харьков, Украина
Yuri.I.Boiko@univer.kharkov.ua marina.andreevna@inbox.ru

Вопросу изучения механизмов образования трещин и пор в материалах, условий их появления и кинетики развития в настоящее время уделяется большое внимание, поскольку они во многом определяют прочностные характеристики и поведение материала под нагрузкой [1–3], являясь типичными дефектами твердых тел наряду с дислокациями [4]

В качестве объекта для исследования закономерностей трещинообразования выбраны монокристаллы NaCl, которые и широко применяются в технике, и являются удобным модельным объектом. Прозрачность NaCl позволила использовать метод рассеяния света для изучения размеров, количества и геометрии трещин, формирующихся в материале под нагрузкой. Из отожженного монокристалла NaCl изготавливались образцы цилиндрической формы размером $d = 8$ мм и $h = 15$ мм с отполированной боковой поверхностью. Ось цилиндра параллельна кристаллографическому направлению типа $\langle 100 \rangle$. Образцы подвергались циклически повторяющемуся сжатию вдоль оси нагрузкой $\sigma = 10^7$ Н/м² в течение 10с и кратковременному отжигу при $T = 500^\circ\text{C}$ в течение 10 мин. Нагрев и охлаждение образцов проводились вместе с печью по ≈ 10 мин. Оценка, согласно [5], величины термоупругих напряжений в этих условиях показала, что они на порядки меньше порога Пайерлса, и плотность дислокаций в образцах до и после отжига оставалась одинаковой. Отжиг после деформации проводился с целью снятия больших концентраций напряжений. Учитывая экспериментальные погрешности и случайный характер распределения зон локализации макродеформации и их подвижность в кристалле в процессе деформации [3], результаты наблюдений усреднялись не менее чем по 20 образцам.

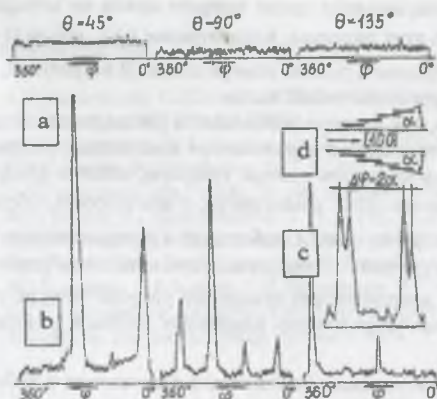


Рис.1. Примеры зависимостей $I(\varphi)$: *a* – исходного образца; *b* – после третьего цикла; *c* – пример расщепленного максимума; *d* – возможная схема группы.

Диаграммы светорассеяния (зависимости интенсивности светорассеяния от угла поворота кристалла $I_{sc}(\varphi)$) снимались при боковом освещении образца при углах рассеяния θ , равных 45° , 90° и 135° , и осевом освещении при $\theta = 90^\circ$ от образцов в исходном состоянии и в каждом цикле после нагружения и после отжига [6].

Примеры типичных диаграмм рассеяния исходного образца и после третьего цикла приведены на рис.1. Как видно из рисунка, картина светорассеяния исходного образца не содержит резких максимумов (пиков) интенсивности светорассеяния. После нагружения появляются резкие пики рассеяния. С увеличением

номера цикла наблюдается рост интенсивности светорассеяния и некоторая трансформа-

ция максимумов. В одном цикле после нагружения и после отжига картины светорассеяния отличаются незначительно. Данные светорассеяния обрабатывались по методике, описанной в [6, 7], с извлечением информации о форме рассеивающих частиц (трещин), их кристаллографической ориентировке, размерах и концентрации (количестве трещин в единице объема).

Результаты обработки экспериментальных данных сводятся к следующему. Возникающие микротрещины по размерам (величине эффективного радиуса \bar{a}) можно условно разделить на две группы: малые, не дающие максимумов рассеяния, для которых $k_0 \bar{a} = (2\pi/\lambda_0) \bar{a} < 1$ (λ_0 – длина волны света в веществе, в которую погружены рассеивающие частицы), и крупные, дающие пики рассеяния, для которых $k_0 \bar{a} \geq 1$. Радиус \bar{a} вводится из условия равенства объема реальной частицы $v = L^2 \delta$ (L – ширина трещины, δ – ее толщина) и объема сферы радиусом \bar{a} , т.е. $v = \frac{4}{3} \pi \bar{a}^3$. По нашим оценкам, параметр формы трещины (L/δ) лежит в пределах $10 \div 20$. Получаем: $L \approx 4\bar{a}$. Для малых трещин после первого цикла нагружения $\bar{a} \approx 1,2 \cdot 10^{-7}$ м, соответственно $L \approx 4,8 \cdot 10^{-7}$ м.

Оценка критического размера трещины \bar{L}^* , согласно критерию Гриффитса [8]: $\bar{L}^* = (8G\gamma)/[\pi(1-\nu)\sigma^2]$ (G – модуль сдвига, $\gamma = Gb/10$ – удельная поверхностная энергия, ν – коэффициент Пуассона, b – вектор Бюргерса, σ – приложенное внешнее напряжение) с учетом фактора концентрации напряжений в голове скопления $\beta = \bar{\sigma}/\sigma = [2\pi(1-\nu)\sigma]/(Gb\rho^{1/2})$ [8] (ρ – плотность подвижных дислокаций) оказывается следующей: $\bar{L}^* = 8 \cdot 10^{-7}$ м, что фактически и наблюдается.

