Результаты численных расчетов (рис. 4–6) по ультразвуковому разогреву TiNi-образцов резонансной длины показали хорошее совпадение с экспериментом, что позволяет утверждать о состоятельности предложенной модели.

Список литературы

1. Рубаник, В.В. Влияние ультразвука на деформационное поведение TiNi сплавов / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.) // Особенности структуры и свойств перспективных материалов / Под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск, Изд-во НТЛ, 2006. – Гл. 12. – С. 219-240.
2. Кулемин, А.В. Ультразвук и диффузия в металлах / А.В. Кулемин.– М.: Металлургия, 1978.– 200 с.
3. Рубаник, В.В. Моделирование процессов тепловыделения в TiNi сплавах при ультразвуковом воздействии / В.В. Рубаник, А.В. Шадурский, В.В. Рубаник (мл.) // XVII Петербургские чтения по проблемам прочности: сб. матер. конфер., 10-12 апреля 2007, С.-Петербург, в 2 ч. – Ч.2. - С.283-285.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ НАГРЕВ ВОЛНОВОДОВ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА

Рубаник В. В., Клубович В. В., Рубаник В. В. мл.*, Андреев В. А., Рубаник О. Е.**

Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь
**Витебский государственный технологический университет,*
***Промышленный центр «МАТЭКС», Москва*
jr@tut.by

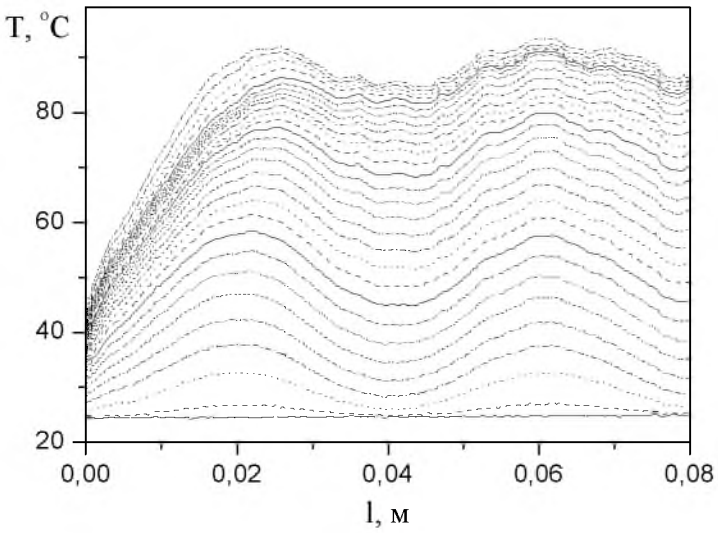
Материалы и сплавы с памятью формы (СПФ) привлекают все большее внимание с момента обнаружения и первой публикации об эффекте памяти формы Чангом и Ридом в 1951 году [1]. Эти материалы обладают чрезвычайно большими восстанавливаемыми деформациями (порядка 10 %) неупругой природы. Удивительная способность полностью возвращать большие деформации – результат термоупругого фазового превращения низкотемпературной мартенситной в высокотемпературную аустенитную фазу. Именно это свойство позволяет использовать СПФ во многих инновационных технических решениях [2].

Ультразвуковое воздействие на металлы и сплавы в большинстве случаев вызывает неравномерный разогрев материала [3, 4]. В первую очередь, процесс нагрева связан с демпфирующими свойствами материала, мощностью вводимых ультразвуковых колебаний (УЗК). Так при воздействии УЗК в течении 20 секунд образцы из стали, меди нагреваются на 100÷200 К, алюминиевые образцы всего на 5÷10 К [5].

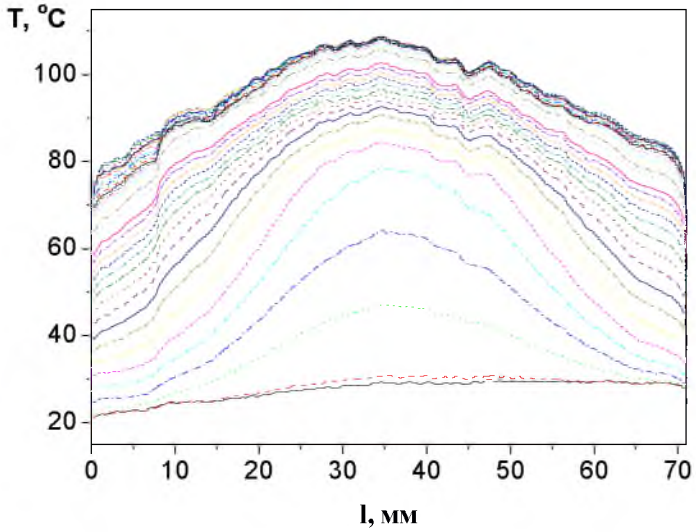
Учитывая, что в сплавах с эффектом памяти формы при реализации термоупругого перехода происходит максимальное проявление демпфирующих свойств [6], следует ожидать наибольшего поглощения энергии акустических колебаний в температурном интервале превращения. В этой связи целью этапов работы является исследование кинетики разогрева и распределения температуры по длине TiNi волновода в процессе ультразвукового воздействия.

