

05:08

Акустическая эмиссия и динамическая релаксация нехимической энергии при мартенситных превращениях

© В.А. Плотников

Алтайский государственный университет, Барнаул

Поступило в Редакцию 2 октября 1998 г.

Атермическое (надбарьерное с критической скоростью) движение мартенситной границы сопровождается продуцированием спонтанного переходного и (или) спонтанного тормозного акустического излучения. Переходное акустическое излучение существенно связано со скоростью движения межфазной границы, коррелированным (когерентным) характером формирования совокупности мартенситных кристаллов. Напротив, тормозное излучение продуцируется при нарушении корреляции.

В сплавах, не склонных к фазовому наклепу, акустическая эмиссия при охлаждении (прямом превращении) уже не может быть обусловленной пластической релаксацией микронапряжений, генерируемых мартенситной структурой в ходе мартенситных превращений (МП). Тем более при нагреве (обратном превращении) акустическая эмиссия, очевидно, имеет иную природу. Эта природа, по нашим данным, определяет асимметричный и симметричный характер диссипации нехимической энергии при обратимых МП, а развиваемый подход позволяет систематизировать разрозненные данные других исследований, накопленные к настоящему времени [1].

1. На рис. 1 рассмотрим фрагменты акустических кривых (зависимость среднеквадратичного напряжения пьезопреобразователя от времени нагрева или охлаждения), наблюдаемых при проведении обратимых МП (первые циклы) в тройных сплавах. Характерной особенностью, устойчиво наблюдаемой в экспериментах, является асимметрия акустической эмиссии в сплавах с концентрацией меди до 8.0 at.% и близкое к симметричному соотношение энергии излучения при прямом и обратном МП в сплавах с концентрацией меди 9.0–11.0 at. %.

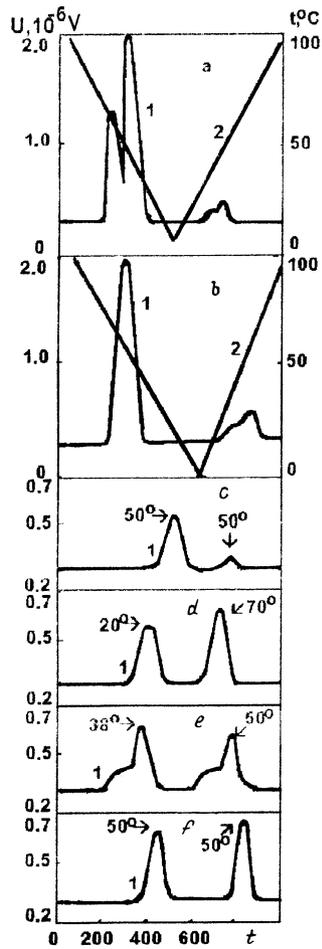


Рис. 1. Фрагменты акустических кривых (I) в сплавах $\text{Ti}_{0.5}\text{Ni}_{0.5-x}\text{Cu}_x$ ($2.0 \leq x \leq 11.0$ at. %): a, b — асимметрия излучения первого типа в сплавах с 2.0, 4.0 at. % Cu при $\text{B2} \rightarrow \text{B19}'$ и $\text{B19}' \rightarrow \text{B2}$ превращениях; c — асимметрия излучения первого типа в сплаве с 8.0 at. % Cu при $\text{B2} \rightarrow \text{B19}$ и $\text{B19} \rightarrow \text{B2}$ превращениях; d, e, f — близкое к симметричному типу акустическое излучение в сплавах с 9.0, 10.0, 11.0 at. % Cu при $\text{B2} \rightarrow \text{B19}$ и $\text{B19} \rightarrow \text{B2}$ превращениях. Температурная кривая (2).

