

05;08

Акустическая диссипация энергии при распаде пересыщенных твердых растворов

© В.А. Плотников

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

Поступило в Редакцию 4 июня 2001 г.

Распад пересыщенных твердых растворов Al–4.0 at% Cu и Al–6.5 at% Zn сопровождается продуцированием акустического излучения. Акустическое излучение зарегистрировано на стадии формирования концентрационных неоднородностей (зон Гинье–Престона) при старении сплава Al–4.0 at% Cu и на ранней стадии распада сплава Al–6.5 at% Zn. Можно выделить два механизма продуцирования акустических сигналов в ходе распада: механизм динамической релаксации энергии, связанный с процессом спонтанного перемещения межфазной границы; механизм пластической релаксации упругой энергии, обусловленный зарождением дислокаций несоответствия при нарушении когерентности.

1. Как известно, состояние сплава с избыточной при данной температуре концентрацией второй компоненты является неравновесным, характеризующимся избыточной свободной энергией, имеющим тенденцию к распаду пересыщенного твердого раствора. Движущей силой такого распада твердого раствора является уменьшение гиббсовой свободной энергии [1]. В модели зарождения при распаде лежит положение о том, что новая и материнская фазы разделены границей раздела (межфазной границей), вызывающей локальное повышение свободной энергии, в то же время появление некоторого объема новой фазы вызывает уменьшение свободной энергии благодаря переходу системы в более стабильное состояние. Акустическое излучение, зарегистрированное в ходе распада, свидетельствует, что некоторая часть свободной энергии диссипирует, т. е. процесс распада сопровождается акустической диссипацией энергии.

2. Исследование акустической эмиссии при распаде пересыщенных твердых растворов производили на двух сплавах: Al–Cu с 4.0 at% Cu

и Al–Zn с 6.5 at% Zn, выплавленных в электродуговой печи в атмосфере очищенного гелия из химически чистых компонент.

Выбор сплавов обусловлено тем, что в сплаве Al–4.0 at% Cu при распаде на ранней стадии формируются дискообразные выделения (зоны Гинье–Престона), а в сплаве Al–6.5 at% Zn — сферические. Кроме того, распад твердого раствора в этих сплавах идет по-разному: путем зарождения и роста при распаде раствора Al–4.0 at% Cu; спинодальным распадом твердого раствора сплава Al–6.5 at% Zn [1].

Пересыщение твердых растворов производили закалкой сплавов от температур гомогенного состояния твердых растворов. Сплав Al–4.0 at% Cu выдерживали в течение 1 h при 570°C, а затем охлаждали в воде, сплав Al–6.5 at% Zn после охлаждения в воде хранили в жидком азоте в связи с высокой нестабильностью пересыщенного раствора.

3. Распад пересыщенных твердых растворов проводили при непрерывном нагреве с умеренной скоростью (около 1 grad/s). Одновременно регистрировали акустическое излучение. Методика регистрации акустической эмиссии стандартна и описана ранее [2]. На рис. 1 приведены фрагменты акустических кривых — зависимости интенсивности (скорости счета) dN/dt от времени процесса, здесь же помещены температурные кривые.

Акустическая активность при нагреве образцов из сплава Al–4.0 at% Cu проявляется в температурном интервале 30–250°C с максимумом при 150°C, а в сплаве Al–6.5 at% Zn — в интервале — 50–100°C с максимумом при 70°C.

4. Анализ энергии активации проводили в предположении, что процесс распада пересыщенного твердого раствора можно описать как реакцию первого порядка, а скорость реакции пропорциональна интенсивности акустической эмиссии dN/dt . Таким образом, сопоставляя интенсивность акустической эмиссии на рис. 1 с температурой процесса в исследуемом образце, приходим к анализу константы скорости k зависимостью Аррениуса $k = k_0 \exp(-Q/KT)$, где Q — энергия активации, K — постоянная Больцмана, T — температура [2]