Исследования проводили с помощью тепловизора Thermo Tracer NEC TN9100, представляющего собой бесконтактную высокочувствительную инфракрасную ка-

меру. Спектральный диапазон измерений составлял от 8 до 14 мкм. Для возбуждения в образцах УЗК использовали ультразвуковые генераторы с автоматической подстройкой резонансной частоты УЗДН-1 с магнитострикционным преобразователем собственной резонансной частотой 22 кГц и УЗГ4-У-44 с пьезокерамическим преобразователем с полосой рабочих частот 40...50кГц. Цилиндрические образцы (волноводы) диаметром 10 мм и длиной 70÷80 мм крепили к концентратору с помощью резьбового соединения. Частота возбуждаемых колебаний непрерывно фиксировалась частотомером ЧЗ-33, амплитуда – бесконтактным виброметром БВУ-3М.



а)



б)

Рис. 1. Профили распределения температуры по образцу с интервалом в 5 с при ультразвуковом воздействии частотой 44 и 22 кГц

В качестве образцов использовали никелид титана, в котором прямой и обратный фазовые переходы осуществляются по схеме B2→B19 и характеристические температуры, измеренные методом дифференциальной сканирующей калориметрии, составляли: $M_н$ = 72°C, $M_к$ = 46°C, $A_н$ = 85°C, $A_к$ = 114°C.

Тепловизионные исследования ультразвукового разогрева TiNi волноводов показали, что в образцах резонансной длины в процессе воздействия ультразвука максимальный нагрев наблюдается в узлах смещений и минимальный в пучностях смещений механических колебаний. Исследование кинетики ультразвукового разогрева TiNi волноводов проводили как по линейному профилю, так и по выделенной площадке образца. Температурное поле фиксировали с частотой 1 Гц. При частоте воздействия 44 кГц образец являлся «волновым» и максимальный нагрев проходил в двух областях (рис. 1*а*); при частоте 22 кГц образец «полуволновой» длины и максимальный нагрев в одной области – посередине (рис. 1*б*).

В мартенситной и аустенитной фазах перепад температуры по длине образца в процессе его нагрева за счет поглощения энергии УЗК составляет до 20–30°C. В аустенитном состоянии УЗК не вызывает дальнейшего значительного нагрева волновода и распределение температур вдоль образца стабилизируется. Это обусловлено более низким уровнем внутреннего трения характерного для TiNi в аустенитном со-

стоянии по сравнению с мартенситным и двухфазным [2, 6]. Диссипация акустической энергии в аустенитном состоянии практически не происходит. Однако с течением времени неоднородность распределения температуры по длине образца сохраняется.

Следует отметить, что в зависимости от времени действия ультразвука прослеживается нелинейный рост температуры волновода. Это связано со значительным изменением уровня внутреннего трения при переходе из мартенситного в аустенитное состояние и поглощением энергии в результате фазового перехода [7]. На рис. 2 представлена зависимость температуры TiNi волновода в области максимального нагрева от времени действия ультразвука частотой 22 кГц разной интенсивности. Поскольку максимальный нагрев идет в областях, где находятся пучности механических напряжений, скорость нагрева определяли именно в этих местах.

Как отмечалось ранее, рост температуры носит нелинейный характер. При условии поддержания постоянной амплитуды механических смещений на торце волновода наибольшая скорость нагрева наблюдается, когда материал находится в низкотемпературной мартенситной фазе, и составляет в нашем случае до 3 К/с (рис.3).

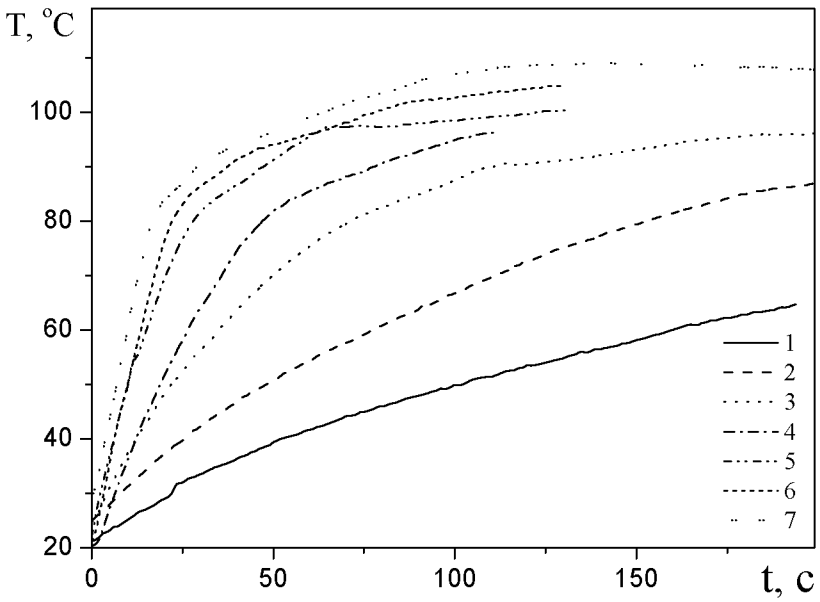


Рис. 2. Зависимость температуры TiNi волновода в области максимального нагрева от времени действия УЗК амплитудой 6 мкм (1), 7 мкм (2), 8 мкм (3), 9 мкм (4), 10 мкм (5), 11 мкм (6) и 12 мкм (7) частотой 22 кГц

