

05;08

## **Аномальный акустический эффект при мартенситных превращениях в сплавах на основе никелида титана**

© В.А. Плотников, Д.В. Коханенко

Алтайский государственный университет, Барнаул

E-mail: plotnikov@phys.dcn-asu.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2002 г.

В окончательной редакции 20 мая 2002 г.

Проведение мартенситных превращений в сплавах на основе никелида титана при механическом нагружении меняет характер акустической эмиссии на „аномальный“ — циклирование превращений при последовательном росте механического напряжения в ходе прямого мартенситного превращения сопровождается ростом энергии акустического излучения, а не снижением. Такой характер акустической эмиссии свидетельствует о существенном влиянии внешнего напряжения на мартенситные превращения и процесс диссипации энергии в ходе превращений.

1. Известно, что в сплавах на основе никелида титана при термоциклировании в интервале температур, содержащем интервал термоупругих мартенситных превращений (МП)  $B2 \rightarrow B19$ ,  $B2 \rightarrow B19'$ ,  $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ , наблюдается акустическая эмиссия, типичный, закономерный характер проявления которой состоит в существенной асимметрии энергии акустического излучения, продуцируемой при прямом и обратном МП [1]. Обнаружено два типа асимметрии: асимметрия первого типа (энергия излучения при прямом  $B2 \rightarrow B19'$  МП существенно выше, чем при обратном); асимметрия второго типа (энергия излучения при обратном  $B19' \rightarrow B2$  МП существенно выше, чем при прямом). При многократных циклах мартенситных превращений наблюдается трансформация асимметрии первого типа во второй — инверсия асимметрии. Инверсия асимметрии наблюдается и при возрастании концентрации никеля в двойных сплавах. Эти закономерности акустической эмиссии обусловлены структурным состоянием  $B2$ -фазы, которое существенно влияет на механические свойства сплавов, на кинетические

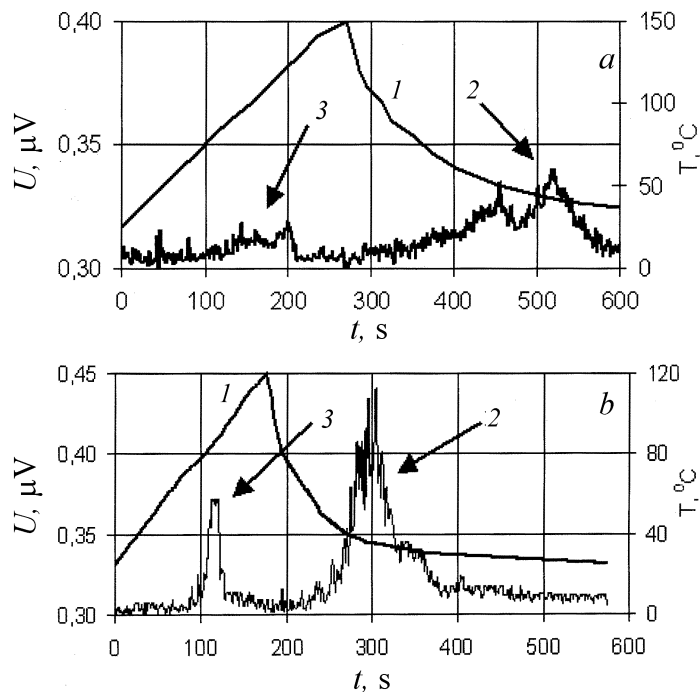
характеристики и последовательность мартенситных превращений [1]. Исходя из предположения, что внешнее механическое напряжение, как и температура, является параметром состояния системы, были проведены эксперименты по выяснению влияния на мартенситные превращения и акустическую эмиссию внешнего статического нагружения.

