

05;12

## Акустическая эмиссия при нагреве деформированного алюминия

© В.А. Плотников

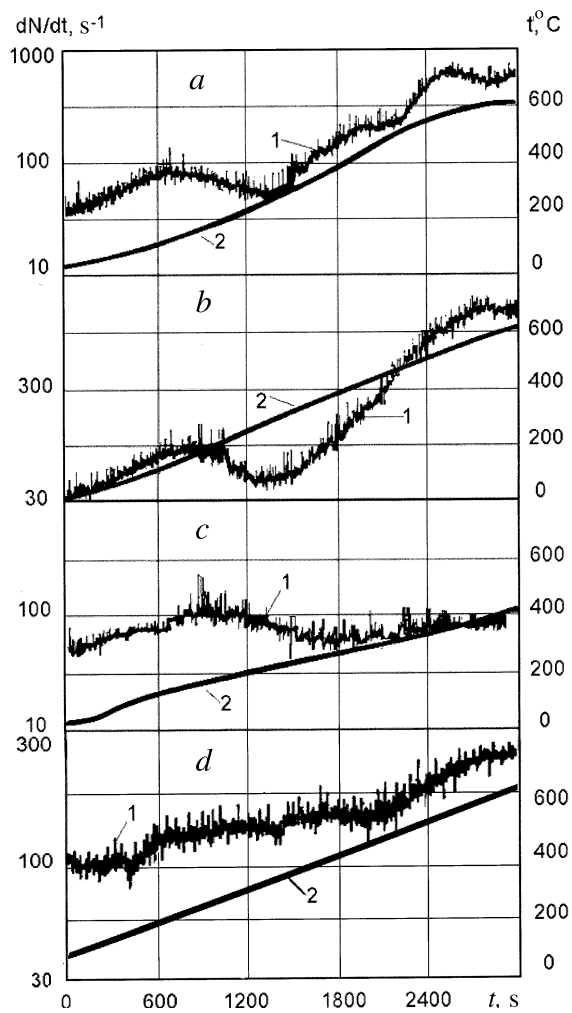
Алтайский государственный университет, Барнаул  
E-mail: phys@dcn-asu.ru

Поступило в Редакцию 19 января 2001 г.

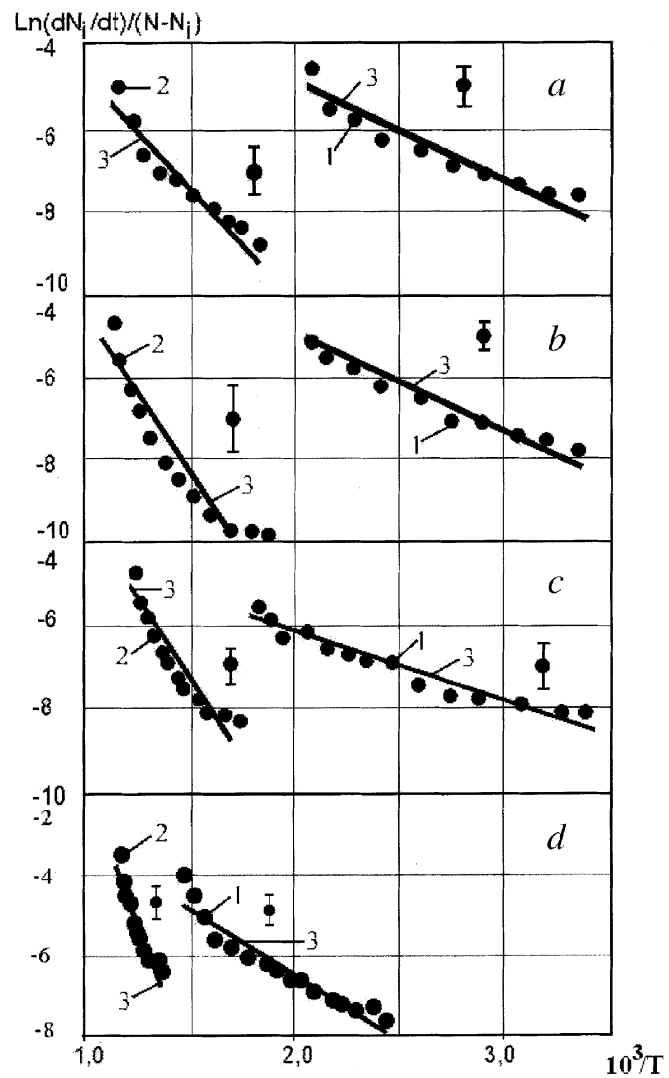
Обнаружен акустический эффект при отжиге предварительно деформированного поликристаллического алюминия. Хотя процессы, протекающие в ходе отжига, относят к термоактивируемым (микроскопическим, диффузионным), формирование акустического излучения осуществляется в актах макроскопического спонтанного перемещения границы раздела. Об этом свидетельствуют приведенные результаты анализа эффективной энергии активации и исследование зернограничной структуры.