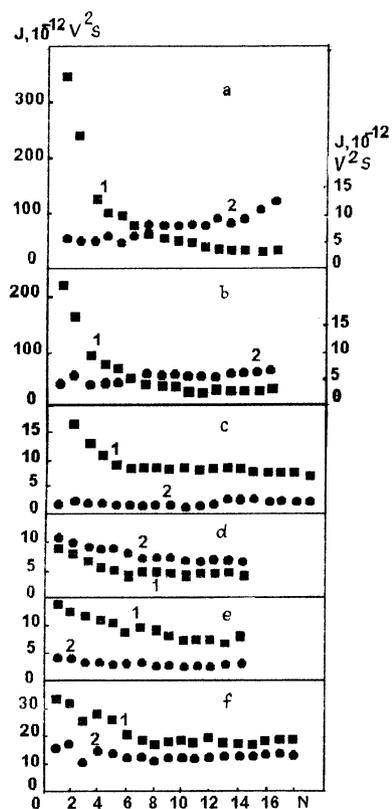


Рис. 2. Влияние циклирования мартенситных превращений в сплавах на акустическую эмиссию: *a, b* — инверсия асимметрии акустической эмиссии первого типа во второй в сплавах с 2.0 и 40.0 at.% Cu; *c* — сохранение асимметрии излучения в сплаве с 8.0 at.% Cu; *d, e, f* — сохранение симметрии излучения в сплавах с 9.0, 10.0, 11.0 at.% Cu. 1 — для прямого превращения, 2 — для обратного превращения; N — номер цикла.

Многочисленное воспроизведение циклов МП по-разному сказывается на эволюции акустической эмиссии (рис. 2). В сплавах с концентрацией меди до 8.0 at.% энергия излучения при прямом МП снижается, а при обратном — растет. В сплавах с концентрацией меди 9.0 at.% и

Таблица 1. Кинетические характеристики МП тройных сплавов Ti(NiCu)

Сплавы, содержание меди, at. %	Мартенситные превращения			Акустическая эмиссия	
	Микрокинетика превращений	Гисте- резис, °С	dY/dt , 1/°С	Исходная асимметрия	Эволюция асимметрии
2.0	Медленный рост- сокращение при B2 → B19' и B19' → B2	30	0.17	Тип 1	Тип 1 → тип 2 То же
4.0		25	0.17	”	
8.0	Микровзрывная при B2 → B19 → B19	8	1.0	Асимметрия типа 1	Сохранение асимметрии
9.0	Микровзрывная на стадии	8	0.5	Близкая к симметрии	Сохранение симметрии
10.0		10	0.5		
11.0	B2 → B19 и B19 → B2	10	0.25		

выше циклирование МП слабо влияет на энергию излучения, но, самое главное, сохраняется симметричный характер излучения.

2. Сопоставим закономерности акустической эмиссии с кинетическими характеристиками мартенситных превращений и механическими свойствами сплавов [2]. Из табл. 1 и 2 следует, что сплавы с низким (до 6.0 at.%) содержанием меди характеризуются высоким напряжением мартенситного сдвига, склонностью к фазовому наклепу (рост предела текучести при циклировании МП), мартенситные превращения — широкой петлей гистерезиса, низким значением тангенса угла наклона мартенситной кривой (dY/dT), микрокинетикой медленного роста-сокращения мартенситных пластин.

Напротив, сплавы с высоким (более 8.0 at.%) содержанием меди характеризуются низким напряжением мартенситного сдвига, низкой склонностью к фазовому наклепу (отсутствует рост предела текучести при циклировании МП), а мартенситные превращения — узкой петлей гистерезиса, высоким значением тангенса угла наклона мартенситной кривой, микровзрывной кинетикой появления исчезновения мартенситных кристаллов.

