

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРРОЭЛАСТИКАХ С ГЦК—ГЦТ ПРЕВРАЩЕНИЕМ

О. Е. Парфенов, А. А. Чернышов

Обнаружена и исследована акустическая эмиссия (АЭ), возникающая при структурных фазовых переходах в InTl , $\gamma\text{-Mn}$ и V_3Si . АЭ в этих системах имеет общие черты, связанные с развитием ферроэластического превращения. Сопоставление температурного хода АЭ с данными рентгеноструктурных измерений указывает на существование двух характерных областей ферроэластического превращения I рода, близкого ко II роду. Одна из них является областью сосуществования фаз. Другая связана с перестройкой доменной структуры, происходящей при изменении температуры в ферроэластической фазе, что можно рассматривать как морфологический переход. Сам факт появления акустических сигналов при изменении температуры связан с образованием и движением межфазных и двойниковых границ.

Ферроэластики — вещества, в которых в результате структурного фазового превращения в низкосимметричной фазе формируется система упругих доменов, поведение которых во многом аналогично магнитным доменам в ферромагнетиках и электрическим — в сегнетоэлектриках. Структура доменов способна перестраиваться при приложении внешней нагрузки, причем эта перестройка носит скачкообразный характер, аналогичный скачкам Баркгаузена в ферромагнетиках. В данной работе установлено, что такие же скачки деформации возникают в ферроэластиках и при изменении температуры в области структурного фазового превращения, что можно назвать температурным эффектом Баркгаузена. Они служат источниками сигналов акустической эмиссии (АЭ), которая может быть использована для исследования кинетики фазового превращения.

Метод АЭ, обладающий быстродействием и высокой чувствительностью, применялся ранее в основном к «классическим» мартенситным превращениям в сталях и к термоупругому мартенситу в сплавах типа β -латуни [1]. Мы использовали его применительно к фазовым переходам с тетрагональным искажением кубической решетки металла. Структурные переходы ГЦК—ГЦТ типа представляются особенно интересными, так как они наиболее просты в кристаллографическом отношении и обсуждаются в первую очередь при разработке теорий мартенситных превращений [2-4]. Исследовались 3 типа известных металлических систем: сверхпроводник со структурой $A-15$ — V_3Si , сплавы непереходных металлов InTl и магнитные сплавы на основе $\gamma\text{-Mn}$. Известно, что фазовые превращения в этих кристаллах близки ко II роду — в них сильно выражена динамическая нестабильность решетки и наблюдается малая величина скачка параметра порядка. Поскольку основным механизмом излучения звука при мартенситных превращениях считается рождение мартенситных пластин, то априори не ясно, будет ли возникать заметная АЭ в исследуемых веществах. Измерения проводились на образцах размерами $0.5\text{--}5\text{ см}^3$ в виде монокристаллов ($\gamma\text{-Mn}$ и V_3Si) и поликристаллов (InTl). АЭ измерялась датчиками из пьезокерамики ЦТС-19; 23 в диапа-

зоне от 250 кГц до 1.2 мГц. Использовалась стандартная система усиления и обработки сигналов АЭ [5], позволявшая регистрировать интенсивность акустических сигналов $I_{АЭ}(T)$ и их амплитудный спектр. Фазовые переходы наблюдались при непрерывном изменении температуры со скоростью от 0.1 до 5 К/мин как при охлаждении, так и нагреве образца. Температура ферроэластических переходов в исследованных кристаллах

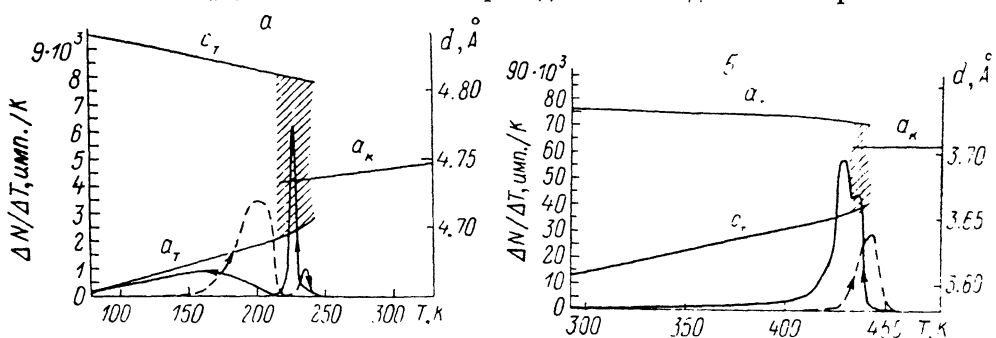


Рис. 1. Интенсивность АЭ при охлаждении и нагреве (штрихи) и зависимость постоянных решетки от температуры в $\text{In}_{0.75}\text{Ti}_{0.25}$ (а) и $\text{Mn}_{0.87}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.13}$ (б).

