

05;08;12

## Акустические свойства сплавов на основе TiNiMoFe

© В.Э. Гюнтер, В.И. Чернышев, Т.Л. Чекалкин

Научно-исследовательский институт  
медицинских материалов и имплантатов с памятью формы, Томск

Поступило в Редакцию 8 октября 1999 г.

Исследуется закономерность изменения акустических свойств сплавов на основе TiNi в зависимости от состава сплава и температуры воздействия. Показывается, что в интервале температур существования  $B2$  фазы и интервале температур возможного появления мартенсита под нагрузкой колебания сплавов на основе TiNiMoFe отличаются от колебаний традиционных материалов. После возбуждения самопроизвольных колебаний в интервале  $M_f \leq T \leq M_d$  существует область длительных по времени и малых по амплитуде низкочастотных звуковых колебаний. Установлено, что свободные низкочастотные колебания образца сплава ТН-10 [1] характеризуются низким уровнем затухания в указанном температурном интервале.

Сплавы с памятью формы находят широкое применение для решения многочисленных задач в медицине и технике.

При их использовании в качестве имплантируемых в организм материалов и конструкций (имплантатов) в медицине сплавы на основе TiNi подвергаются знакопеременному воздействию как со стороны организма, так и со стороны окружающей среды. Воздействие окружающей среды обуславливает возбуждение колебаний широкого спектра волн внутри тканей организма и в материале имплантата [1]. Фазовые переходы в сплавах на основе TiNi оказывают большое влияние на физико-механические свойства в широком интервале температур. В зависимости от состава сплава и его термомеханической обработки акустические свойства сплавов TiNi характеризуются спектром необычных явлений. Это следует из литературных источников в которых описаны исследования акустических свойств данных сплавов [2–4]. В настоящей работе исследовались закономерности изменения акустических свойств сплавов на основе TiNi вблизи температурного интервала мартенситных превращений.

Для исследования были изготовлены образцы из сплава на основе никелида титана ТН-10 с типичной формой камертона. Колебания, возникающие в образце после возбуждения, регистрировались высокочувствительным микрофоном, чей частотный диапазон совпадает с частотной областью колебания образца, определяемой экспериментально при помощи осциллографа. Далее аналоговый сигнал подавался на вход усилителя. После усиления сигнал поступал на вход АЦП (аналого-цифровой преобразователь) персонального компьютера. Дальнейшая обработка цифрового сигнала проводилась по Фурье-преобразованию на основе поведения максимума энтропии в соответствии с методикой [5]. Графическая обработка данных была осуществлена прикладной программой Origin®.

На рис. 1 представлена временная развертка амплитуды свободных колебаний камертона сплава ТН-10. В начальный период колебания носят квазигармонический характер, причем амплитуда колебаний изменяется приблизительно по логарифмическому закону. Начиная с некоторого момента времени амплитуда колебаний остается практически постоянной, а период колебаний уменьшается. На всем временном протяжении колебательного процесса можно заметить характерные биения. Колебательная система ведет себя так, как будто присутствует вынуждающая сила, поддерживающая колебания в течение длительного промежутка времени.

Стабильность амплитуды колебаний и наличие биений указывает на то, что частота вынуждающей силы находится вблизи одной из более низких гармоник, сдвинутой небольшой угол по фазе.

Явление может быть объяснено, если учесть, что данный сплав находится в предмартенситном состоянии. Колебательная система, будучи выведенной из состояния равновесия и предоставленная сама себе, должна возвратиться в состояние равновесия либо в иное состояние, если заданным условиям соответствуют несколько устойчивых состояний. Переход системы TiNi из предпереходного состояния  $B2$  в состояние  $B19'$  и обратно составляет полный колебательный цикл. Рассеяние энергии колебаний при этом определяется всей совокупностью релаксационных процессов, разыгрывающихся при периодическом деформировании кристаллов  $B2$  фазы и мартенсита, и потому математически определить его в общем виде не представляется возможным [6]. Следует, однако, учесть, что одним из определяющих факторов мартенситной реакции являются тепловыделения. По некоторым данным [1] количество выделяющегося

