

05:08

## Деформация серебра в Bi-2223/Ag лентах по данным акустической эмиссии

© Е. Дулькин, В. Бейлин, Е. Ячин,  
М. Рот, Л.В. Гребенкина

Graduate School of Applied Science, The Hebrew University of Jerusalem,  
Jerusalem 91904, ISRAEL

НИИМ и ПМ Ростовского государственного университета, Ростов-на-Дону  
344090, РОССИЯ

*Поступило в Редакцию 27 декабря 2001 г.*

Методом акустической эмиссии исследован процесс охлаждения Bi-2223/Ag ленты после вторичного спекания при 1000 К. Ниже 500 К зарегистрированы сигналы акустической эмиссии, активность которых возрастала по мере понижения температуры. Установлено, что наблюдаемая акустическая эмиссия отражает процесс пластического течения серебряной оболочки в результате различных коэффициентов теплового расширения серебра и керамического сердечника Bi-2223/Ag ленты.

В [1] мы сообщали о результатах исследования процесса вторичного спекания Bi-2223/Ag ленты методом акустической эмиссии (АЭ). При нагреве ленты были зарегистрированы сигналы АЭ в интервале температур 840–930 К. Было установлено, что существование АЭ отражает процесс жидкофазного залечивания трещин, возникших при прокатке ленты. Однако процесс охлаждения остался не изученным. Тем не менее именно в процессе охлаждения окончательно формируются физико-механические свойства ленты как промышленного изделия.

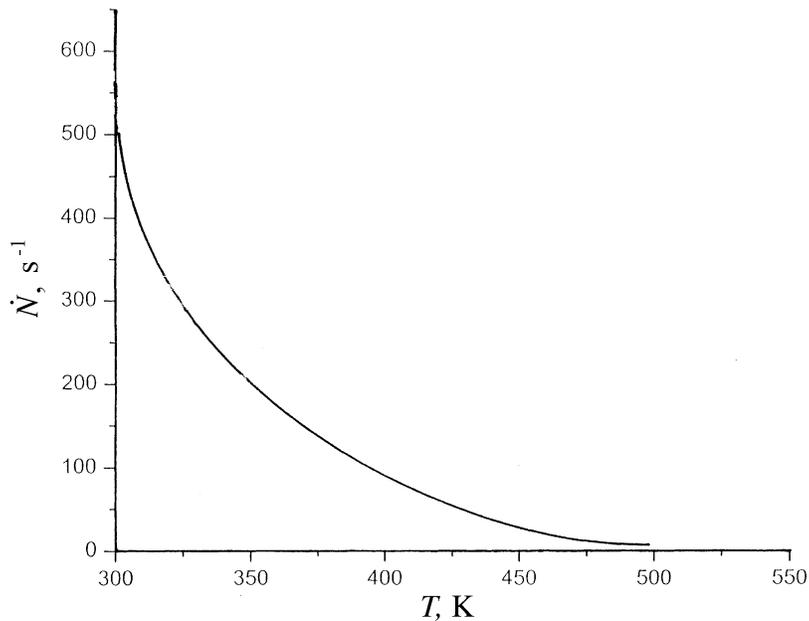


График зависимости активности  $\dot{N}$  АЭ в процессе охлаждения Bi-2223/Ag ленты после ее отжига в течение 20 h при 1000 K.

Ввиду успешного применения АЭ в [1] в настоящей работе проводилось исследование процесса охлаждения Bi-2223/Ag ленты после ее вторичного спекания методом АЭ.

Исследовались образцы Bi-2223/Ag ленты длиной 10 mm, шириной 3 mm и толщиной 0.250 mm, полученные по стандартной PIT (powder-in-tube) технологии [2]. Исследования проводились по методике [3]. Образцы приклеивались высокотемпературным клеем к торцу цилиндрического акустического волновода, введенного в печь. К противоположному, находящемуся вне печи, торцу волновода приклеивался датчик АЭ из пьезокерамики ЦТС-19. Образцы нагревались со скоростью 5 K/min, выдерживались 20 h при температуре 1000 K и охлаждались с той же скоростью.