Из анализа расположения пиков рассеяния следует [6], что появляющиеся крупные трещины залегают в плоскостях типа $\{100\}$. Поэтому наиболее вероятный механизм их образования – механизм Коттрелла [8] – раскрытие трещин по стенкам «сидячих» дислокаций, образующихся вследствие дислокационных реакций в пересечениях взаимноперпендикулярных плоскостей скольжения.

Результаты обработки данных светорассеяния после каждого цикла по методике [7] приведены на рис. 2, 3. Как следует из этих рисунков, концентрация (N), объем (v) и объемная доля (Nv) и малых, и крупных трещин с ростом номера цикла (i) возрастают, но темп роста объемной доли крупных трещин существенно выше.

После третьего, четвертого циклов, как правило, наблюдается расщепление максимумов рассеяния на два (рис. 1с). Это связывается с образованием компактных упорядоченных групп трещин (рис. 1д), воспринимаемых как единые трещины, габитус которых повернут на угол $\pm\alpha$ относительно плоскости $\{100\}$ симметрично в обе стороны. Образование ступенчатой трещины, похожей на группу рис. 1д, наблюдали в интерметаллиде Ti₃Al [9] при ступенчатом распространении трещины. Термодинамическая целесообразность образования групп может быть связана с минимизацией суммарной упругой энергии системы трещин, как это имеет место в случае упорядочения инофазных частиц в распадающихся твердых растворах [10].

Иногда появляется система максимумов, свидетельствующая о появлении в небольшом количестве трещин в плоскостях типа $\{110\}$. Возможны два механизма их образования: механизм вскрытия параллельных полос скольжения и механизм Стро (раскрытие трещины в вершине заторможенного дислокационного скопления). Первый срабатывает при больших нагрузках и больших степенях деформации [11]. В наших условиях он не исключен, но представляется менее вероятным, чем механизм Стро.

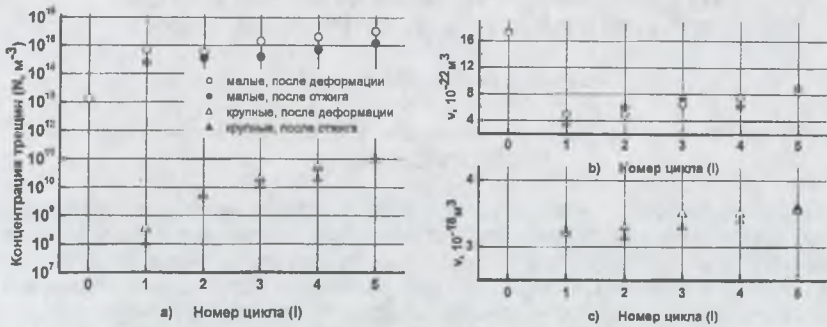


Рис. 2. Зависимости: *a* – концентрации частиц (N) и *b, c* – объема трещин (v) от номера цикла (i).

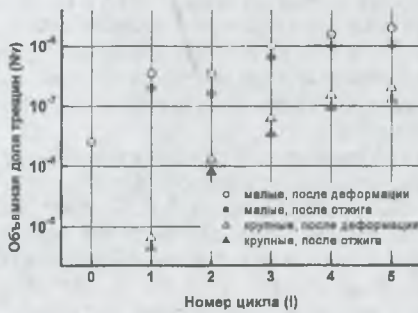


Рис. 3. Зависимость объемной доли (Nv) трещин от номера цикла (i).

Из проведенных опытов следует, что опасность разрушения кристалла исходит, прежде всего, от крупных трещин, объемная доля которых не только быстро растет с деформацией, но еще и имеет тенденцию к образованию существенно более крупных упорядоченных групп, а далее, возможно, – и магистральных (разрушающих) трещин.

Список литературы

1. А.М.Лексовский, Б.Л.Баскин, ФТТ 53, 1157 (2011).
2. Г.А.Малыгин, ФТТ, 49, 961 (2007).
3. С.А.Баранникова, М.В.Надежкин, Л.Б.Зуев, ФТТ 51, 1081 (2009).
4. В.И.Бетехтин, А.Г.Кадомцев, ФТТ 47, 801 (2005).
5. С.П.Тимошенко, Дж.Гудьер, Теория упругости, Наука, Москва (1975).
6. Я.Е.Гегузин, В.Г.Кононенко, ФТТ 14, 2513 (1972).
7. В.Г.Кононенко, Д.В.Плужникова, Оптика и спектроскопия, 50, 489 (1981).
8. Дж.Хирт, И.Лоте, Теория дислокаций, Атомиздат, Москва (1972).
9. Л.Е.Карькина, О.А.Елкина, Л.И.Яковенкова, ФТТ 49, 1063 (2007).
10. В.Г.Кононенко, В.Хайхлер, Кристаллография, 25, 765 (1980).
11. Ж.Фридель, Дислокации, Мир, Москва (1967).