Для сплавов с близкими значениями напряжения мартенситного сдвига и предела текучести (сплавы с содержанием менее 8.0 at.% меди) характерен первый тип асимметрии акустической эмиссии в

Таблица 2. Механические характеристики тройных сплавов Ti(Ni,Cu)

Сплав	Предел текучести, МПа	Напряжение мартенситного сдвига, МПа	Разность напряжений	
			$\Delta\sigma_s$, МПа	$(\sigma_s - \sigma_m)$, МПа
5. 2 at. % Cu	450	210	100	240
6. 4 at. % Cu	430	120	90	300
7. 6 at. % Cu	380	100	70	280
8. 8 at. % Cu	380	50	40	330
9. 9 at. % Cu	250	35	0	215
10. 10 at. % Cu	250	35	0	215
11. 11 at. % Cu	250	35	0	215

Примечание. В табл. 2 σ_s — предел текучести, σ_m — напряжение мартенситного сдвига, $\Delta\sigma_s$ — прирост предела текучести при циклировании МП.

ходе цикла МП, деградирующий при циклировании до насыщения и претерпевающий трансформацию во второй.

В сплавах с аномально низким значением напряжения мартенситного сдвига наблюдаем близкий к симметричному тип акустической активности в ходе прямого и обратного МП, слабо зависимый от циклирования.

Разумно сплавы по механическим характеристикам, микрокинетике МП и проявлению акустической активности разделить на две группы.

3. Как уже было показано [3,4], акустическая эмиссия при прямом МП в сплавах первой группы обусловлена пластической релаксацией микронапряжений, накапливающихся в ходе превращения. Близкое к пределу текучести значение напряжения мартенситного сдвига свидетельствует о высокой вероятности локального достижения микронапряжениями напряжения пластического (дислокационного) сдвига. Накопление полных дислокаций приводит к упрочнению кристаллической структуры как мартенситной, так и высокотемпературной фаз (рост предела текучести). Рост разности между пределом текучести и напряжением мартенситного сдвига в ходе проведения циклов МП сопровождается деградацией пластической релаксации, а с некоторого цикла при насыщении фазового наклепа к насыщению и пластической релаксации.

4. Остаточная акустическая эмиссия при прямом и тем более акустическая эмиссия при обратном МП уже не связана с пластической релаксацией, а имеет иную природу. Так, например, в сплавах Au–Cd акустическое излучение при обратном МП связывают с рассеянием так называемой конфигурационной энергии, накапливаемой при прямом [5]. При прямом же МП акустическая эмиссия обусловлена зарождением мартенситной границы, ее взаимодействием с локальными препятствиями, выходом на поверхность кристалла.

Будем называть механизм продуцирования акустического излучения после деградации пластической релаксации микронапряжений динамической релаксацией нехимической энергии, понимая под динамической релаксацией специфический механизм рассеяния нехимической энергии мартенситного превращения.

5. Ясно, что в сплавах второй группы, в которых фазовый наклеп не обнаружен (отсутствует пластическая релаксация микронапряжений), фактически с первого цикла МП наблюдаем в "чистом" виде акустическое излучение, обусловленное динамической релаксацией нехимической энергии. В явном виде динамический механизм акустической эмиссии проявляется при моделировании макроскопически взрывной кинетики МП [6].

Специфика динамической релаксации нехимической энергии в этих сплавах (табл. 1) обусловлена микровзрывной кинетикой появления и исчезновения мартенситных кристаллов конечных размеров в отличие от микрокинетики медленного роста–сокращения мартенситных кристаллов в сплавах первой группы, коррелированностью (автокатализичностью) процесса формирования-исчезновения групп мартенситных кристаллов [7], о чем свидетельствует большое значение параметра dY/dT , превышающее в 3 раза значение этой величины в сплавах первой группы. Кроме того, следует учесть, что в условиях спонтанного появления мартенситных кристаллов конечных размеров не происходит накопления нехимической энергии и обратное превращение протекает при минимальном значении упругой энергии [8], а также, что движение межфазной границы осуществляется при аномальном снижении упругих модулей [9].

6. Надбарьерный характер мартенситных превращений предполагает перемещение межфазной границы со скоростью не ниже скорости распространения упругих волн в данной кристаллической среде [10]. Это означает только одно — безызлучательный режим миграции межфазной границы со скоростью, равной скорости поперечной волны

$c_t^2 = (C_{11} - C_{12})/2\rho$, в кубических кристаллах [11], определяющей превращение В2 \rightarrow В19 в модели локализации волн смещений [9]. Энергия межфазной границы (фактически нехимическая кинетическая энергия) идет на возбуждение кристаллической среды и на стимулирование мартенситного превращения в соседнем кристаллите. Процесс МП при этом носит самоаккомодационный (автокаталитический) характер.