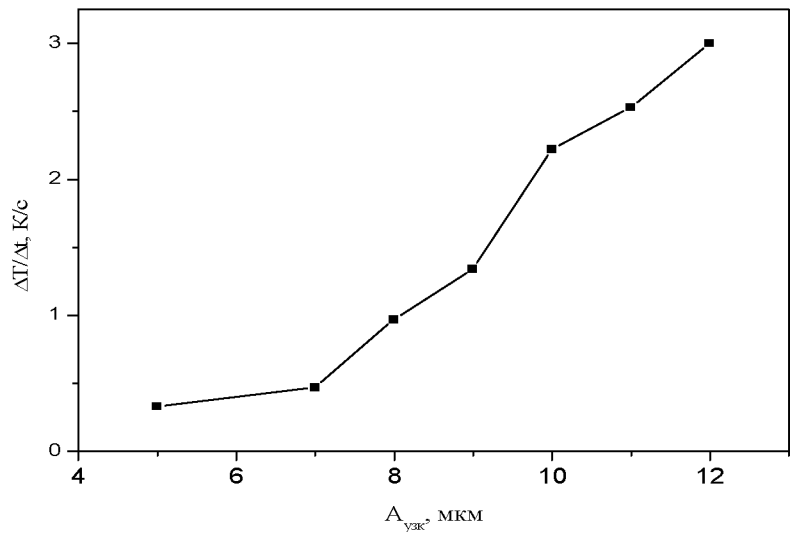


Рис. 3.Зависимость скорости нагрева TiNi волновода в мартенситном состоянии от амплитуды ультразвуковых колебаний

При температуре $A_н = 85°C$ в материале начинается фазовое превращение, которое идет с поглощением энергии, скорость нагрева при этом уменьшается и составляет порядка 0,05–0,1 К/с. Переход материала в высокотемпературное аустенитное состояние практически останавливает процесс нагрева и температура по образцу стабилизируется, при этом скорость разогрева с увеличением амплитуды колебаний не изменяется.

В процессе ультразвукового воздействия в TiNi сплаве происходят фазовые превращения, которые изменяют физические и механические свойства материала, определяющие скорость распространения упругих волн, в частности, модуля Юнга. Ультразвуковое инициирование эффекта памяти формы в никелиде титана сопровождается изменением скорости разогрева материала, что также вызывает изменение акустических параметров системы. Изменение модуля Юнга, а значит и скорости распространения продольной ультразвуковой волны, в процессе термоупругого фазового превращения для одной и той же волноводной системы должно приводить к перераспределению (смещению) в ней узловых точек стоячей волны. Т.е. в процессе ультразвукового инициирования термоупругого фазового превращения должно наблюдаться смещение положения области максимального разогрева волновода.

Действительно, анализ профилей распределения температуры по образцу при ультразвуковом воздействии частотой 44 кГц указывает на то, что происходит смещение точки, соответствующей первому максимуму температуры. Для TiNi образца волновой длины это смещение составляет 6 мм.

Заключение

Изменяя частоту и амплитуду ультразвуковых колебаний в процессе инициирования фазового перехода возможно управление ходом фазового превращения в материале, скоростью его осуществления. Скорость изменения температуры на различных участках составляет до 1–3 град/с. Ультразвуковое инициирование эффекта памяти формы в никелиде титана сопровождается изменением скорости разогрева материала, что вызвано реализацией термоупругого фазового перехода в материале.

Список литературы

1. 1 L.C. Chang, T.A. Read Behavior of the elastic properties of AuCd // Trans. Met. Soc. AIME.– 1951.– Vol. 191.– P. 47.
2. 2 Материалы с эффектом памяти формы: Справ изд.: В 4 т. / Под ред. В.А. Лихачева.– СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998.– Т. 4.– 1998.– 268 с.
3. 3 А.В.Кулемин Ультразвук и диффузия в металлах.– М.: Металлургия, 1978.– 200 с.
4. 4 Ультразвуковой высокотемпературный нагрев и его применение для термической обработки при исследованиях металлов и сплавов / Ю.Ф. Балалаев, С.З. Бокштейн // ФММ.– 1963.– Т. 16, вып. 6.– С. 872–876.
5. 5 Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials / R.B. Mignogna, R.E. Green, Jr. et al. // J. Ultrasonic.– 1981.– № 7.– P. 159–163.
6. 6 Лихачев, В.А. Эффект памяти формы / В.А. Лихачев, С.Л. Кузьмин, З.П. Каменцева // Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 216 с.
7. 7 Температурные поля в TiNi волноводах при ультразвуковом воздействии / В.В.Клубович, В.В.Рубаник, В.В.Рубаник, О.Е.Рубаник // Вестник БрГТУ. – Т. 4 (46), 2007. – С. 39-40.