При нагреве образцов ленты сигналы АЭ наблюдаются в диапазоне 840–930 K, как и в [1]. При охлаждении образцов АЭ проявляется ниже 500 K (см. рисунок), причем величина активности  $\dot{N}$  АЭ возрастает

по мере понижения температуры. Возрастание  $\dot{N}$  АЭ продолжается по экспоненциальному закону до полного охлаждения ленты до комнатной температуры. Количественный анализ полученных данных может приводить к следующей зависимости величины  $\dot{N}$  АЭ от температуры:

$$\dot{N}(T) = 2 \cdot 10^5 \exp(-0.02T), \quad (1)$$

где  $T$  — текущая температура.

Для объяснения возникновения АЭ сигналов оценим относительную деформацию серебряной оболочки и керамического сердечника Bi-2223/Ag ленты. Коэффициенты линейного теплового расширения серебра и Bi-2223 керамики (вдоль оси  $a$ ) равны  $\alpha_s = 20.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $\alpha_c = 13.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  соответственно [4]. Ввиду высокой пластичности серебра (предел текучести 65 МПа) и достаточной прочности спеченной керамики (предел прочности 150 МПа) [5] именно серебро испытывает растяжение относительно керамического сердечника в процессе охлаждения ленты. Следовательно, мы можем рассчитать относительную деформацию серебра как 0.35% при охлаждении ленты от 1000 до 500 К. Полученная величина деформации растяжения серебра превышает условный предел деформации упругости (0.2%) для металлов. Как известно, переход от упругого расширения к пластическому течению в металлах, как правило, сопровождается АЭ [6–8].

Благодаря полученным результатам, мы можем объяснить происхождение сигналов АЭ следующим образом. В процессе длительного отжига при высокой температуре лента, состоящая из серебряной оболочки и керамического сердечника, превращается в композит за счет термодиффузии. В процессе охлаждения из-за различных коэффициентов теплового линейного расширения в ленте развиваются механические напряжения, приводящие в более пластичном серебре к существенным деформациям ее оболочки. Когда величина деформации превышает критическую, в серебре происходит переход от упругого растяжения к пластическому течению. При этом в серебре возникают дислокации несоответствия, которые и являются источником АЭ. По мере охлаждения ленты величина деформации увеличивается, соответственно возрастает количество дислокаций, что находит свое отражение в возрастании активности  $\dot{N}$  АЭ. Необходимо отметить существенное различие в величинах активностей  $\dot{N}$  АЭ при возникновении и размножении дислокаций в настоящей работе и при залечивании трещин в [1].

Из сравнения этих величин следует, что энергия размножения дислокаций по крайней мере на порядок больше, чем энергия залечивания трещин.

## Список литературы

- [1] *Dul'kin E., Beilin V., Yashchin E., Roth M., Гребенкина Л.В.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 9. С. 79–82.
- [2] *Beilin V., Goldgirsh A., Yashchin E., Roth M., Schieber M.* // Physics C. 1988. V. 309. P. 56–64.
- [3] *Дулькин Е.А.* // СФХТ. 1992. Т. 5. С. 102–103.
- [4] *Киселев А.А.* Высокотемпературная сверхпроводимость. Л.: Машиностроение, 1990. Вып. 1. 686 с.
- [5] *Hui Z., Skov-Hansen P., Freltoft T.* // Supercond. Sci. Technol. 1997. V. 10. P. 1–16.
- [6] *Hsu S.S.-Y., Ono K.* // J. Acoust. Soc. Am. 1982. V. 74. P. 1304–1310.
- [7] *Бартнев О.А., Хамитов В.А.* // Зав. лаборатория. 1987. Т. 53. С. 37–45.
- [8] *Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 22. С. 14–18.