Двухфазная область заштрихована.

составляет (в К): 21 (V_3Si), 240—320 (InTi), 420—470 ($\gamma\text{-Mn}$). Для того чтобы связать наблюдаемую зависимость интенсивности АЭ от температуры с определенным типом структурных перестроек в образце, на нем одновременно с АЭ проводились рентгенодифракционные исследования (ДРОН-3). По рентгеновским данным можно было установить границы существования двухфазной области и измерить температурную зависимость параметров кристаллической решетки.

Из измерений на нескольких монокристаллических образцах $\gamma\text{-Mn}$ были построены полюсные фигуры распределения интенсивности, позволявшие судить об ориентации доменов в мартенситной фазе.

Во всех образцах как при охлаждении, так и при нагревании была обнаружена четкая АЭ, связанная с фазовым переходом. Она имела вид дискретных импульсов разных амплитуд, что свидетельствует о локальных скачках деформации, сопровождающих ферроэластические превращения. Основные черты АЭ во всех трех системах близки, несмотря на существенные различия в характере межатомных взаимодействий в этих металлах. Для каждого образца наблюдалась хорошая воспроизводимость хода АЭ в процессе фазового превращения, хотя кривые для разных образцов могли заметно различаться в деталях. Все превращения носят кинетический характер: прекращение охлаждения или нагрева ведет к исчезновению акустического излучения. Амплитудный спектр сигналов всегда имел вид $N(a) \sim a^{-\gamma}$, где $N(a)$ — спектральная плотность, значение параметра γ лежит в пределах 0.8—1.2. На рис. 1, 2 показаны зависимость интенсивности АЭ от температуры $I_{АЭ}(T)$, измеренная в циклах охлаждения и нагрева для трех исследованных систем, а также температурный ход параметров кристаллических решеток ГЦК и ГЦТ фаз. Штриховкой отмечены двухфазные области (для V_3Si двухфазная область указана предположительно).

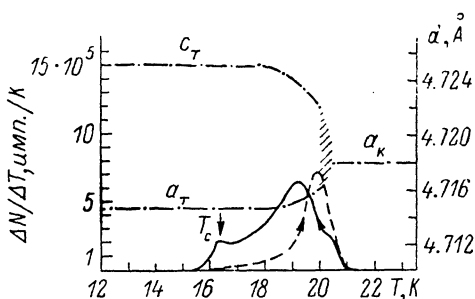


Рис. 2. Интенсивность АЭ при охлаждении и нагреве (штрихи) в V_3Si .

Стрелкой отмечен переход в сверхпроводящее состояние. Температурная зависимость постоянных решетки взята из [6], заштрихована возможная двухфазная область.

Наиболее примечательной особенностью представленных кривых является неожиданно широкий интервал температур, где наблюдается АЭ. Она оказалась существенно шире двухфазной области. Данные для InTl показывают, что фактически существуют две области звучания, которые можно связать с двумя этапами протекания ферроэластического превращения. Относительно узкий пик АЭ возникает при охлаждении или нагреве в области существования двух фаз. Источниками акустических сигналов здесь являются скачки деформации, сопровождающие рождение или исчезновение кристаллитов новой фазы. Существует примерное количественное соответствие между выходом АЭ и концентрацией ГЦТ фазы в образце.

Второй, более широкий, пик АЭ приходится на область существования низкотемпературной ГЦТ фазы. Здесь происходит заметное изменение параметра тетрагональности $\eta = c_r/a_r - 1$ и интенсивность АЭ примерно следует за его изменением с температурой. Естественно связать АЭ в этой области с перестройкой доменной структуры, возникающей в ферроэластике при изменении температуры. В образцах γ -Mn и V_3Si не происходит полного разделения этих двух процессов и пики АЭ существенно перекрываются. Двухфазной области здесь соответствует заметная немонотонность в кривой $I_{AЭ}(T)$ при охлаждении. Кривые эмиссии при нагреве, как правило, не содержат таких немонотонностей и всегда отличаются по форме от кривых охлаждения. В сплавах γ -Mn ГЦК—ГЦТ превращение не является собственно ферроэластическим, так как совпадает с антиферромагнитным переходом. В этом отношении оно отличается от InTl и V_3Si , но общий ход $I_{AЭ}(T)$ не выявляет принципиальных отличий (рис. 1, б). Интересно отметить, что в тех сплавах γ -Mn, где происходит только магнитный переход, АЭ в низкотемпературной фазе также сохраняется, указывая на температурные изменения в системе антиферромагнитных доменов.