1. Среди многообразия в проявлении акустической активности в ходе нагрева деформированного алюминия с умеренными скоростями выделяется ситуация, характеризующая рекристаллизацию после предварительной деформации, близкой к критической. На рис. 1 приведены фрагменты кривых зависимости интенсивности акустической эмиссии  $dN/dt$  (скорости счета), когда излучение обусловлено именно таким развитием процесса, наблюдаемым за три цикла кратковременного нагрева до  $600^\circ\text{C}$  и охлаждения до  $20^\circ\text{C}$ .

Особенность формирования акустического излучения, а значит и эволюции структуры алюминия, состоит в наличии двух участков: низкотемпературного — в интервале температур  $20\text{--}250^\circ\text{C}$  и высокотемпературного — в интервале около  $250\text{--}600^\circ\text{C}$ . В высокотемпературном интервале интенсивность излучения растет с увеличением температуры, достигая максимального значения при  $600^\circ\text{C}$ . Изотермическая выдержка при  $600^\circ\text{C}$  привела к постепенному снижению интенсивности, что, очевидно, связано с уменьшением интенсивности миграции границ зерен. Другая особенность — сохранение акустической активности высокого уровня во втором цикле нагрева до  $600^\circ\text{C}$ . Лишь в третьем цикле уровень излучаемой энергии существенно уменьшился. Такой вид зависимости интенсивности акустической эмиссии отражает особенности рекристаллизации после критической деформации.



**Рис. 1.** Характер проявления акустической эмиссии при циклировании нагрева-охлаждения деформированного алюминия: *a* — первый цикл; *b* — второй цикл; *c* — третий цикл; *d* — последующие циклы; 1 — зависимость интенсивности (скорости счета) акустических сигналов от времени нагрева; 2 — зависимость температуры образца от времени нагрева.



**Рис. 2.** Определение эффективной энергии активации процессов, протекающих в ходе отжига образца: 1 — низкотемпературные процессы; 2 — высокотемпературные процессы; 3 — линейная аппроксимация экспериментальных точек.

## Эффективная энергия активации при отжиге деформированного алюминия

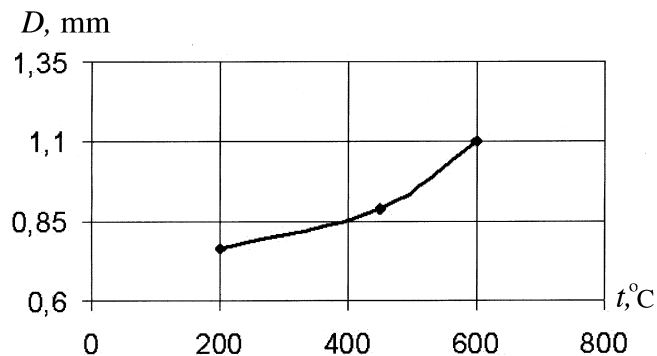
| Отжиг          | Энергия активации, kJ/mol |                | Температурный интервал       |                              |
|----------------|---------------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
|                | $Q_1$                     | $Q_2$          | $\Delta T_1, ^\circ\text{C}$ | $\Delta T_2, ^\circ\text{C}$ |
| Цикл 1         | $19.3 \pm 1.0$            | $47.2 \pm 3.7$ | 25–260                       | 270–600                      |
| Цикл 2         | $19.0 \pm 1.0$            | $61.9 \pm 3.7$ | 25–270                       | 270–600                      |
| Цикл 3         | $13.4 \pm 0.7$            | $65.9 \pm 3.3$ | 20–280                       | 300–600                      |
| Цикл повторный | $8.4 \pm 0.6$             | $74.3 \pm 8.2$ | 60–350                       | 400–600                      |

Конечным результатом термического воздействия на структуру поликристаллического алюминия является деградация акустической эмиссии в последующих термоциклах. На рис. 1, *d* представлена акустическая кривая при повторном нагреве алюминия. Как и следовало ожидать, в интервале температур 350–600°C пик излучения отсутствует, наблюдается лишь монотонное нарастание интенсивности излучения.

