

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТЕРМОУПРУГИХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА В ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ

Плотников В.А.

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

plotnikov@phys.asu.ru

Характерные свойства сплавов на основе никелида титана - эффект памяти и сверхэластичность есть проявление мартенситного механизма накопления и возврата деформации в цикле термоупругих мартенситных превращений $B2 \rightarrow B19'$ $B19' \rightarrow B2$ [1]. В циклах мартенситных превращений при циклическом изменении температуры или механического напряжения наблюдается акустическая эмиссия, характеризующая диссипацию энергии при многократном воспроизводстве мартенситных превращений [2]. Очевидно, между процессами накопления и возврата деформации и продуцированием акустической эмиссии в цикле существует глубокая связь.

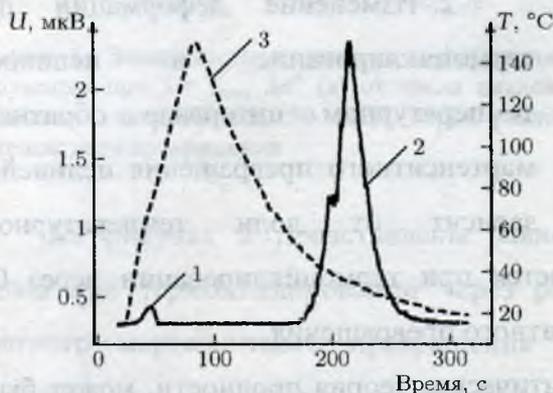


Рисунок 1. Акустическая эмиссия в цикле термоупругих мартенситных превращений в сплаве $Ti_{50}Ni_{49.9}Mo_{0.1}$ после закалки от $850^\circ C$: 1, 2 - зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии от времени при прямом (2) и обратном (1) превращениях; 3 - температура в цикле нагрев-охлаждение

Асимметрия акустической эмиссии при термоупругих мартенситных превращениях в никелиде титана является характерным свойством. Как показано на рисунке 1, акустическая эмиссия, регистрируемая в цикле прямого-обратного мартенситных превращений в никелиде титана, существенно асимметрична.

Энергия акустической эмиссии J

$$J = \sum U^2 \cdot \Delta t \quad (1)$$

при прямом $B2 \rightarrow B19'$

превращении значительно превышает энергию акустической эмиссии при обратном $B19' \rightarrow B2$ превращении.

Многократное циклирование мартенситных превращений сопровождается значительным снижением энергии акустической эмиссии фактически на порядок. Зависимость снижения энергии акустической эмиссии при многократном

циклировании мартенситных превращений $J(k)$ с высокой точностью можно аппроксимировать экспоненциальной функцией

$$J_k = J_n + J_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot k) \quad (2)$$

Здесь J_n – энергия насыщения; J_0 – максимальное значение энергии акустической эмиссии в некотором (гипотетическом) нулевом цикле; α – коэффициент в показателе экспоненты, имеющий формальный смысл скорости снижения энергии акустической эмиссии. Физический смысл коэффициента α состоит в том, что он характеризует склонность сплава к фазовому наклепу в циклах мартенситных превращений, то есть характеризует склонность сплава к упрочнению путем накопления дислокаций.

Термомеханические циклы в никелиде титана при постоянной нагрузке, как показано на рис. 2, сопровождаются накоплением при прямом превращении и возвратом при обратном превращении деформации и продуцированием акустической эмиссии. Акустическая эмиссия также существенно асимметрична: при прямом превращении энергия акустической эмиссии максимальна, при обратном – на уровне

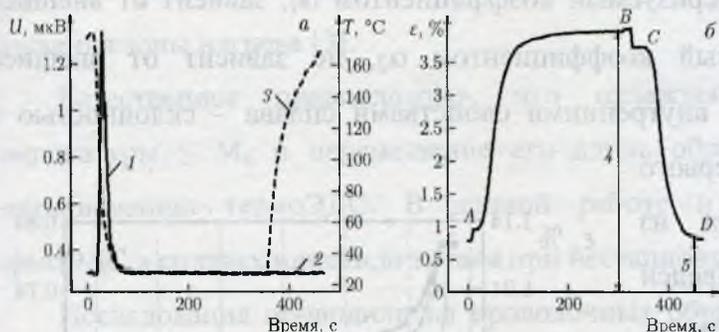


Рисунок 2. Акустическая эмиссия (а) и деформация (б) в цикле мартенситных превращений в сплаве ТН-1В в условиях действия нагрузки 50 МПа, приложенной в ходе прямого мартенситного превращения: 1 – среднее квадратичное напряжение акустической эмиссии при прямом превращении (2 – при обратном); 3 – температура; 4 – полная деформация; 5 – остаточная деформация; АВ - накопление деформации при охлаждении; CD – возврат деформации при нагреве