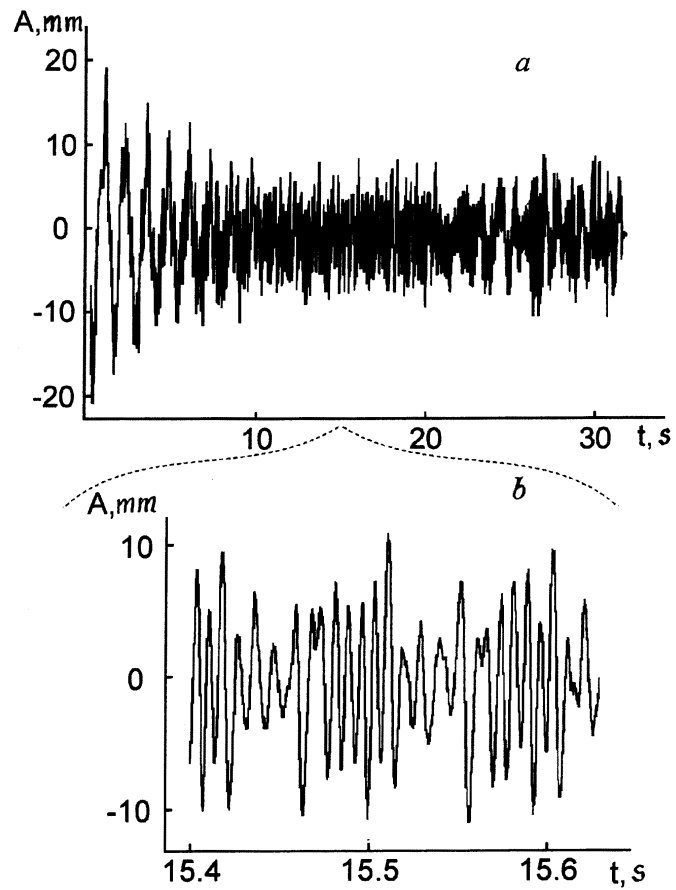


Рис. 1. Временная развертка свободных колебаний образца сплава ТН-10.

тепла при переходе  $B2 \rightarrow B19'$  составляет более  $8.3 \text{ kJ/mol}$ . При этом такое же количество тепла поглощается системой при обратном переходе  $B19' \rightarrow B2$ . В условиях системы, когда теплопроводность TiNi чрезвычайно мала и составляет  $1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  [1], тепловые процессы играют важную роль при колебаниях. В особенности, если колебания происходят в адиабатических условиях (когда выделение тепла при

появлении мартенсита и поглощению тепла с появлением  $B2$  фазы не отводится во внешнюю среду).

Появление мартенсита выше температуры  $M_S$  под действием нагрузки связано [7] следующим соотношением  $\Delta\sigma = \Delta H \Delta T / T_0 \varepsilon_m$ , где  $\Delta\sigma$  — приложенное напряжение,  $\Delta T$  — изменение температуры,  $T_0 = (M_S - M_d)/2$  — температура равновесия фаз,  $\Delta H$  — скрытая теплота превращения,  $\varepsilon_m$  — деформация за счет мартенситной реакции.

Для индивидуальной  $i$ -й мартенситной пластины или микрообласти высокотемпературной фазы уравнение будет иметь следующий вид [7]:

$$\Delta\sigma_i = \pm \frac{\Delta H_i \Delta T_i}{T_{0i} \varepsilon_{M_i}} \quad (1)$$

( $\pm$  с учетом выделения или поглощения тепла).

Однако если появление единичной  $i$ -й мартенситной пластины связано с приложением нагрузки  $\Delta\sigma$ , то увеличение температуры на величину  $\Delta T'_i$  приводит к появлению напряжения обратного знака:

$$\Delta\sigma_i = \frac{\Delta T'_i c \varepsilon_{M_i} \Delta T'_i}{T_{0i} \varepsilon_{M_i}}, \quad (2)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость.

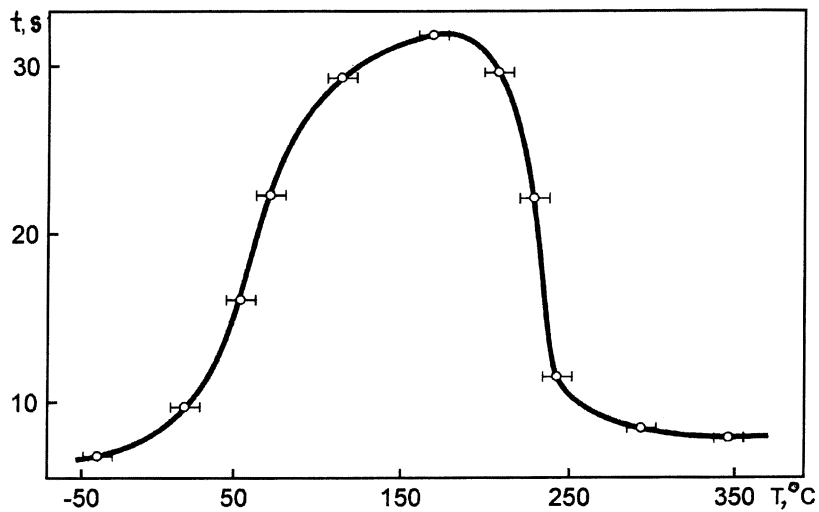
Приравнявая (2) и (1), можно получить условия для длительно колеблющейся системы (без учета других релаксационных процессов):