2. Эксперименты представляли циклирование мартенситных превращений по 3 вариантам нагружения с одновременной регистрацией акустического излучения. В первом варианте многократные циклы мартенситных превращений осуществляли при нулевой внешней нагрузке, во втором варианте циклирование проводили при симметричном нагружении (то есть при прямом и обратном МП) последовательно возрастающим механическим напряжением, в третьем — циклирование проводили при асимметричном нагружении (при прямом МП) последовательно возрастающим напряжением. Во всех экспериментах деформирование осуществляли изгибом образцов в виде пластинок длиной 40 mm, шириной 4 mm и толщиной около 1 mm, закрепленных консольно.

3. На рис. 1 показаны фрагменты акустических кривых (зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии от времени процесса), здесь же приведены температурные кривые (зависимость температуры от времени процесса). Акустические кривые свидетельствуют о существенной асимметрии акустической диссипации в цикле МП — энергия излучения, продуцируемого при прямом превращении превышает энергию излучения при обратном. Кроме того, при симметричном нагружении наблюдается рост энергии излучения при обратном превращении до некоторого уровня насыщения. Однако энергия излучения остается ниже, чем при прямом МП.

На рис. 2 представлена зависимость энергии излучения от номера цикла. Как следует из приведенных данных, циклирование МП приводит к снижению энергии излучения при прямом превращении до насыщения, при обратном — циклирование не меняет энергии излучения. Проведение циклов мартенситных превращений при приложении симметричной статической нагрузки не меняет характера продуцирования акустического излучения (рис. 2, *b*). Энергия излучения в ходе циклов МП снижается, как в циклах с нулевой нагрузкой.

Нагружение по асимметричной варианту (как показано на рис. 2, *c*) приводит к „аномальному“ монотонному росту энергии излучения до некоторого уровня, существенно (на порядки величины) превосходя-



**Рис. 1.** Фрагменты акустических кривых в сплаве Ti Ni(Mo) в циклах мартенситных превращений при нагружении: *a* — нулевая нагрузка в ходе  $B2 \rightarrow B19'$  и  $B19' \rightarrow B2$  превращениях; *b* — симметричное нагружение при  $B2 \rightarrow B19'$  и  $B19' \rightarrow B2$  превращениях; *c* — асимметричное нагружение (нагружение при  $B2 \rightarrow B19'$  и снятие нагрузки при  $B19' \rightarrow B2$  превращениях); 1 — температурная кривая; 2 — акустическая эмиссия при прямом превращении; 3 — акустическая эмиссия при обратном превращении.

щему уровень насыщения при циклировании с нулевой нагрузкой или при симметричном нагружении. При обратном превращении энергия излучения не меняется.

4. Если акустическая эмиссия при прямом МП обусловлена пластической релаксацией микронапряжений, то можно предполагать, что снижение энергии излучения в начальных циклах прямого МП обусловлено деградацией пластической релаксации. Пластическая релаксация