Результаты анализа приведены на рис. 2 и в таблице. На рисунке видим, что точки хорошо ложатся на прямую в системе координат $\ln[dN_i/dt_i/(N - N_i)] - 10^3/T$. Здесь N — общее число импульсов, N_i — число импульсов к t_i моменту времени. В таблице приведены значения энергии активации и коэффициента корреляции. Величина коэффициента

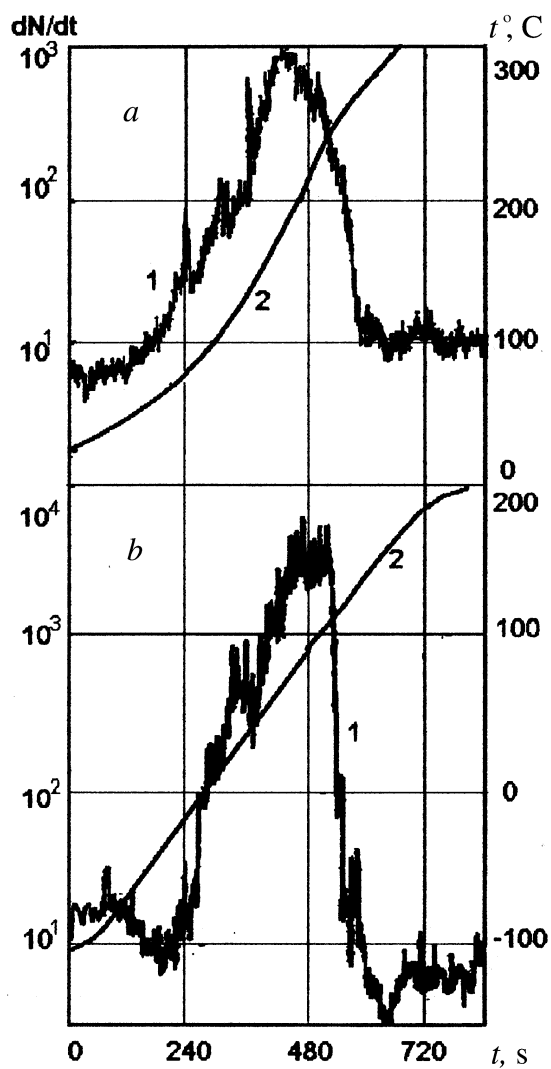


Рис. 1. Характер проявления акустической эмиссии при распаде пересыщенных твердых растворов: *a* — сплав Al-4.0 at% Cu; *b* — сплав Al-6.5 at% Zn; 1 — зависимость интенсивности (скорости счета) акустических сигналов от времени нагрева; 2 — зависимость температуры образца от времени нагрева.

