

ДИНАМИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО НАГРЕВА TiNi СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Клубович В.В.¹, Рубаник В. В.^{1,2}, Рубаник В. В. мл.^{1,2}, Шадурский А. В.³,
Милюкина С. Н.²

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь,

²Витебский государственный технологический университет, Беларусь

³Полоцкий государственный аграрно-экономический колледж, Беларусь
ita@vitebsk.by

Введение

Влияние ультразвука на фазовые превращения в металлах обусловлено, главным образом, его воздействием на процессы зарождения и роста кристаллов новой фазы, а, следовательно, и деформационные явления, сопровождающие превращения [1]. Исследования ультразвукового воздействия на поведение сплавов с памятью формы представляют особый интерес: поскольку реализация эффекта памяти формы может осуществляться как под действием температуры, так и механических напряжений, — при введении ультразвуковых колебаний (УЗК) оба эти фактора действуют одновременно, т. е. УЗК могут инициировать процесс восстановления формы в СПФ [2]. Под действием ультразвука температура материала может значительно повышаться, т. е. он является одним из способов нагрева, но, в то же время, имеет существенные отличия, а, следовательно, кинетика мартенситных превращений под действием УЗК также может отличаться [3]. Анализ работ по данной тематике показывает, что механизм ультразвукового воздействия на материалы с термоупругими фазовыми переходами имеет довольно сложную природу, которая в деталях остаётся неясной, и необходимо проведение дополнительных исследований. Данная работа посвящена исследованию особенностей нагрева TiNi сплавов в процессе ультразвукового воздействия.

Материалы и методы

При проведении исследований использовали прямолинейные образцы проволоки Ti–50,4ат.%Ni диаметром 0,65 мм и цилиндрические образцы Ti–50,0ат.%Ni диаметром 10 мм и длиной 80 мм, подвергнутые предварительной термообработке при 700 °С в течение 30 мин с последующей закалкой в воде. После чего во всех образцах при термоциклировании через интервал мартенситных превращений наблюдалось одностадийное фазовое превращение по схеме B2 ↔ B19'. Характеристические температуры, определенные методами дифференциальной сканирующей калориметрии, составили:

— $M_n = 30$ °С, $M_k = 14$ °С, $A_n = 41$ °С, $A_k = 57$ °С для сплава Ti–50,4ат.%Ni;

— $M_n = 72$ °С, $M_k = 46$ °С, $A_n = 85$ °С, $A_k = 114$ °С для сплава Ti–50,0ат.%Ni.

Введение УЗК частотой 22 кГц осуществляли на экспериментальной установке, блок-схема которой представлена на рисунке 1, при комнатной температуре (~ 20 °С), когда образцы TiNi находились в мартенситном состоянии. Цилиндрические образцы TiNi, выполненные в виде волноводов, крепили к концентратору резьбовым соединением, а проволоочные образцы деформировали до ~ 6,3 % и фиксировали на конце разрезного титанового волновода полуволновой длины (рисунок 2). Амплитуду вводимых УЗК измеряли на торце волновода с помощью бесконтактного виброметра, — её значения составляли до 12 мкм. Динамику нагрева исследуемых образцов в процессе введения УЗК наблюдали при помощи тепловизионной камеры NEC 9100 с частотой записи 5 кадров в секунду.



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для ультразвуковой обработки сплавов с памятью формы

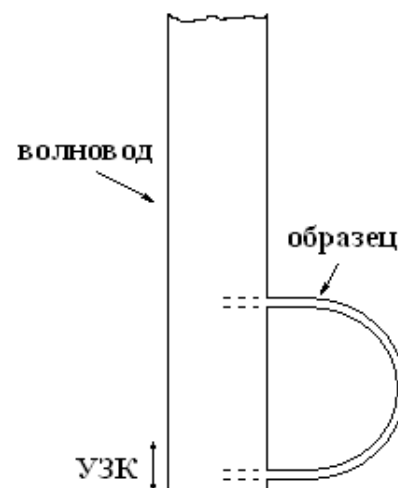


Рис. 2. Схема крепления проволочных образцов TiNi в разрезном волноводе

Результаты и обсуждение

Для максимального преобразования энергии вводимых УЗК в тепло система должна работать в резонансном режиме, который характеризуется синусоидальным распределением акустических параметров по длине волновода. Максимальный нагрев образцов резонансной длины наблюдается в узлах смещения колебаний, а минимальный – в узлах напряжений. Таким образом, в результате введения УЗК наблюдается неравномерный нагрев образца-волновода и появление некоторого постоянного распределения температуры по длине образца (рис. 3).

Рассмотрим температурную динамику в области максимального нагрева образца в процессе ультразвукового воздействия (рис. 4). Анализ результатов тепловизионных исследований образцов в виде волновода показал, что сразу после включения ультразвука наблюдается увеличение температуры, которая, достигнув некоторого максимального значения, соответствующего температуре A_k , далее практически не изменяется до момента выключения ультразвука (рис. 4а). Это связано с изменением внутреннего трения в материале при переходе из мартенсита в аустенит, сопровождаемом поглощением энергии ультразвука. При этом увеличение температуры осуществляется в два этапа: сначала, пока образец находится в мартенситной фазе, она резко возрастает до A_n (~ 3 °C/c), а затем, когда начинается обратное фазовое превращение, скорость нагрева уменьшается (до $\sim 0,1$ °C/c), о чем свидетельствует уменьшение наклона кривой зависимости температуры от времени.

Похожая динамика наблюдается и в проволочных образцах (рис. 4б), однако имеют и отличительные особенности: температура увеличивается до максимального значения, несколько превышающего A_k (на 15–20 °C), что обусловлено их деформированным состоянием, а затем понижается до A_k . Так как A_k^σ в данном случае составляет ≈ 160 °C, полученные результаты можно объяснить лишь предположив, что при ультразвуковом воздействии обратный мартенситный переход в напряженном материале реализуется при значительно более низких температурах, чем при тепловом.