2. Анализ акустической эмиссии проводился для определения эффективной энергии активации процессов, ответственных за продуцирование акустического излучения. Процедура определения активационных параметров путем анализа акустического излучения по одному неизотермическому отжигу описана ранее [1].

На рис. 2 и в таблице приведены результаты такого анализа. Вычисленные значения энергии активации (см. таблицу) показали, что в низкотемпературной области ее величина равна 19.0, а в высокотемпературной — 47.2 kJ/mol, причем к третьему циклу ее значение в низкотемпературной области снизилось до 13.4, а в высокотемпературной — выросло до 65.9 kJ/mol. Повторный отжиг выявил два процесса (рис. 2, *d*) с низким (8.3 kJ/mol) и высоким (74.3 kJ/mol) значениями энергии активации.

3. Рассмотрим рис. 3, на котором приведена зависимость размера зерна алюминия от температуры нагрева до 600°C со скоростью около 1 grad/s. Как следует из сопоставления данных, приведенных на рис. 1–3 и в таблице, акустическая эмиссия в интервале 300–600°C коррелирует с эволюцией зернограничной структуры, протекающей в ходе отжига деформированного алюминия. Найденные значения энергии активации и характер изменения размера зерна в температурном интервале 350–600°C свидетельствуют о развитии процесса миграции границ при рекристаллизации [2].



**Рис. 3.** Зависимость размера зерна образца, деформированного на 5%, от температуры изотермического отжига (нагрев со скоростью около 1 град/с).

Отжиг алюминия в температурном интервале 20–250°C сопровождается акустическим излучением низкой интенсивности, а процесс, ответственный за формирование излучения, характеризуется низким значением энергии активации (см. таблицу). Существование низкотемпературного акустического излучения в алюминии, очевидно, связано с высоким значением энергии дефектов упаковки, что приводит к активно протекающему процессу переползания дислокаций и взаимодействию их как друг с другом, так и с границами [3–5].

При нагреве до высоких температур возможна лишь миграция границ, энергия активации этого процесса близка энергии активации самодиффузии [4,5]. Следует, однако, отметить: равенство значений энергии активации еще не означает, что механизм миграции сводится к диффузии. Речь может идти лишь о процессах, контролируемых диффузией. При этом рассматривают групповой коллективный и групповой кооперативный переходы, реализация которых смещает границу раздела как макроскопический объект в новое положение [6,7].

По данным работы [3] средняя скорость миграции единичной границы может меняться от  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$  см/с. Однако в действительности миграция во фронтальном направлении осуществляется спонтанными перемещениями границы или ее фрагментов [2–4], а приводимые значения скорости не соответствуют действительной скорости спонтанного (скачкообразного) перемещения. Скорость спонтанного перемещения велика и, по-видимому, соизмерима со скоростью упругих волн в данной

кристаллической среде (косвенно этот вывод подтверждается наблюдениями за "мгновенным" появлением зародыща рекристаллизации размером до  $1 \mu\text{m}$  [3]). Масштаб таких перемещений различен, особенно при низких температурах [2].

Из сказанного можно заключить, что наиболее вероятно продуцирование акустического сигнала осуществляется в особые моменты спонтанного перемещения границы, связанные с ее остановками. В этой связи возможны два варианта продуцирования акустического импульса: как тормозной сигнал и как переходной, существенно зависящие от соотношения между скоростью спонтанного движения границы и скоростью упругих волн. Такой механизм совпадает с динамическим механизмом продуцирования акустического сигнала в актах спонтанного (микровзрывного) движения межфазной границы при мартенситных превращениях [8]. Более того, фактически существование акустического излучения при отжиге подтверждает данные [6,7] о протекании своеобразных групповых коллективных и кооперативных (коррелированных) актов в ходе миграции границы как макроскопического объекта.

## Список литературы

- [1] *Плотников В.А.* Природа акустической эмиссии при отжиге металлических материалов. Томск, 1992. 61 с. Деп. в ВИНТИ, № 606-В92.
- [2] *Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С.* Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
- [3] *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978. 568 с.
- [4] *Копецкий Ч.В., Орлов А.Н., Фионова Л.К.* Границы зерен в чистых металлах. М.: Наука, 1987. 158 с.
- [5] *Кайбышев О.А., Валиев Р.З.* Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. 214 с.
- [6] *Копецкий Ч.В., Сурсаева В.Г., Швиндлерман Л.С.* // ФТТ. 1979. Т. 21. № 2. С. 401–405.
- [7] *Молодов Д.А., Страумал Б.Б., Швиндлерман Л.С.* // ФТТ. 1984. Т. 26. № 4. С. 1033–1039.
- [8] *Плотников В.А.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 13. С. 15–22.