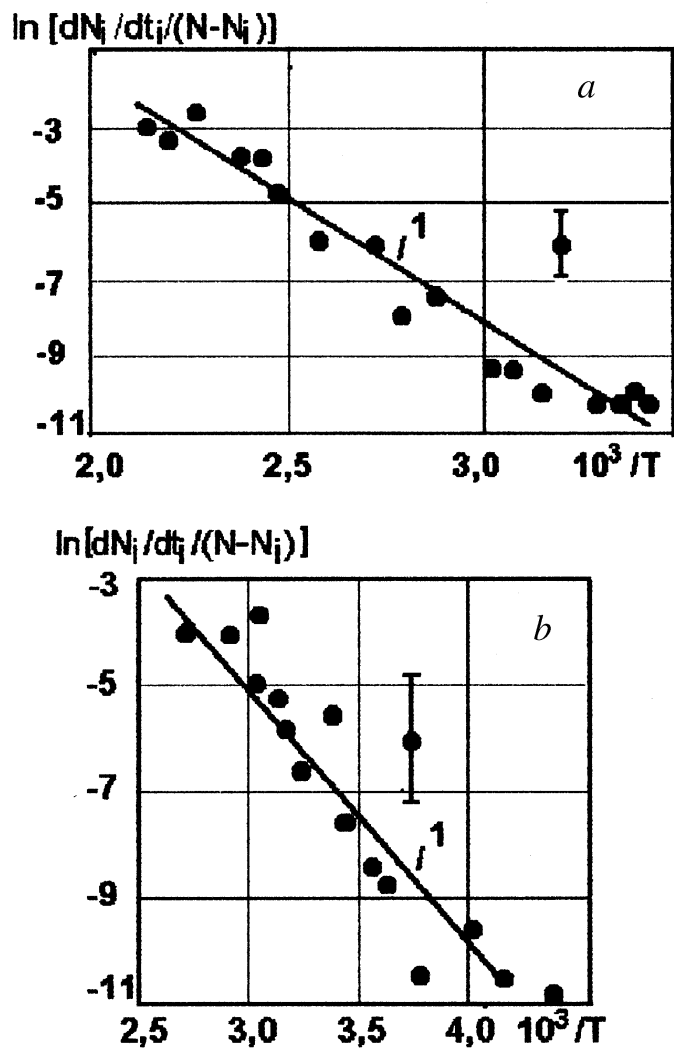


Рис. 2. Определение эффективной энергии активации процессов, протекающих в ходе отжига образца: *a* — сплав Al-4.0 at% Cu; *b* — сплав Al-6.5 at% Zn; *1* — линейная аппроксимация экспериментальных точек.

Значения энергии активации распада пересыщенных твердых растворов сплавов Al–4.0 at% Cu и Al–6.5 at% Zn

Сплавы	Температурный интервал, °C	Энергия активации, kJ/mol	Коэффициент корреляции
Al–4.0 at% Cu	30–150–250	54.9 ± 6.5	0.975
Al–6.5 at% Zn	–50–70–100	44.0 ± 8.4	0.936

Примечание. Вторая цифра температурного интервала соответствует положению максимума акустической эмиссии.

близка к единице, а значения энергии активации соответствуют литературным данным [3].

5. Значения энергии активации свидетельствуют о том, что продуцирование акустического излучения связано с процессом, контролируемым диффузией соответствующих компонент сплава на начальной стадии старения. Наличие же акустического эффекта при распаде свидетельствует о протекании своеобразных кооперативных процессов при формировании зон. Таким кооперативным процессом на ранней стадии старения может быть спонтанное появление зон Гинье–Престона и их последующий спонтанный рост. Акустическая диссипация при таком варианте развития процесса распада пересыщенного раствора обусловлена динамической релаксацией энергии, связанной со спонтанным перемещением границы раздела [4].

В то же время на границе раздела зародыш и матрица наблюдается атомное соответствие, которое может быть полностью когерентным, полукogerентным и полностью некогерентным. Форма выделений может быть игольчатой, пластинчатой, сферической. Существенно, что концы игольчатых и края пластинчатых выделений являются полностью некогерентными, т.е. несоответствие кристаллических структур выделения и матрицы приводит к появлению энергии деформации. Релаксация упругой энергии деформации сопровождается образованием дислокаций несоответствия, либо упругая энергия может релаксировать за счет движения дислокаций и точечных дефектов. Второй случай относится к высокотемпературным процессам выделения, первый — реализуется при низких температурах. Пластическая деформация (пластическая релаксация упругой энергии) является экспериментально наблюдаемым эффектом на стадии образования зон [1].

Из всего сказанного следует, что акустическая диссипация энергии при распаде пересыщенного твердого раствора может осуществляться по двум механизмам: путем динамической релаксации энергии, обусловленной актами спонтанного перемещения межфазной границы; путем пластической релаксации энергии, обусловленной генерацией дислокаций несоответствия при нарушении когерентности на межфазной границе.

Список литературы

- [1] *Кан Р.У., Хаазен П.* Физическое металловедение. Т. 2. М.: Металлургия, 1987. 624 с.
- [2] *Плотников В.А.* Природа акустической эмиссии при отжиге металлических материалов / Ред. журн. Изв. вузов. Физика. Томск, 1992. 61 с. Деп. в ВИНТИ, № 686-В92.
- [3] *Паскаль Ю.И., Савицкий К.В.* // Изв. вузов. Физика. 1965. № 1. С. 170–174.
- [4] *Плотников В.А.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 13. С. 15–22.