Наличие АЭ при структурном превращении в V_3Si представляется особенно интересным из-за чрезвычайно малой величины тетрагональной деформации решетки ($c_r/a_r \simeq 1.003$), затрудняющей изучение кинетики превращения. Вопрос о роде этого перехода длительное время оставался дискуссионным, и лишь сравнительно недавно было получено прямое экспериментальное указание на слабый переход I рода [7]. Полученные нами результаты по АЭ свидетельствуют о скачкообразных процессах зарождения новой фазы, характерных для бездиффузионных переходов I рода. Следует отметить еще одну интересную особенность кривой $I_{AЭ}(T)$ для V_3Si при температуре 16.5 К, которая соответствует переходу образца в сверхпроводящее состояние. При этом перестают изменяться параметры кристаллической решетки и, как следствие, прекращается АЭ. Однако перед «замолканием» возникает пик эмиссии, что указывает на более тонкие особенности в изменении упругих свойств кристалла вблизи сверхпроводящего перехода.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при ферроэластическом фазовом переходе, идущем при изменении температуры, структурные перестройки в системе не ограничиваются областью формирования новой кристаллической фазы. При дальнейшем понижении температуры в образце идет активный процесс изменения его микроструктуры. Известно, что в этой области в ферроэластике существует система упругих доменов, которая может усложняться, образуя полисинтетические двойники, колонии двойников и т. п. Равновесные состояния такой системы обсуждаются в термодинамической теории гетерофазных структур [2]. Процессы перестройки этой структуры могут рассматриваться как морфологические фазовые переходы [8]. Акустическая эмиссия является удобным способом наблюдения за такими процессами, так же как скачки Баркгаузена в ферромагнетиках и сегнетоэлектриках. В этом отношении представляется интересным результат работы [9], показывающий прямую связь узких пиков в температурном эффекте Баркгаузена с изменением доменной структуры ферроэластика $Pb_3(PO_4)_2$. Микроскопическая природа АЭ при

фазовых превращениях требует дальнейших исследований, однако ясно, что сам факт появления акустических сигналов при изменении температуры связан с образованием и движением межфазных и двойниковых границ. Анализ этих явлений в ферроэластиках естественно рассматривать в теории нелинейной упругости, приводящей к различным солитонным моделям ферроэластического превращения [3, 4, 10].

В заключение считаем необходимым поблагодарить В. А. Удовенко и Е. В. Мельникова за полезное обсуждение и помощь в приготовлении образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] *Вороненко Б. И.* *Металловед. и термич. обраб. металлов*, 1982, № 8, с. 30—36.
- [2] *Ройтбурд А. Л.* *УФН*, 1974, т. 113, № 1, с. 69—104.
- [3] *Barsch G. R., Krumhansl J. A.* *Phys. Rev. Lett.*, 1984, vol. 53, N 11, p. 1069—1072.
- [4] *Jacobs A. E.* *Phys. Rev. B*, 1985, vol. 31, N 9, p. 5984—5989.
- [5] *Артюхов В. К., Вакар К. Б., Овчинников Н. И.* и др. *Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике*. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
- [6] *Batterman B. W., Barrett C. S.* *Phys. Rev.*, 1966, vol. 145, N 1, p. 296—300.
- [7] *Ott H. R., Chandrasekhar B. S., Seeber B.* *Phys. Rev. B*, 1985, vol. 31, N 5, p. 2700—2703.
- [8] *Ройтбурд А. Л.* *ФТТ*, 1983, т. 25, № 1, с. 33—40.
- [9] *Большакова Н. Н., Дудник Е. Ф., Некрасова Г. М.* и др. *ФТТ*, 1986, т. 28, № 11, с. 3505—3507.
- [10] *Falk F. Z.* *Phys. B*, 1983, vol. 51, N 1, p. 177—185.

Поступило в Редакцию
21 июля 1987 г.
В окончательной редакции
8 апреля 1988 г.