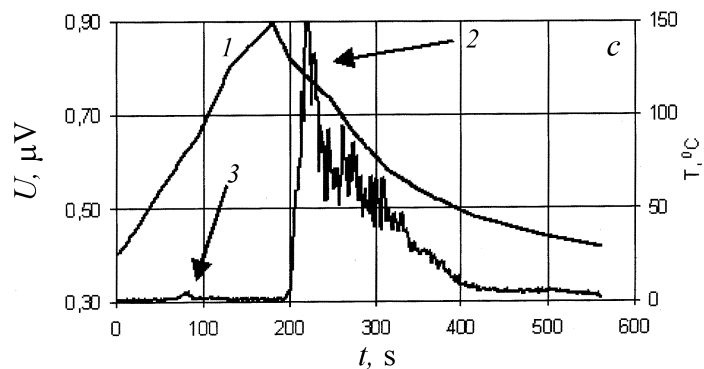


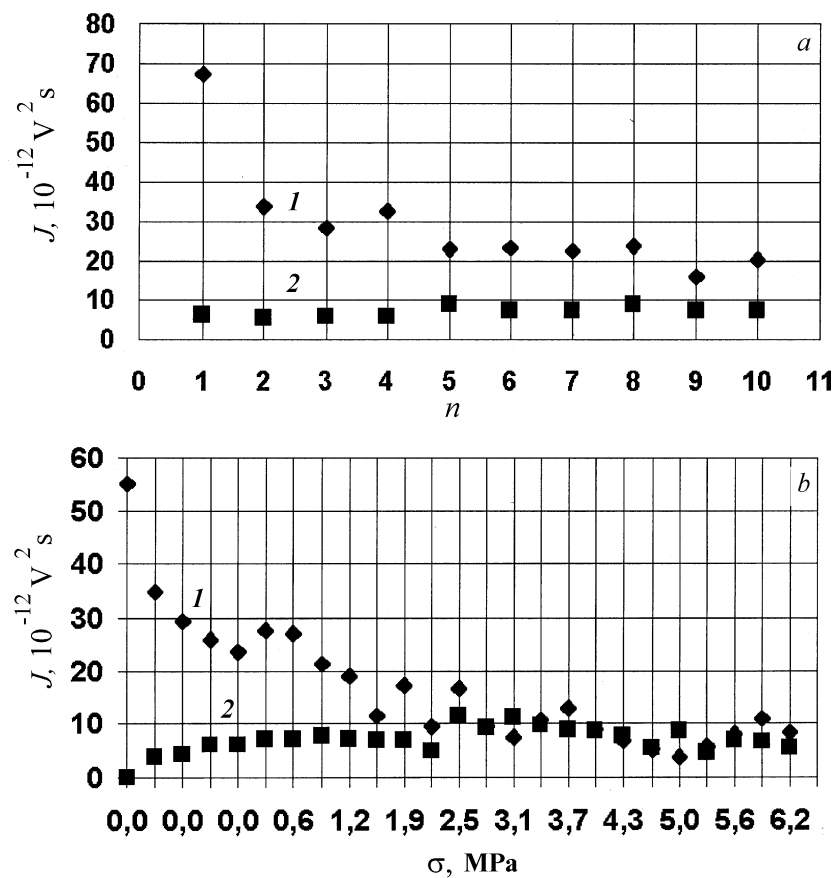
Рис. 1 (продолжение).

(локальная пластическая деформация) заключается в генерировании полных дислокаций на межфазной границе. Эти дислокации наследуются в цикле превращения, что приводит к их накоплению и упрочнению сплава [2]. Однако склонность сплава к пластической релаксации микронапряжений зависит от соотношения между напряжением мартенситного сдвига и пределом текучести. Чем выше напряжение мартенситного сдвига и ниже предел текучести (разность напряжений мала), тем выше вероятность достижения микронапряжениями, локализованными на мартенситных границах, предела текучести и осуществления пластической релаксации.

В сплаве TiNi (Mo) (по данным работы [3]) напряжение мартенситного сдвига около 5–20 МПа, а предел текучести близок к 1000 МПа. Величина разности напряжений велика, то есть вероятность достижения микронапряжениями предела текучести мала (близка к нулю).

После выхода на насыщение остаточное акустическое излучение при прямом МП и тем более при обратном МП не может быть связано с пластической релаксацией микронапряжений. Очевидно, „аномальный“ рост энергии излучения в цикле мартенситного превращения при приложении внешней механической нагрузки имеет динамическую природу и свидетельствует об изменении кинетики мартенситных превращений.

Действительно, в ряде исследований отмечается, что накопление мартенситной деформации и возврат деформации после снятия внешнего нагружения осуществляется спонтанно [4,5]. Эти данные свиде-



**Рис. 2.** Влияние циклирования мартенситных превращений в сплаве на акустическую эмиссию при нагружении: *a* — существенное снижение энергии излучения в цикле B2 → B19' превращения при нулевой нагрузке; *b* — аномальный рост энергии излучения в цикле B2 → B19' превращения при симметричном последовательно возрастающем нагружении; *c* — аномальный рост энергии излучения в цикле B2 → B19' при асимметричном последовательно возрастающем нагружении; 1 — изменение энергии акустического излучения при прямом превращении; 2 — изменение энергии излучения при обратном превращении;  $n$  — номер цикла.