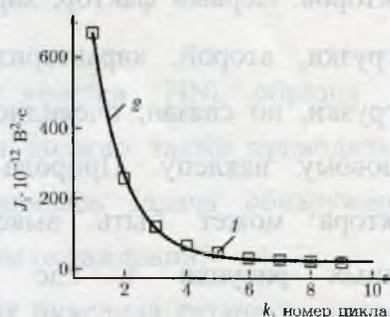


Рисунок 3. Зависимость энергии акустической эмиссии от номера цикла мартенситных превращений в сплаве ТН-1В в условиях действия нагрузки 150 МПа, приложенной при прямом мартенситном превращении: 1 – энергия акустической эмиссии при прямом мартенситном превращении; 2 – функция (3)

фона. Проведение серии циклов в условиях механического нагружения сопровождается снижением энергии акустической эмиссии до уровня насыщения гораздо быстрее, чем при свободном циклировании (рис. 3).

Как было показано [3] снижение энергии акустической эмиссии при циклировании мартенситных превращений в условиях механического нагружения необходимо аппроксимировать двойной экспоненциальной функцией

$$J_k = J_n + J_{01} \exp(-\alpha_1 k) + J_{02} \exp(-\alpha_2 k), \quad (3)$$

где α_1 , α_2 – постоянные, характеризующие скорость снижения энергии акустической эмиссии в циклах. Снижение энергии акустической эмиссии при многократном циклировании мартенситных превращений свидетельствует о существенных изменениях структурного состояния сплава.

Таблица 1 Параметры функций (2) и (3).

Серия	Приложенная нагрузка, МПа	$J_n \pm \Delta J_n$	$J_{01} \pm \Delta J_{01}$	$J_{02} \pm \Delta J_{02}$	$\alpha_1 \pm \Delta \alpha_1$	$\alpha_2 \pm \Delta \alpha_2$	R^2
1	0	634.4	902±17			0.36±0.01	0.998
2	31	24,5 ± 0	1300 ± 0	94 ± 4	2,25 ± 0,02	0,36 ± 0,05	0,998
3	246	28,8 ± 1,2	13272 ± 15687	61 ± 8	4,18 ± 0,31	0,23 ± 0,04	0,999

Из приведенных данных можно сделать вывод, что снижение энергии акустической эмиссии при циклировании мартенситных превращений зависит от двух факторов. Первый фактор, характеризуемый коэффициентом α_1 , зависит от внешней нагрузки, второй, характеризуемый коэффициентом α_2 , не зависит от внешней нагрузки, но связан, очевидно, с внутренними свойствами сплава – склонностью к фазовому наклепу. Природа первого фактора может быть выяснена из данных рисунка 4, где приведен высокотемпературный возврат деформации, свидетельствующий о стабилизации мартенситной фазы в ходе циклирования мартенситных превращений в условиях нагружения. Эффект стабилизации мартенситной фазы в цикле мартенситных превращений снижает объем фазы, участвующей в цикле прямого-обратного превращения.

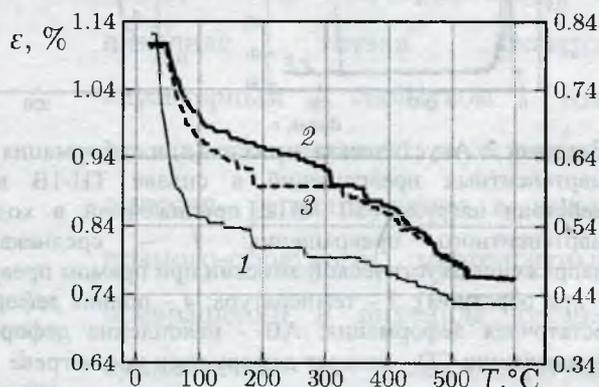


Рисунок 4. Возврат деформации при нагреве до 600°С после серии циклов термоупругих мартенситных превращений в условиях внешнего механического напряжения ($\sigma=160$ МПа), приложенного: 1 – только при прямом превращении (правая ось), 2 – только при обратном, 3 – в полном цикле мартенситных превращений

1. Потекаев А.И., Плотников В.А. Акустическая диссипация энергии при термоупругих мартенситных превращениях. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 196 с.
2. Плотников В.А., Пачин И.М., Грязнов А.С., Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2006. № 1. С. 41-48.