$$\frac{(\Delta T'_i)^2 c}{T_{0i} \varepsilon_{M_i}} = \frac{\Delta H_i \Delta T_i}{T_{0i} \varepsilon_{M_i}}, \quad (\Delta T'_i)^2 = \frac{\Delta H_i \Delta T_i}{c},$$

при условии  $\Delta T'_i = \Delta T_i$  получаем:

$$\Delta T'_i = \pm \frac{\Delta H_i}{c}.$$

Анализ данного выражения показывает условие равновесия системы в адиабатических условиях, когда выделение скрытой теплоты перехода за счет появления мартенситных пластин приводит к локальному разогреву, т.е. возникновению теплового фронта, который является движущей силой обратного перехода. Можно ожидать, что при инициировании низкочастотных, самопроизвольных колебаний сплавов на основе TiNi (звуковой диапазон частот) в интервале температур возможного появления мартенсита под нагрузкой, т.е. в интервале  $M_f \leq T \leq M_d$ , колебания



**Рис. 2.** Температурная зависимость изменения длительности колебаний образца сплава ТН-10.

системы на основе TiNi будут характеризоваться более длительным по времени затуханием.

Исследуя развертку свободных колебаний сплава (рис. 1), были получены результаты, подтверждающие данный вывод. В интервале температур  $M_f \div M_d$  наблюдается необычное поведение образцов сплавов, заключающееся в необычном увеличении времени колебания системы, а в мартенситном состоянии колебания, наоборот, практически полностью подавляются. Отличительной особенностью данных зависимостей является существование области длительных по времени низкочастотных звуковых колебаний, малых по амплитуде [8]. Появление такой области "площадки" на временной развертке связано со знакопеременным воздействием на инициирование внешним напряжением мартенситных реакций в двухфазном состоянии. На рис. 2 для сплава ТН-10 приведена температурная зависимость изменения длительности колебаний.

Можно констатировать, что колебательная система, изготовленная из ТН-10, имеет аномально высокую по величине длительность колебаний в температурном интервале  $M_f \div M_d$ , т.е. области инициирования двухфазного состояния.

Основным механизмом низкого уровня затухания в сплавах на основе никелида титана является высокая подвижность межфазных границ раздела (мартенситной и высокотемпературной фазы) и высокое значение энтальпии превращения, обуславливающее наличие теплового фронта при низкой удельной теплопроводности сплава.

Эффект "незатухающей" области звуковых низкочастотных колебаний с малой амплитудой обнаружен на металлических системах впервые и открывает необычные возможности создания устройств с новыми свойствами.

## Список литературы

- [1] Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Томск: Изд. Том. ун-та, 1998. 478 с.
- [2] Buchler W.J., Wiley R.C. The properties of TiNi and Associated Phases, Rept. NOLTR 61-75 (AD 266607). U.S. Naval Ordnance Laboratory, Aug. 3, 1961.
- [3] Hasiguti R.R., Iwasaki K. Symposium of TiNi and Associated Compounds. NOLTR 68-16, U.S., Naval Ordnance Laboratory, Dec. 20, 1968. P. 401–412.
- [4] Bradley D. // J. Acoust. Soc. Am. 1975. V. 37. P. 700–704.
- [5] Сарычев В.Т. Спектральное оценивание методами максимальной энтропии. Томск: Изд. Том. ун-та, 1994. С. 225.
- [6] Гюнтер В.Э., Матюнин А.Н., Монасевич Л.А. // Имплантаты с памятью формы. 1993. № 1. С. 42–44.
- [7] Гюнтер В.Э., Котенко В.В., Миргазизов М.З. и др. Сплавы с памятью формы в медицине. Томск: Изд. Том. ун-та, 1986. 207 с.
- [8] Гюнтер В.Э., Чернышев В.И., Чекалкин Т.Л. // Материалы междунар. конф. "Сверхэластичные материалы и имплантаты с памятью формы в медицине". Томск, 1998. С. 411–412.