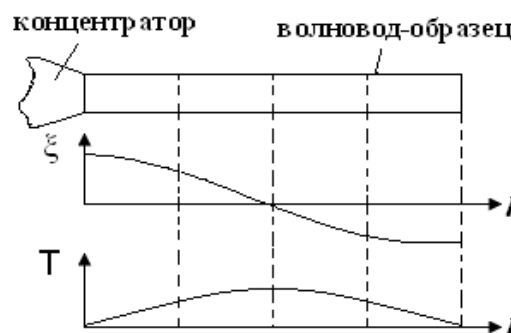


Рис. 3. Распределение амплитуды смещений и температуры по длине волновода в процессе введения УЗК

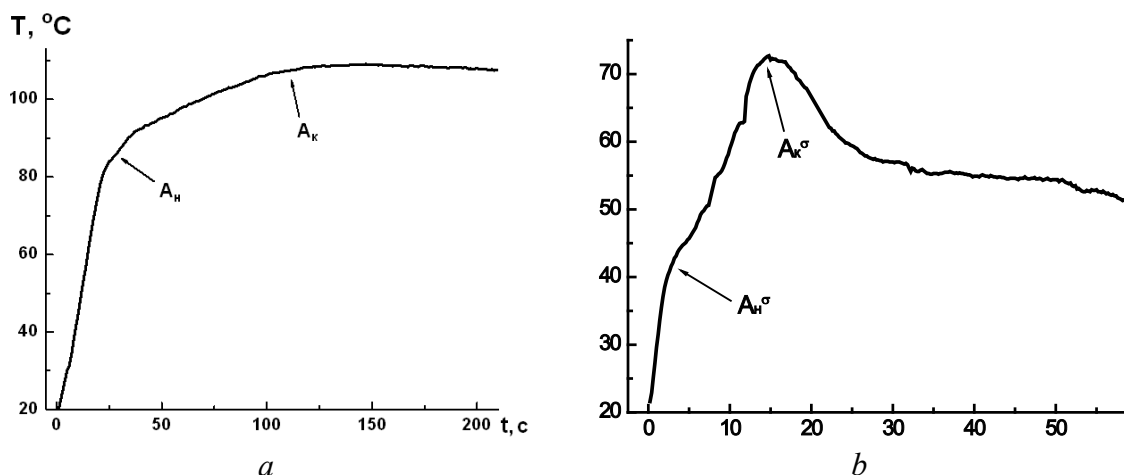


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры от времени ультразвукового воздействия: *a* — в Ti-50,0at.%Ni; *b* — в Ti-50,4at.%Ni

Таким образом, процесс нагрева образцов за счёт поглощения энергии УЗК продолжается до перехода никелида титана (полностью или частично) в аустенитное состояние, в котором его внутреннее трение ниже по сравнению с мартенситным и двухфазным [4], вследствие чего дальнейшего нагрева не происходит.

При моделировании процесса ультразвукового нагрева сплава TiNi получены аналогичные результаты (рисунок 5), что свидетельствует о хорошем соответствии экспериментальных и модельных данных.

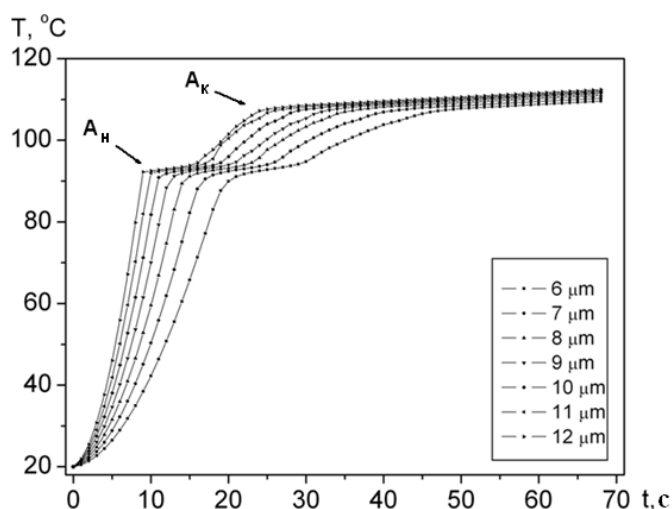


Рис. 5. Модельная зависимость максимальной температуры TiNi образца от времени ультразвукового воздействия

Заключение

Ультразвуковое инициирование эффекта памяти формы в сплавах TiNi имеет ряд особенностей: неравномерное распределение температуры по длине образца, изменение скорости нагрева в процессе введения УЗК и снижение температуры окончания обратного мартенситного превращения в деформированном материале.

Список литературы

1. Тяпунина, Н. А. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами / Н.А. Тяпунина, Е.К. Наими, Г.М. Зиненкова. — М.: Изд-во МГУ, 1999. — 238 с.
2. Klubovich, V. V. Generation of shape memory effect in Ti-Ni alloy by means of ultrasound / V.V. Klubovich, V.V. Rubanik, V.A. Likhachov, V.V. Rubanik Jr., V.G. Dorodeiko // SMST-1997 Proceedings, Asilomar, California, USA. — 1997. — Pp. 59-64.
3. Rubanik, V.V. The ultrasounds initiation of SME ultrasound / V. V. Klubovich, V. V. Rubanik, V. V. Rubanik Jr. // J. de Phys., Vol. 112, № IV. — 2003. — Pp. 249-251.
4. Kustov, S. Damping properties of SMA / S. Kustov, J. Humbeeck // Materials Science Forum, Vol. 583. — 2008. — Pp. 85-109.