Безызлучательный режим движения мартенситной границы нарушается при нарушении самоаккомодационного (консервативного [12]) характера МП (в широком смысле при нарушении когерентности [13]). В этом случае акустический сигнал представляет спонтанное тормозное излучение. Ясно, что такое взаимодействие приводит к снижению скорости межфазной границы до нуля.

Нарушения безызлучательного движения возможно и при превышении скорости V мартенситной границы скорости поперечных волн c_t , т.е. при условии $V/c_t > 1$. Такая ситуация возникает при снижении упругих модулей в окрестности межфазной границы, набегающей на границу раздела кристаллитов, характеризующейся скачком фазовой скорости распространения поперечных волн. Тогда каждый мартенситный кристалл при взаимодействии с границей продуцирует спонтанное переходное излучение, а совокупность мартенситных кристаллов, формирующаяся автокаталитическим путем, представляет систему когерентных излучателей, степень когерентности которых тем выше, чем выше совершенство мартенситной структуры. Спонтанный акустический сигнал продуцируется как переходное акустическое излучение, являющееся аналогом оптическому переходному излучению в нестационарной среде [14].

Эти два варианта продуцирования акустического излучения существенно отличны, что, однако, не исключает формирования акустического сигнала как совокупности переходного и тормозного излучения.

Если соотношение $V/c = 1$ устойчиво сохраняется при обратимых МП, то акустическое излучение продуцируется как тормозное при снижении скорости V до нуля. Очевидно, что в этом случае возможен лишь симметричный характер акустической эмиссии.

Если соотношение $V/c > 1$, то возможен асимметричный характер акустической эмиссии, обусловленный продуцированием спонтанного переходного излучения, существенно зависимый от специфики прямого и обратного МП.

Список литературы

- [1] Плотников В.А., Паскаль Ю.И. // ФММ. 1997. Т. 84. В. 3. 142–149.
- [2] Плотников В.А., Монасевич Л.А., Гюнтер В.Э., Паскаль Ю.И. // ДАН СССР. 1986. Т. 290. В. 1. С. 110–114.
- [3] Плотников В.А., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. // ФММ. 1987. Т. 63. В. 4. С. 757–763.
- [4] Плотников В.А., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. // ФММ. 1988. Т. 65. В. 6. С. 1219–1221.
- [5] Barot J., Avissar J., Gefen Y. // Scr. Met. 1980. V. 14. N 9. P. 1013–1016.
- [6] Плотников В.А. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 1. С. 31–38.
- [7] Ерофеев В.Я., Паскаль Ю.И. // ДАН СССР. 1986. Т. 286. В. 4. С. 882–897.
- [8] Паскаль Ю.И., Ерофеев В.Я., Монасевич Л.А. // Металлофизика. 1984. Т. 6. В. 6. С. 36–40.
- [9] Хачин В.Н. // Изв. вузов. Физика. 1985. В. 5. С. 88–103.
- [10] Паскаль Ю.И., Плотников В.А., Монасевич Л.А. // Ред. журн. Изв. вузов. Физика. Томск, 1989. 48 с. (Деп. в ВИНТИ. Рег. № 5161–В89).
- [11] Вустер У. Применение тензоров и теории групп для описания физических свойств кристаллов. М.: Мир, 1977. 384 с.
- [12] Плотников В.А., Паскаль Ю.И. // Изв. вузов. Физика. 1997. В. 5. С. 49–61.
- [13] Шелепин Л.А. // Когерентная физика и ее приложение. Когерентные кооперативные явления. М.: Наука, 1976. С. 3–20.
- [14] Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. // УФН. 1978. Т. 126. В. 4. С. 353–608.