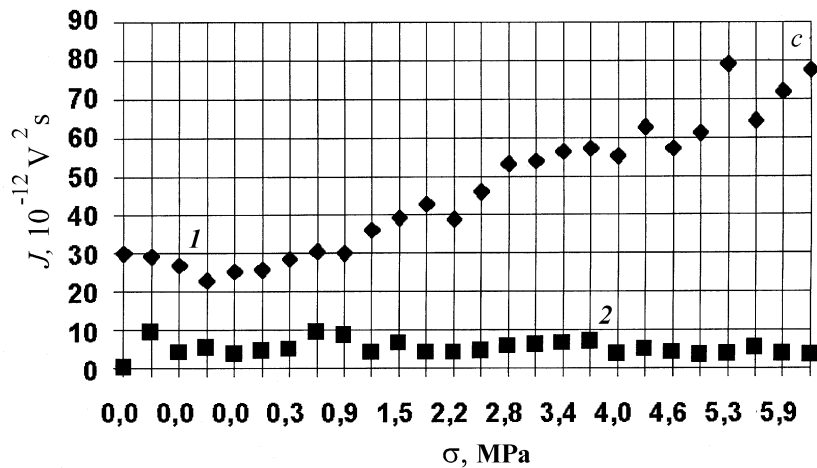


Рис. 2 (продолжение).

тельствуют о смене кинетики мартенситных превращений в условиях действия внешнего напряжения и приближении ее к макроскопически взрывной [6]. Как показано на примере деформации монокристаллов сплава Cu–14.2% Al–4.3% Ni, процесс зарождения кристаллов мартенсита напоминал процесс распространения полосы Людерса, при разгрузке зарождение исходной фазы еще большей степени представлял распространение полосы Людерса [7].

5. Приведенные экспериментальные данные и их обсуждение свидетельствуют, что динамический механизм аномального акустического эффекта в цикле мартенситных превращений при приложении внешней статической нагрузки существенно связан с корреляцией при формировании системы мартенситных кристаллов в макроскопическом объеме. Этот вывод совпадает с выводами работы [8], в которой исследовали аномальный акустический эффект при нарушении полного цикла мартенситных превращений. Чем выше корреляция (в широком смысле когерентность) в актах спонтанных перемещений в системе мартенситных кристаллов, тем выше энергия акустического излучения при динамической релаксации. Если же напряжение мартенситного сдвига близко к пределу текучести сплава, то напряжения, генерируемые на

межфазной границе, и внешнее напряжение могут в совокупности привести к локальной пластической релаксации упругой энергии в ходе прямого мартенситного превращения. В этом случае „аномальный“ акустический эффект обусловлен действием двух факторов — локальной пластической релаксацией и динамической релаксацией энергии.

## Список литературы

- [1] Плотников В.А. // ФММ. 1999. Т. 88. № 4. С. 91–100.
- [2] Плотников В.А., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. // ФММ. 1986. Т. 61. № 4. С. 769–773.
- [3] Гюнтер В.Э., Итин В.И., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. и др. Эффекты памяти формы и их применение в медицине. Новосибирск: Наука, 1992. 742 с.
- [4] Клопотов А.А., Полянский В.А., Гюнтер В.Э. Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Барнаул, 1996. С. 2.
- [5] Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Шиманский С.Р., Чернышенко А.И. // ФММ. 1984. Т. 57. № 3. С. 612–614.
- [6] Шимизу К., Оцука К. Эффект памяти формы в сплавах. М.: Металлургия, 1979. С. 60–86.
- [7] Шепард Л.А. Эффект памяти формы в сплавах. М.: Металлургия, 1979. С. 349–357.
- [8] Плотников В.А. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 1. С. 31–38.